

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
Filière: énergie renouvelables
Spécialité: énergie renouvelables en électrotechnique

Mémoire de fin de cycle

Pour l'obtention du diplôme Master

Thème

Etude d'un système hybride PV/PAC/ Batteries

Préparé par :
HAMANE Zahia
HASSANI Hanane

Dirigé par :
Mme REKIOUA.DJ

Membre de jury:
Mme SERIR
Mr BEKKA

Année Universitaire : 2017/2018

Remerciements

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

On tient tout d'abord à remercier notre encadreur Mme. REKIOUA Djamila, pour sa contribution et son aide qui nous ont été indispensable pour la réalisation de ce travail ainsi que toutes ces remarques constructives qui nous ont permis d'approfondir les connaissances scientifiques.

Et sans oublier Mr. Mebarki et Mr. Azzi.

Sans oublier on remercie les jurys qui nous ferons l'honneur de juger ce travail.

Enfin, dans ces dernières lignes on tient à remercier nos parents, nos sœurs et nos frères, pour les conseils et les encouragements qu'ils nous ont toujours prodigués ainsi que pour leur soutien tant moral que financier. Sans eux, on n'en serait pas où on 'en est et ce qu'on est.

Merci encore à tous...

Dédicaces

Je dédie ce travail à :

Mes parents.

Mes frères et sœurs.

Tout (es) mes amis.

Hanane

Dédicaces

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

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

Que ce modeste travail puisse constituer une légère compensation pour tous les nobles sacrifices et les extrêmes dons qu'ils se sont imposés pour assurer notre éducation et qu'aucune dédicace ne saurait exprimée l'affection et le respect que nous leurs éprouvons.

A mes très chères sœurs: Fatima, Souhila, Sarah, pour leurs encouragements permanents, et leur soutien moral,

A mon cher petit frère Lyes,

A mon fiancer Syphax et mes beaux-parents,

A toute ma famille pour leurs soutien tout au long de mon parcours universitaire,

A mes copines de chambres: Lydia et Thala, à mes amies,

A mon amie et mon binôme: HASSANI Hanane

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

Merci d'être toujours là pour moi.

Zahia

Abréviations

- SEH Système d'énergie hybride
- PV Photovoltaïque.
- PAC Pile a combustible.
- CC Courant continu.
- CA Courant alternatif.
- GPV Générateur photovoltaïque.
- PO Méthode de perturbation et d'observation.
- MPPT Maximum power point tracking (poursuite de point de puissance maximal).
- PPM Point de puissance maximale.

- PEMFC Proton exchange membrane fuel cell (Pile à combustible à membrane échangeuse de protons)
- FEM Force électromotrice.
- STC Condition d'essai standard (standard test condition).
- PDD Profondeur de décharge des batteries
- EDC Etat de charge.
- PEM Proton Exchange Membrane.
- SGP Système gestion de puissance.

Symboles

- E_{sref} L'éclairement sous conditions standards. [W/m²]
- E_s Ensoleillement [W/m²]
- T_{jref} Température sous conditions standards [°C]
- T_j Température de jonction [°C]
- I_{sat} Courant inverse de saturation de la diode [A]
- I_{ph} Le photo-courant [A]
- I_d Courant de polarisation de la jonction PN [A]
- I_{rsh} Courant traversant la résistance shunte [A]
- q Charge élémentaire ($1.6 \cdot 10^{-19}$ C) [C]
- K Constante de Boltzmann ($1.38 \cdot 10^{-23}$ J/k) [J/K]
- A Coefficient d'idéalité de la cellule
- N_s Nombre de cellules connectées en série [-]
- N_p Nombre de cellules connectées en parallèle [-]

Nomenclature

• E_g	Energie de gap	
• $P1, P2, P3, P4$	Paramètres constants	[-]
• E_{Nernst}	La tension instantanée de Nernst	[V]
• V_{act}	Chute de tension due aux pertes d'activation.	
• U_{pac}	Tension de la pile	[V]
• V_{ohm}	Chute de tension due aux pertes ohmiques.	
• V_{conc}	Pertes de concentration.	
• T	Température opératoire absolue de la pile	[K]
• $P_{H_2}^*$	Pressions partielles à l'interface de l'hydrogène	[atm]
• $P_{O_2}^*$	Pressions partielles à l'interface de l'oxygène	[atm]
• $C_{O_2}^*$	Les concentrations de l'oxygène	[mol/cm ³]
• P_{cath}	La pression de l'oxygène à la cathode	[bar]
• P_{anode}	La pression de l'hydrogène à l'anode	[bar]
• R_C	La résistance équivalente de contact à la conduction des électrons	[Ω]
• R_M	La résistance équivalente de la membrane à la conduction des protons	[Ω]
• l	L'épaisseur de la membrane	[μm]
• r_M	La résistance spécifique de la membrane	[Ω]
• δ_{H_2O/SO_3^-}	La teneur en eau dans la membrane	
• A	La surface active de la pile	[cm ²]
• B	Constante empirique	
• J	La densité de courant du fonctionnement permanente	[A/cm ²]
• J_{max}	La densité de Courant maximale	[A/cm ²]
• V_{bat}	Tension de la batterie	[V]
• I_{bat}	Courant de la batterie	[A]
• R_b	Résistance interne de la batterie	[Ω]
• C_{bat}	Capacité de la batterie	[Ah]
• I_{10}	Courant nominal de la batterie	[A]
• C_{10}	Capacité nominale de la batterie	[Ah]
• $V_{bat_déch}$	Tension de décharge de la batterie	[V]
• $V_{bat, char}$	Tension de charge de la batterie	[V]
• Q_d	Quantité de charge	[C]
• R_i	Résistance initiale	[Ω]
• e_{rev}	Le potentiel inverse.	
• V_i	Le potentiel idéal (électro chimique).	
• ΔG	Le changement d'énergie libre de Gibbs	[J / mol]
• F	La constante de Faraday.	
• V_m	Le volume molaire.	[m ³ /mol]
• R	Constante de gaz idéale.	

Nomenclature

• P	Pression.	[bar]
• V_H	Le taux de production d'hydrogène.	
• I	Courant.	[A]
• P_b	La pression du réservoir.	[bar]
• P_{bi}	La pression initiale de réservoir de stockage	[bar]
• T_b	La température de fonctionnement	[K]
• V_b	Le volume du réservoir	[m ³]
• T	La température.	[°C]
• Z	Le facteur de compressibilité en fonction du pression.	
• P_{pv}	Puissance de générateur photovoltaïque	[W]
• P_{pac}	Puissance de la pile à combustible	[W]
• P_{ch}	Puissance de la charge	[W]
• P_{bat}	Puissance de la batterie	[W]
• B_j	La consommation électrique journalière	[Wh/j]
• Dt	Duré de fonctionnement de l'appareil	[h]
• $P_{pv/j}$	Puissance journalière du panneau	[W]
• P_c	Puissance crête du panneau	[Wc]
• N_e	Nombre d'heures équivalentes	
• DOD	Taux de décharge maximum des batteries	
• J_{aut}	Nombre de jours d'autonomie	

Liste des figures

Figure 1-1 : Classification des systèmes hybrides.....	2
Figure 1-2 : Différentes critères d'optimisation et logiciel de dimensionnement.....	3
Figure1-3 : Configuration du SEH à bus continu.....	4
Figure1-4 : Configuration du SHE à deux bus à CC et à CA.....	5
Figure 1-5 : Configuration du système hybride à bus alternatif.....	6
Figure 1-6: Le système d'énergie hybride étudié	7
Figure 1-7 : Circuit électrique du hacheur dévolteur.....	9
Figure 1-8: Circuit électrique du hacheur survolteur.....	9
Figure 1-9 : Schéma hacheur série-parallèle.....	10
Figure1-10: Schéma descriptif du principe de fonctionnement PAC.....	10
Figure 2-1: Schéma descriptif du système étudié.....	13
Figure 2-2: Schématisation d'une chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque avec MPPT.....	14
Figure 2-3: Schéma équivalent du modèle à une diode.....	14
Figure 2-4: Caractéristique $P_{pv}=f(V_{pv})$ dans les conditions standards.....	15
Figure 2-5: Caractéristique $I_{pv}=f(V_{pv})$ dans les conditions standards.....	16
Figure 2-6: Influence de l'ensoleillement sur la caractéristique $I_{pv}(V_{pv})$	16
Figure 2-7: Influence de l'ensoleillement sur la caractéristique $P_{pv}(V_{pv})$	16
Figure 2-8: Influence de la température sur la caractéristique $I_{pv}(V_{pv})$	17
Figure 2-9: Influence de la température sur la caractéristique $P_{pv}(V_{pv})$	17
Figure 2-10: Schéma de convergence vers le PPM par la méthode P&O.....	18
Figure 2-11: Organigramme de la méthode perturbation et observation.....	19
Figure 2-12: Schéma de principe d'un convertisseur survolteur.....	19
Figure 2-13: Schéma équivalent d'une PEMFC.....	20
Figure 2-14: Schéma équivalent de la batterie.....	23
Figure 2-15: Schéma équivalent de l'électrolyseur PEM.....	25

Figure 3-1: Schéma descriptif de système photovoltaïque avec batteries.....	27
Figure 3-2: profil de charge.....	30
Figure 3-3: Algorithme de gestion.....	32
Figure 3-4: Schéma bloc du système PV/Batterie.....	32
Figure 3-5: Profil de la température.....	33
Figure 3-6: Profil de l'ensoleillement.....	33
Figure 3-7: Tension des batteries.....	34
Figure 3-8: Allure des puissances(photovoltaïque, batterie, charge).....	34
Figure 3-9: Fonctionnement des interrupteurs K_1 , K_2 et K_3	35
Figure 3-10: Fonctionnement avec les différents modes.....	36
Figure 3-11: Comparaison entre les deux puissances P_{pv} (avant et après les interrupteurs)....	37
Figure 3-12: Comparaison entre la somme des puissances des différentes sources et la puissance de charge.....	37
Figure 3-13: Comparaison entre l'état de charge de la batterie avec et sans MPPT.....	38
Figure 3-14: Zoom1 de l'état de charge.....	38
Figure 3-15: Zoom2 de l'état de charge.....	39
Figure 3-16: Schéma descriptif de système photovoltaïque avec pile à combustible.....	40
Figure 3-17: Algorithme de gestion de puissance du système étudié.....	42
Figure 3-18: Schéma bloc du système PV/PAC.....	42
Figure 3-19: Pression d'hydrogène.....	43
Figure 3-20: Allure des puissances (photovoltaïque, batterie, charge).....	43
Figure 3-21: Fonctionnement des interrupteurs K_1 , K_2 et K_3	44
Figure 3-22: Différents modes dans le cas PV/PAC.....	45
Figure 3-23: Comparaison entre la somme des puissances des différentes sources et la puissance de charge.....	46
Figure 4-1: Structure générale du système proposé.....	47
Figure 4-2 : Les différentes modes de fonctionnement.....	49
Figure 4-3 : Schéma bloc du système hybride PV/PAC/BATTERIES.....	50
Figure 4-4: fonctionnement des interrupteurs K_1, K_2, K_3, K_4 et K_5	52

Figure 4-5: Les différents modes	53
Figure 4-6: Allure de la tension des batteries.....	54
Figure 4-7: L'état de charge des batteries.....	54
Figure 4-8: Allure des différentes puissances de système hybride.....	55
Figure 4-9: comparaison entre la somme des puissances des différentes sources et la charge	55

Liste des tableaux

Tableau 2-1 : Paramètres constants de simulation du GPV.....	15
Tableau 3-1 :Consommation d'énergie journalière pour une maison.....	29
Tableau 3-2 : Caractéristiques du système PV autonome.....	30
Tableau 3-3 : Résultats de dimensionnement.....	30
Tableau 3-4 :L'état des interrupteurs et les différents modes.....	31
Tableau 3-5 :L'état des interrupteurs et les différents modes.....	41
Tableau 4-1 :L'état des interrupteurs et les différentes modes.....	48

Sommaire

Introduction générale.....1

Chapitre 1 : Description du système d'énergie hybride

1.1 Introduction	2
1.2 Généralités sur les systèmes hybrides	2
1.2.1 Définition d'un système hybride	2
1.2.2 Classification des systèmes hybrides	2
1.2.3 Critères d'optimisation et Logiciels pour l'étude des systèmes hybrides	3
1.2.4 Configuration des systèmes d'énergie hybrides (SEH)	3
1.2.4.1 Architecture à bus à courant continu(CC).....	3
1.2.4.2 Architecture mixte à bus à CC/CA	4
1.2.4.3 Architecture à bus à CA	5
1.3 Les différentes structures des systèmes hybrides:	6
1.4 Système hybride étudié (PV/PAC/batteries)	7
1.4.1 Avantage et inconvénient du système	7
1.4.2 Les différents composants du système	8
1.4.2.1 Générateur photovoltaïque	8
1.4.2.1.1 Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque	8
1.4.2.2 Les convertisseurs statiques	8
1.4.2.2.1 Convertisseur DC/AC (Onduleur)	8
1.4.2.2.2 Convertisseur DC/DC (Hacheur).....	8
a) Convertisseur dévolteur (hacheur série)	8
b) Convertisseur survolteur (hacheur parallèle)	9
c) Convertisseur dévolteur-survolteur.....	9
1.4.2.3 Pile à combustible.....	10
1.4.2.3.1 Définition.....	10
1.4.2.3.2 Principe de fonctionnement	10
1.4.2.4 Electrolyseur	10
1.4.2.5 Les batteries	11
1.4.2.5.1 Caractéristiques générales des batteries	11
1.4.2.5.2 Différents types de batterie	11
1.5 Conclusion.....	11

Chapitre2: Modélisation du système hybride PV/PAC/batteries

2.1 Introduction	13
2.2 Description du système étudié	13
2.3 Modélisation de la chaîne de production photovoltaïque	13
2.3.1 Modélisation du GPV	14
2.3.2 Caractéristique $I_{pv}(V_{pv})$ et $P_{pv}(V_{pv})$ dans des conditions STC	15
2.3.2.1 Influence de l'ensoleillement sur les caractéristiques du module photovoltaïque	16
2.3.2.2 Influence de la température sur les caractéristiques du module photovoltaïque	17
2.3.3 Commande du système photovoltaïque au point de puissance maximale	18
2.4 Les convertisseurs CC-CC (hacheurs)	19
2.4.1 Hacheur survolteur	19
2.5 Modélisation de la pile à combustible	20
2.5.1 Polarisation d'activation	21
2.5.2 Polarisation ohmique	22
2.5.3 Polarisation de concentration	22
2.6 Modélisation de la batterie	23
2.6.1 Modélisation de la capacité	23
2.6.2 Equations de la tension de décharge	24
2.6.3 Equation de la tension de charge	24
2.7 Electrolyseur	24
2.8 Modélisation du réservoir d'hydrogène	26
2.9 Conclusion	26

Chapitre 3: Dimensionnement et gestion d'énergie des systèmes PV/batteries et PV/PAC

3.1 Introduction	27
3.2 Système hybride PV/Batterie	27
3.2.1 Description de système photovoltaïque avec stockage par batterie	27
3.2.2 Dimensionnement des composants du système	28
3.2.2.1 Dimensionnement du système PV	28
3.2.2.1.1 Evaluation de la consommation de la charge	28
3.2.2.1.2 Dimensionnement du générateur photovoltaïque	28
3.2.2.2 Dimensionnement d'un système de stockage	29

3.2.2.3 Application pour une charge à usage d'habitation	29
3.2.2.3.1 Profil de consommation	30
3.2.3 Gestion de puissance PV/Batteries.....	31
3.2.4 Simulation du système	32
3.2.4.1 Résultats de simulation pour deux journées :	33
3.3 Système hybride PV/PAC	39
3.3.1 Description du système	39
3.3.2 Dimensionnement des composants du système.....	40
3.3.2.1 Dimensionnement de la pile à combustible	40
3.3.2.2 Dimensionnement du réservoir d'hydrogène	41
3.3.3 Gestion du système PV/PAC	41
3.3.4 Simulation du système	42
3.3.4.1 Résultats de simulation pour deux journées.....	43
3.4 Conclusion.....	46

Chapitre 4 : Dimensionnement et gestion du système hybride PV/PAC/batteries

4.1 Introduction	47
4.2 Description du système étudié	47
4.3 Simulation du système :.....	50
4.3.1 Les résultats de simulation :.....	50
4.4 Conclusion.....	56
Conclusion générale.....	57
Références bibliographiques	58

Introduction générale

Les énergies renouvelables apparaissent de plus en plus une des solutions alternatives d'avenir en raison de raréfaction des ressources fossiles, mais certaines énergies renouvelables ne peuvent pas satisfaire les besoins de la société en raison de leur dépendance météorologiques et donc la solution la plus favorable est la combinaison de plusieurs sources autrement dit les systèmes multi-sources ou systèmes hybrides.

Les solutions technologiques nouvelles proposées par les générateurs hybrides, même si elles sont très complexes comparativement aux solutions courantes mono sources elles présentent un intérêt évident par leur flexibilité incomparable par rapport aux solutions mono sources. Cependant, ces solutions exigent au préalable un dimensionnement laborieux basé sur une connaissance approfondie du gisement en énergies renouvelables du site d'implémentation en amont, une gestion rigoureuse de l'énergie électrique produite en aval.[1]

Dans ce contexte, le travail présenté dans ce mémoire est une contribution pour une meilleure intégration des sources d'énergie renouvelables dans un système à énergie hybride (SEH). Notre travail sera réparti en quatre chapitres :

Dans le premier chapitre nous donnons une description générale des systèmes à énergie hybride (SEH), ainsi que des notions sur les différentes sources constituant le système à étudier. Il est composé d'un générateur photovoltaïque, d'une pile à combustible, d'un électrolyseur et des batteries de stockage.

Le deuxième chapitre est consacré à la modélisation du système à énergie hybride étudié. Il s'agit de représenter chaque constituant par son modèle mathématique.

Dans le chapitre trois on a préféré diviser le travail en deux parties. Nous étudierons pour le même dimensionnement de générateur photovoltaïque et la même charge deux systèmes différents. Le premier consiste à étudier un système hybride photovoltaïque avec batteries et le deuxième un système hybride photovoltaïque avec une pile à combustible.

L'étude a été faite en utilisant le logiciel Matlab/simulink, et les résultats obtenus sont présentés et discutés.

Dans le chapitre quatre, on va faire une gestion de système hybride PV/PAC/batteries sous Matlab/Simulink, tout en tenant compte du dimensionnement du générateur photovoltaïque et de la charge fait auparavant. Un système de gestion de puissance (SGP) est proposé. Il tient compte de tous les paramètres qui peuvent influencer la charge sous différentes conditions météorologiques. Afin de tester la faisabilité de ce SGP, nous faisons une application dans le site de Bejaia et sur deux jours différents: une journée d'été avec un fort ensoleillement et une journée d'hiver avec un faible ensoleillement.

On termine ce travail par une conclusion générale et quelques perspectives afin d'améliorer cette contribution.

1.1 Introduction

Les systèmes d'énergies hybrides sont parmi les systèmes les plus prometteurs pour l'utilisation des énergies renouvelables. Le terme système d'énergie hybride fait allusion aux systèmes de génération d'énergie électrique utilisant plusieurs types de sources. La combinaison des sources d'énergie renouvelable comme l'éolienne, l'énergie photovoltaïque ou les petites centrales hydroélectriques peut constituer un complément ou une alternative aux groupes électrogènes diesel utilisés généralement pour produire l'électricité dans les régions isolées. [2]

Les systèmes d'énergie hybride sont généralement conçus pour répondre à un besoin énergétique allant du simple éclairage jusqu'à l'électrification complète de villages ou de petites îles.

1.2 Généralités sur les systèmes hybrides

1.2.1 Définition d'un système hybride

Un système hybride (multi-sources) est composé d'au moins deux sources énergétiques reliées au bus par des convertisseurs, permettant de contrôler la tension et le courant fournis par chacune des différentes sources. [3]

Le but d'un SEH est d'assurer l'énergie demandée par la charge et, si possible, de produire le maximum d'énergie à partir des sources d'énergie renouvelable, tout en fournissant une bonne qualité.

1.2.2 Classification des systèmes hybrides

Plusieurs classifications de systèmes hybrides sont réalisées selon différents critères, Une généralisation des classifications les plus répandues [2] sont illustrée sur la Figure (1-1) ci-dessous.

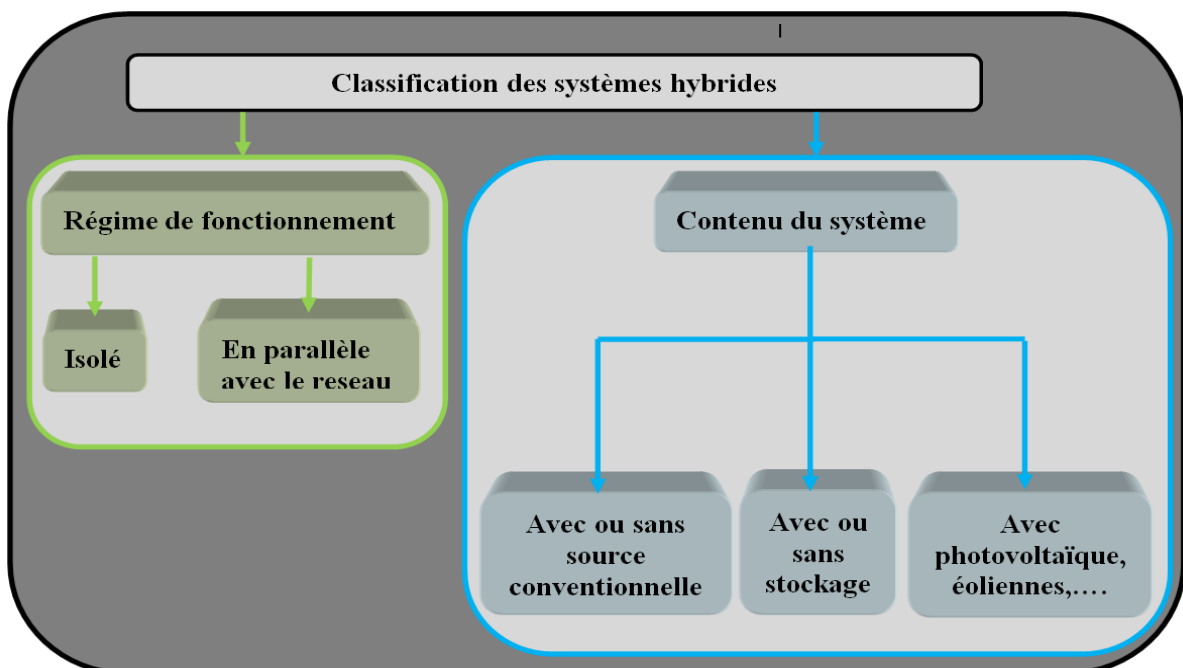


Figure 1-1 : Classification des systèmes hybrides

1.2.3 Critères d'optimisation et Logiciels pour l'étude des systèmes hybrides

Il existe plusieurs logiciels de dimensionnement parmi lesquels les plus connus sont présentés dans la figure (1-2) ci-dessous.

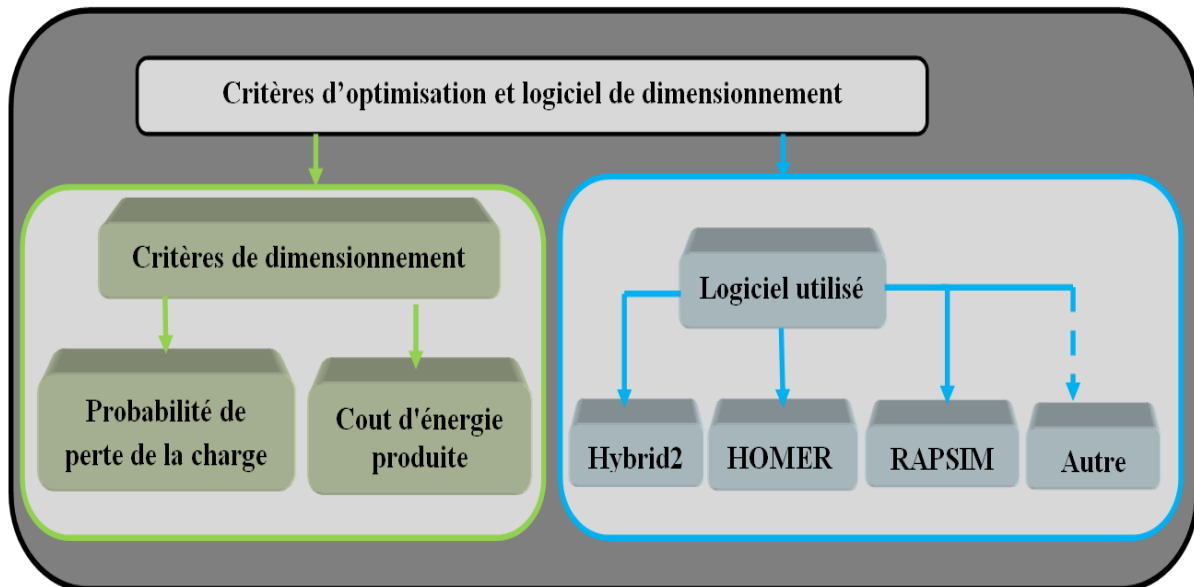


Figure 1-2 : Différentes critères d'optimisation et logiciel de dimensionnement

1.2.4 Configuration des systèmes d'énergie hybrides (SEH)

Les générateurs électriques d'un SEH peuvent être connectés en différentes configurations. Ces configurations constituées par des sources d'énergies renouvelables, systèmes de stockage et des générateurs diesels se résument en trois types [4], [6]:

- ❖ Architecteur à bus à CC [6]
- ❖ Architecteur à bus CC-CA (la connexion et mixte, bus à CC et bus à CA)[4]
- ❖ Architecteur à bus à CA [6]

Nous présentons ci-après, une description ainsi que les avantages et les inconvénients de chaque configuration.

1.2.4.1 Architecture à bus à courant continu(CC)

Dans le système hybride présenté dans la figure (1-3), la puissance fournie par chaque source est centralisée sur un bus à CC. Ainsi, les systèmes de conversion d'énergie à CA fournissent d'abord leur puissance à un redresseur pour être convertie en 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.

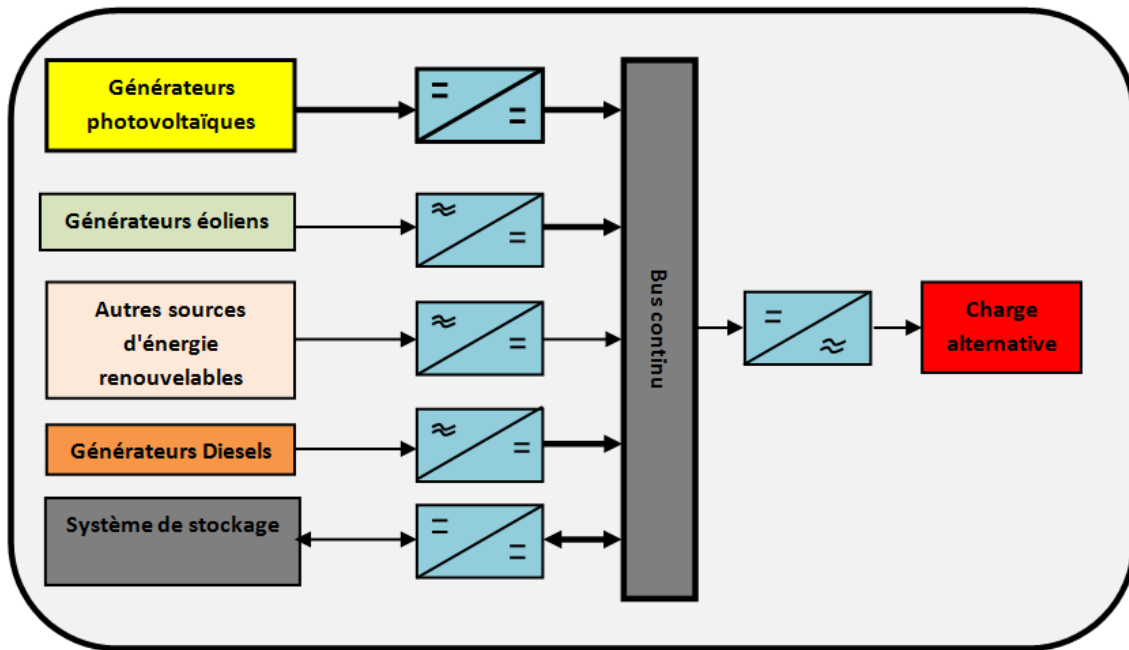


Figure1-3 : Configuration du SEH à bus continu.

Avantages:

- ❖ La connexion de toutes les sources à un bus à CC simplifie le système de commande.
- ❖ Le panneau photovoltaïque peut être dimensionné de façon optimale, c'est-à-dire de sorte à fonctionner à puissance maximale pendant la demande en puissance.

Inconvénients :

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

1.2.4.2 Architecture mixte à bus à CC/CA

La configuration à deux bus, à CC et à CA, est présentée dans la figure (1-4). Celle-ci a des performances supérieures par rapport à la configuration antérieure. Dans cette configuration les sources d'énergies peuvent alimenter une partie de la charge à CA directement, ce qui permet d'augmenter le rendement du système et de réduire la puissance nominale de l'onduleur. Les convertisseurs situés entre les deux bus (le redresseur et l'onduleur) peuvent être remplacés par un convertisseur bidirectionnel, qui est en fonctionnement normal, réalise la conversion CC/CA (fonctionnement onduleur).

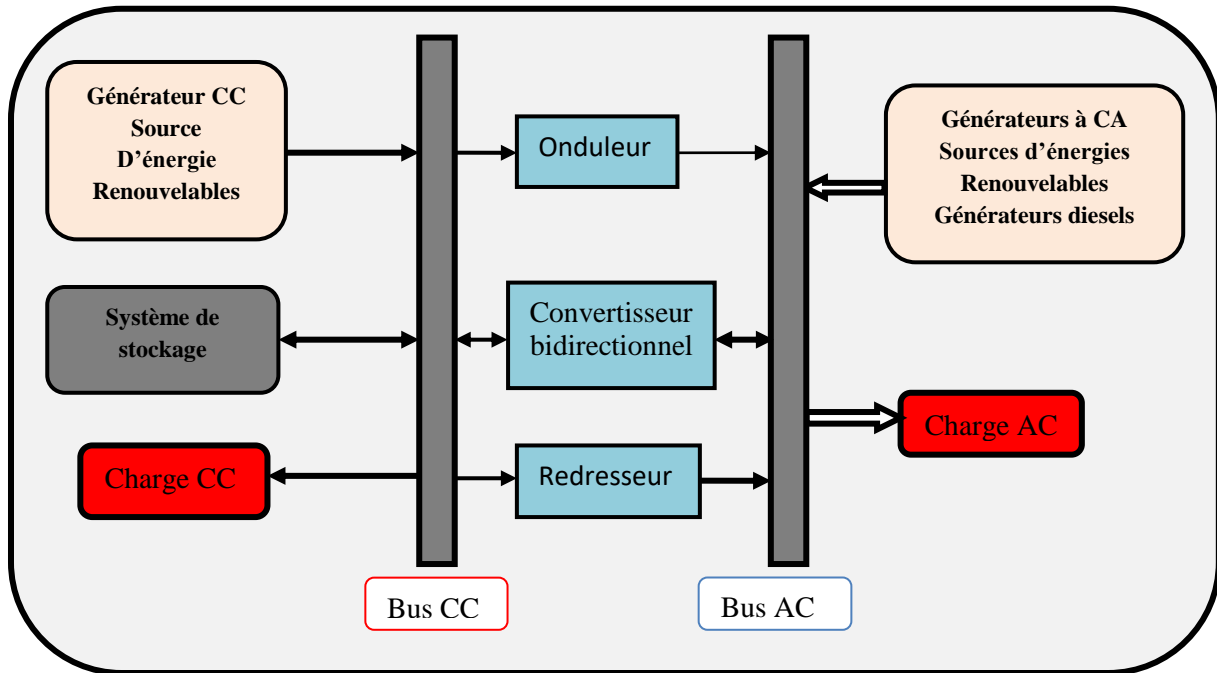


Figure1-4 : Configuration du SHE à deux bus à CC et à CA

Avantages:

- ❖ Quand le niveau de la charge est bas, l'un ou l'autre peut générer le nécessaire d'énergie. Cependant, les deux sources peuvent fonctionner en parallèle pendant les pics de charge.
- ❖ La possibilité de réduire la puissance nominale de l'onduleur sans affecter la capacité du système d'alimenter les pics de charge.

Inconvénients :

- ❖ La réalisation de ce système est relativement compliquée à cause du fonctionnement parallèle (l'onduleur doit être capable de fonctionner en autonome et non-autonome en synchronisant les tensions en sortie avec les tensions de sortie du générateur CA).

1.2.4.3 Architecture à bus à CA

Toutes les sources de productions sont reliées au bus CA via des convertisseurs sauf le générateur diesel qui peut fixer la fréquence de bus. Un couplage de tous les consommateurs et de tous les générateur du coté CA permet désormais de réaliser des systèmes flexibles, il est possible d'intégrer différentes sources énergétique, aussi bien renouvelable que conventionnelles.

Avantages

- ❖ Un découplage des différentes sources de production, ce qui permet d'agir de façon assez indépendante les unes sur les autres ;
- ❖ Le générateur diesel peut fixer la tension et la fréquence de bus AC ;

Inconvénients

- ❖ Le rendement de l'ensemble du système est faible, parce qu'une certaine quantité d'énergie est perdue à cause des batteries et des pertes dans les convertisseurs ;

- ❖ La connexion de toutes les sources sur un bus à CA complique le système de commande.

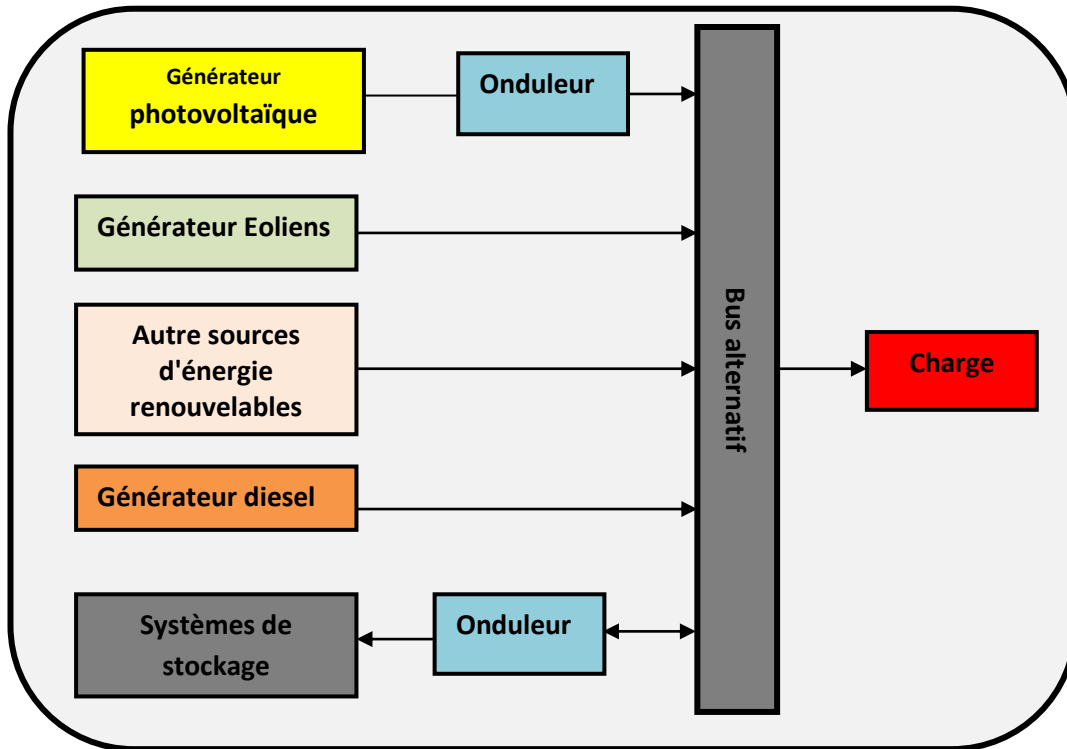


Figure 1-5 : configuration du système hybride à bus alternatif

1.3 Les différentes structures des systèmes hybrides:

Le système hybride de production d'énergie, de façon générale, est celui qui combine et exploite plusieurs sources disponibles. Dans ce qui suit nous allons citer les différentes combinaisons des systèmes hybrides : [5]

- ❖ Système hybride photovoltaïque/éolien/groupe électrogène;
- ❖ Système hybride photovoltaïque/groupe électrogène;
- ❖ Systèmes éolien/source conventionnelle;
- ❖ Système hybride photovoltaïque/éolien/stockage;
- ❖ Système hybride photovoltaïque/pile à combustible/stockage.

Dans le but d'exploiter la complémentarité existante entre les potentiels énergétiques solaire et hydrogène, il est préférable d'opter pour un système hybride composé du photovoltaïque, d'une pile à combustible et des batteries. Cependant, cette combinaison permet d'une part, de réduire les besoins de stockage et d'atténuer les fluctuations de la production causées par la nature aléatoire de ces ressources et, d'autre part, de constituer un complément ou une alternative aux groupes électrogènes diesel utilisés généralement pour la génération d'énergie électrique dans les régions isolées.

Ce système hybride fonctionne surtout en mode autonome dans des sites où l'approvisionnement en carburant diesel ou le raccordement au réseau électrique est difficile, voire même impossible.

1.4 Système hybride étudié (PV/PAC/batteries)

L'objectif est d'alimenter une charge à usage domestique sur un site donné avec une énergie issue de la combinaison du photovoltaïque et d'une pile à combustible. Le problème est de trouver un équilibre entre l'apport énergétique de chaque source d'énergie, le rayonnement solaire, le débit d'hydrogène, et la demande (type de charge) qui varie en fonction du temps de la journée, de la saison et de l'année. L'équilibre entre l'apport énergétique et la demande n'est pas toujours possible. Ce manque sera compensé par l'introduction du stockage électrochimique dans le système. Le système d'énergie hybride étudié dans notre travail sera composé d'un générateur photovoltaïque, d'une pile à combustible, d'un électrolyseur d'eau, d'un réservoir de stockage d'hydrogène, d'un dispositif de stockage (batterie), et d'une charge. Le système qu'on va étudier est résumé dans la figure (1-6) ci-dessous. [21]

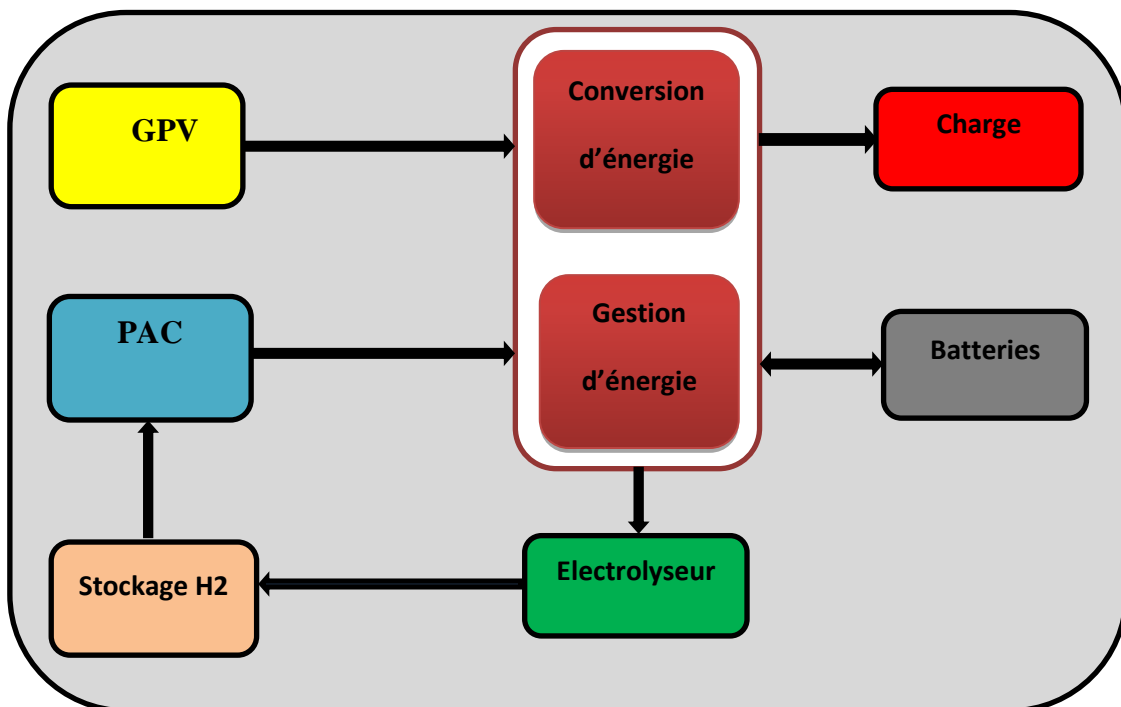


Figure 1-6: Le système d'énergie hybride étudié

1.4.1 Avantage et inconvénient du système

Avantages

- ❖ Capable de satisfaire des charges évolutives;
- ❖ Production d'une énergie propre;
- ❖ Non dépendant d'une seule source d'énergie.

Inconvénients

- ❖ Coût de réalisation élevé;
- ❖ Complexité de système par rapport à d'autres systèmes.

1.4.2 Les différents composants du système

1.4.2.1 Générateur photovoltaïque

C'est un système complet assurant la production et la gestion de l'électricité fournie par les capteurs photovoltaïques. L'énergie est stockée dans des accumulateurs et/ou transformée en courant alternatif suivant le type d'application.

1.4.2.1.1 Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque

Les avantages et les inconvénients de l'énergie photovoltaïque les plus importants sont :

Avantages

- ❖ Energie indépendante, le combustible (le rayonnement solaire) est renouvelable et gratuit.
- ❖ L'énergie photovoltaïque est une énergie propre et non-polluante. Aucun bruit.

Inconvénients :

- ❖ Les rendements des panneaux photovoltaïques sont encore faibles.
- ❖ Nécessite un système d'appoint (batteries) pour les installations domestiques.
- ❖ Le coût d'investissement sur une installation photovoltaïque est cher.

1.4.2.2 Les convertisseurs statiques

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

1.4.2.2.1 Convertisseur DC/AC (Onduleur)

La fonction principale de l'onduleur est de transformer le courant continu, produit par le générateur solaire, en courant alternatif monophasé ou triphasé. Un onduleur est habituellement conçu pour fonctionner sur une plage assez réduite. Il est très efficace pour des caractéristiques d'entrées et de sortie fixe. Son coût assez élevé et la nature variable de l'ensoleillement et du couple résistant des pompes en générale ont longtemps exclu l'emploi des moteurs à courant alternatif pour le pompage solaire. [16]

1.4.2.2.2 Convertisseur DC/DC (Hacheur)

Les convertisseurs continu-continu ont pour fonction de fournir une tension continue variable à partir d'une tension continue fixe. La tension continue de départ peut être un panneau photovoltaïque ou une batterie d'accumulateurs.

On distingue trois types de convertisseurs continu-continu :

a) Convertisseur dévolteur (hacheur série)

Ce convertisseur permet de convertir une tension continue en une tension continue d'une faible valeur, c'est un abaisseur de tension. [14]

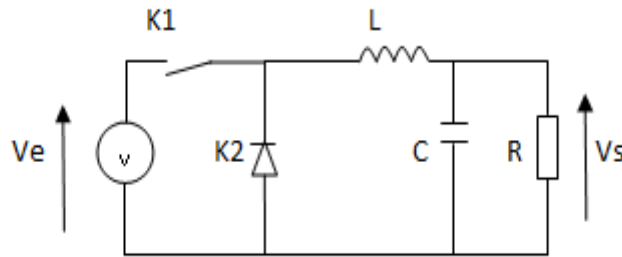


Figure 1-7 : Circuit électrique du hacheur dévolteur.

Fonctionnement

Le cycle de fonctionnement, de période de hachage T ($T=1/f$), comporte deux étapes :

- ❖ Lors de la première étape, l'interrupteur K_1 passant et la diode, polarisée en inverse, est bloquée. Cette phase dure de 0 à αT , avec α compris entre 0 et 1 . α est appelé rapport cyclique.
- ❖ Lors de la seconde étape, l'interrupteur K_1 est bloqué. La diode devient passante. Cette phase dure de αT à T .

b) Convertisseur survolteur (hacheur parallèle) [15]

Un convertisseur survolteur (Boost) permet de convertir une tension d'entrée continue en une autre tension continue aussi en sortie mais de valeur supérieure à celle de l'entrée. C'est pour cela qu'il est dit élévateur de tension.

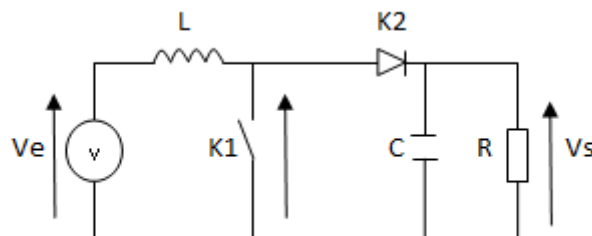


Figure 1-8: Circuit électrique du hacheur survolteur [19]

Fonctionnement

- ❖ Lors de la première partie du cycle de fonctionnement, de 0 à $\alpha.T$, l'interrupteur commandé est fermé (passant). Cette fois, la source et la charge ne sont pas en contact durant cette phase. La diode est alors bloquée.
- ❖ Lors de la seconde partie du cycle, de $\alpha.T$ à T , on ouvre l'interrupteur commandé et la diode devient passante. C'est alors que la source et la charge sont reliées. [17]

c) Convertisseur dévolteur-survolteur

Dans ce dispositif, la tension peut être augmentée ou diminuée selon le mode de commutation. Cependant, La tension de sortie est de signe opposé à la tension d'entrée. Tandis que, lorsque l'interrupteur K_1 est sur la position (on) le courant dans l'inductance

augmente, l'énergie est stockée ; et quand l'interrupteur tourne sur la position (off). La tension à travers l'inductance est renversée et l'énergie stockée se transfère vers la charge via la diode. [18]

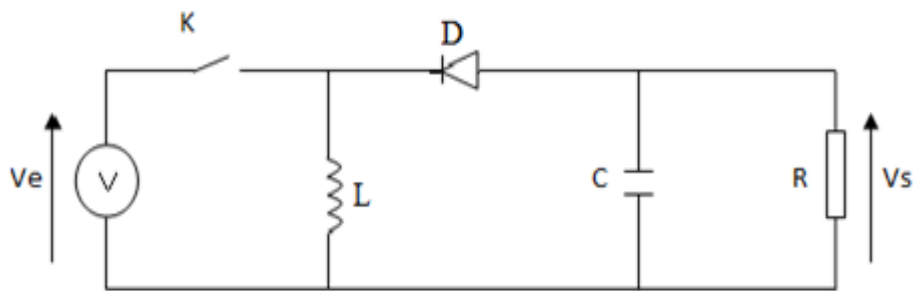


Figure 1-9 : Schéma hacheur série-parallèle.

1.4.2.3 Pile à combustible

1.4.2.3.1 Définition

Une pile à combustible est un générateur électrochimique d'énergie permettant de transformer directement l'énergie chimique d'un combustible (hydrogène) en énergie électrique sans passer par l'énergie thermique.[20]

1.4.2.3.2 Principe de fonctionnement

La pile à combustible fonctionne sur le mode inverse de l'électrolyse de l'eau. Ici, on supprime la source de tension, on alimente en hydrogène et oxygène et on constate l'apparition d'une tension électrique entre les deux électrodes; le dispositif est devenu un générateur électrique qui fonctionnera aussi longtemps qu'il sera alimenté. Pour cela elle est constituée de deux électrodes (anode et cathode) séparées par un électrolyte, matériau qui bloque le passage des électrons mais laisse circuler les ions.

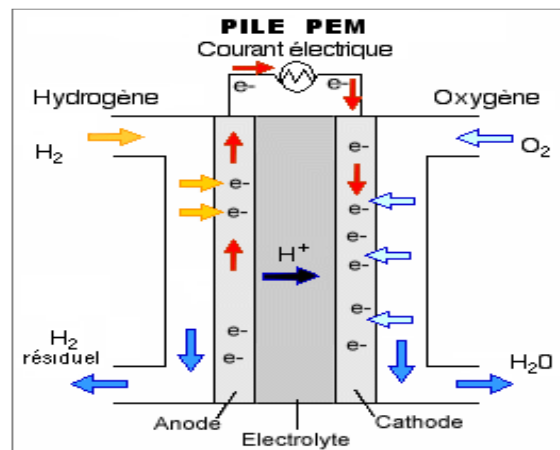


Figure1-10: Schéma descriptif du principe de fonctionnement PAC. [20]

1.4.2.4 Electrolyseur

Une molécule est un assemblage d'au moins deux atomes identiques ou différents, unis par des liens chimiques. Grâce à sa formule on sait que la molécule d'eau est composée

de deux atomes d'hydrogène et d'un atome d'oxygène. Contrairement aux atomes, les molécules sont divisibles; il est possible de séparer les atomes qui composent une molécule, en brisant les liens chimiques qui les unissent c'est ce qui se produit lorsqu'on fait passer un courant électrique dans l'eau, ce procédé s'appelle l'électrolyse de l'eau.

Au cours de ce processus les gaz, hydrogène et oxygène sont libérés sous forme de dihydrogène (H_2) et dioxygène (O_2) ce qui correspond aux deux constituants de la molécule d'eau. [22]

1.4.2.5 Les batteries [19]

Les batteries sont souvent intégrées au générateur photovoltaïque, elles permettent le stockage de l'électricité pour les systèmes isolés, et restituent la nuit ou les journées nuageuses cette électricité accumulée durant la journée. Il existe différents types de batteries.

1.4.2.5.1 Caractéristiques générales des batteries

Les accumulateurs destinés aux installations photovoltaïques doivent avoir les qualités suivantes :

- ❖ être robustes;
- ❖ avoir un bon rendement de charge et de décharge;
- ❖ avoir une faible résistance interne;
- ❖ avoir un taux d'autodécharge faible;
- ❖ Maintenance réduite;
- ❖ posséder une grande réserve d'électrolyte;
- ❖ avoir une durée de vie importante.

1.4.2.5.2 Différents types de batterie

- ❖ La batterie plomb acide;
- ❖ La batterie nickel cadmium;
- ❖ La batterie sodium chlorure de nickel;
- ❖ La batterie lithium-ion;
- ❖ La batterie zinc air.

Dans ce travail, notre choix se porte sur les batteries plomb acide vu aux avantages qu'elles présentent:

- ❖ Prix qui revient moins cher que les autres types de batteries;
- ❖ Elles sont solides;
- ❖ Capable de fournir des courants élevés.

1.5 Conclusion

L'objectif de ce travail est d'étudier un système hybride destiné à alimenter une charge variable dans l'habitat. Il est constitué essentiellement de panneaux photovoltaïques, d'une pile à combustible et de batteries de stockage. Un état de l'art de ces différents éléments a été fait dans ce chapitre afin de comprendre leur fonctionnement. L'étape qui suivra sera le dimensionnement du système à étudier, une étape importante, pour chiffrer les éléments de

l'installation. Puis viendra l'étape de modélisation en vue d'une simulation sous Matlab/simulink.

2.1 Introduction

Après avoir étudié et cité les différents composants du système à étudier, nous procédons à la modélisation de ce dernier, ce qui nécessite un ensemble d'équations caractérisant chaque élément du système. L'objectif de cette modélisation consiste à obtenir par simulation, les caractéristiques dynamiques du panneau photovoltaïque, la batterie et la pile à combustible.

2.2 Description du système étudié

Le système hybride étudié utilise deux sources d'énergie: photovoltaïque, pile à combustible et un système de stockage (batterie). Dans ce système, le champ photovoltaïque alimente la charge. L'excès énergétique est stocké dans la batterie et dans l'électrolyseur. Quand la puissance photovoltaïque ne peut pas fournir la totalité de la demande d'électricité, la batterie et la pile à combustible sont connectées.

La figure ci-dessous montre le schéma général du système étudié.

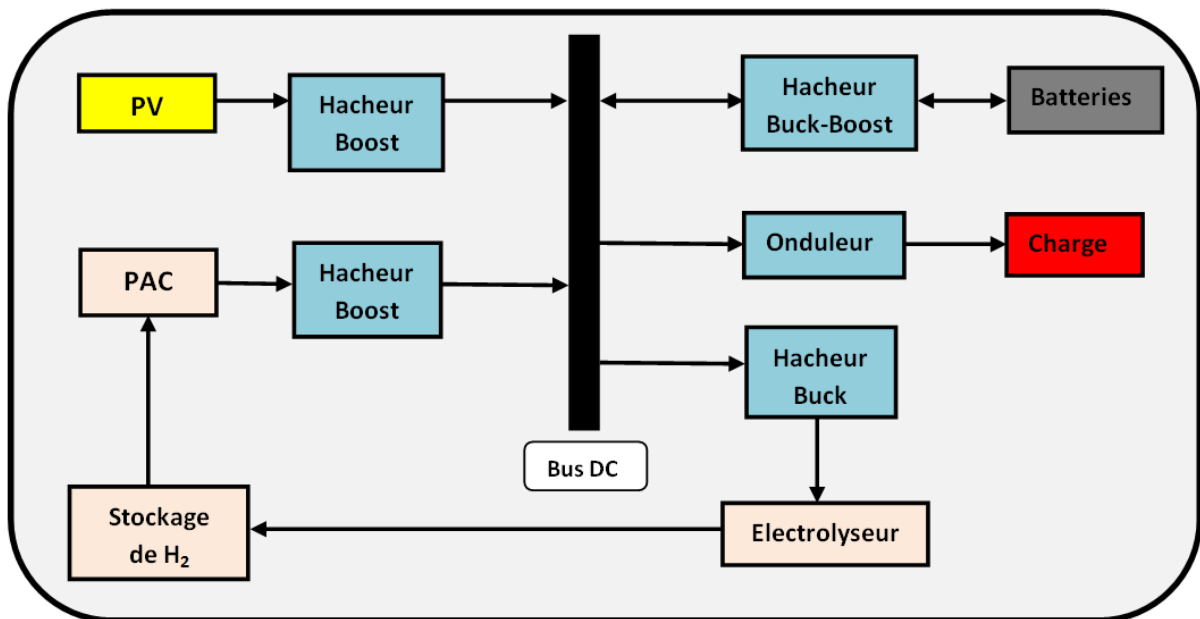


Figure 2-1: Schéma descriptif du système étudié.

2.3 Modélisation de la chaîne de production photovoltaïque

Une connexion directe du panneau à la charge ne permet pas de le faire fonctionner à sa tension optimale (puissance maximale). Cela nécessite une adaptation entre la source photovoltaïque et la charge avec une commande MPPT pour le fonctionnement en maximum de puissance (figure 2-2).

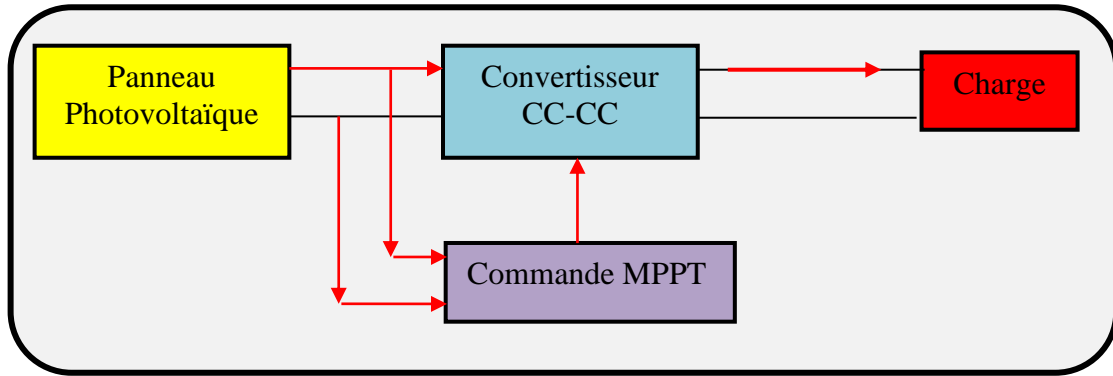


Figure 2-2: Schématisation d'une chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque avec MPPT.

2.3.1 Modélisation du GPV [7]

Dans le cadre de l'optimisation du générateur photovoltaïque et pour mieux utiliser l'énergie soutirée, on doit adapter la caractéristique non linéaire I-V du générateur photovoltaïque au point de fonctionnement de la charge utilisée. Pour avoir le point optimal qui correspond au point de la puissance maximale, il est évident de modéliser le générateur photovoltaïque.

La figure (2-3) montre le modèle du circuit électrique de la cellule PV

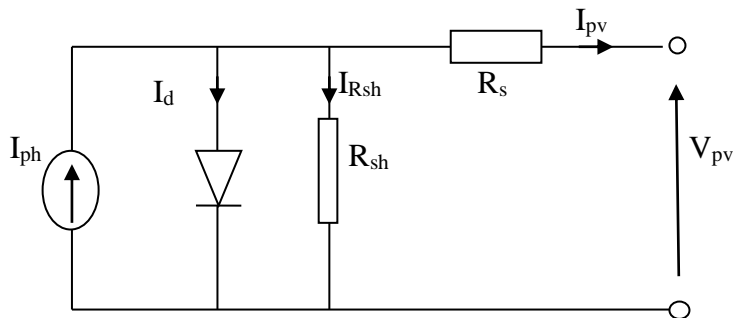


Figure 2-3: Schéma équivalent du modèle à une diode.

A partir du schéma le courant généré par le générateur photovoltaïque est donné par la loi de KIRCHHOFF :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d - I_{Rsh} \dots \dots \dots (2.1)$$

$$I_{ph} = P_1 * E_s \left(1 + P_2(E_s - E_{sref}) + P_3(T_j - T_{jref}) \right) \dots \dots \dots (2.2)$$

E_{sref} , T_{jref} : représentent respectivement l'éclairement et la température sous conditions standards(STC).

T_j : température de jonction.

P_1 , P_2 , P_3 : paramètres constants.

$$I_d = I_{sat} \left[\exp \left(\frac{q}{K.A.n_s.T_j} (V + R_s I) \right) - 1 \right] \dots \dots \dots (2.3)$$

Avec :

I_{sat} : courant inverse de saturation de la diode.

q : Charge élémentaire ($1.6 \cdot 10^{-19}$ C).
 K : constante de Boltzmann ($1.38 \cdot 10^{-23}$ j/k).
 A : coefficient d'idéalité de la cellule.
 ns : nombre de cellules connectées en série.

$$I_{sat} = P_4 \cdot T_j^3 \cdot \exp\left(\frac{E_g}{K \cdot T_j}\right) \dots \dots \dots (2.4)$$

E_g : énergie de gap.
 P_4 : paramètre constant.

$$I_{Rsh} = \frac{V}{R_{sh}} \dots \dots \dots (2.5)$$

Ainsi l'équation globale modélisant le générateur PV est la suivante:

$$I_{pv} = P_1 \cdot E_s \left(1 + P_2(E_s - E_{sref}) + P_3(T_j - T_{ref}) \right) - P_4 \cdot T_j^3 \cdot \exp\left(\frac{E_g}{K \cdot T_j}\right) \cdot \left[\exp\left(\frac{q}{K \cdot A \cdot n_s \cdot T_j} (V - r_s I)\right) - 1 \right] \cdot \frac{V}{R_{sh}} \dots \dots \dots (2.6)$$

P_1, P_2, P_3, P_4 sont des paramètres constants.

P_1	P_2	P_3	P_4	A	R_{sh}	R_s	E_g
0.005	$7.27 \cdot 10^{-5}$	$-1.1369 \cdot 10^{-5}$	38.8	1	601	0.46	$1.76 \cdot 10^{-19}$

Tableau 2-1 : Paramètres constants de simulation du GPV.

2.3.2 Caractéristique $I_{pv}(V_{pv})$ et $P_{pv}(V_{pv})$ dans des conditions STC

Nous allons étudier le comportement de notre panneau photovoltaïque dans les conditions standards de fonctionnement à ensoleillement $E_{sref} = 1000W/m^2$ et à température $T_{jref} = 25C^\circ$

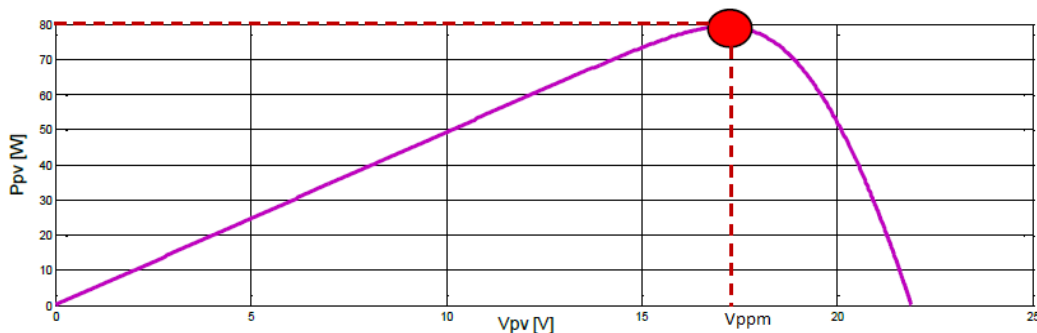


Figure 2-4:Caractéristique $P_{pv}=f(V_{pv})$ dans les conditions standards.

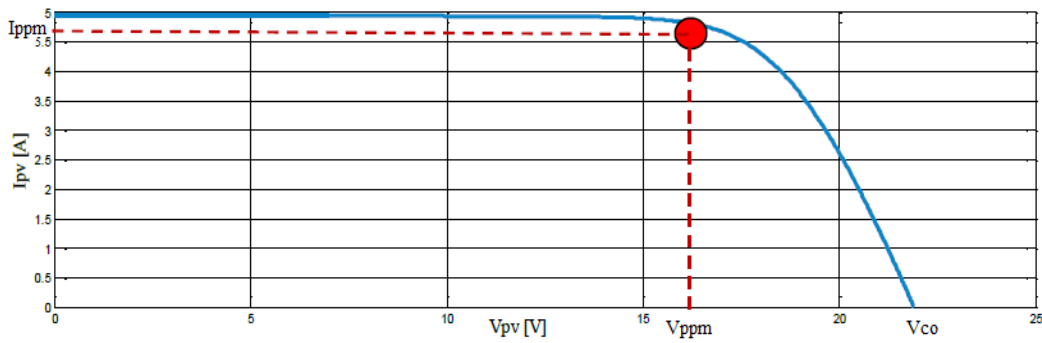


Figure 2-5: Caractéristique $I_{pv}=f(V_{pv})$ dans les conditions standards.

2.3.2.1 Influence de l'ensoleillement sur les caractéristiques du module photovoltaïque

Dans ce qui suit, les simulations ont été faites pour différentes valeurs d'ensoleillement ($E_s=300, 500, 700, 1000\text{w/m}^2$) en maintenant la température constante $T_{jref}=25^\circ\text{C}$. Pour chaque ensoleillement nous déterminons la caractéristique courant/tension (Figure 2-6) ainsi que pour la caractéristique puissance/tension (Figure 2.7).

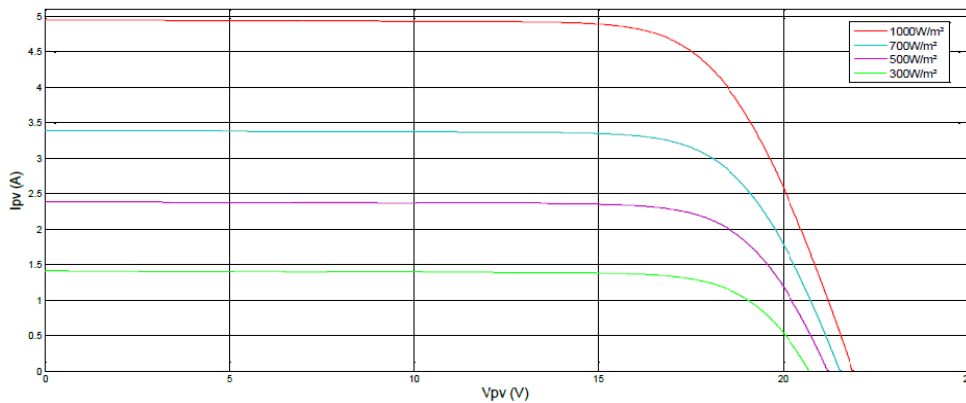


Figure 2-6: Influence de l'ensoleillement sur la caractéristique $I_{pv}(V_{pv})$.

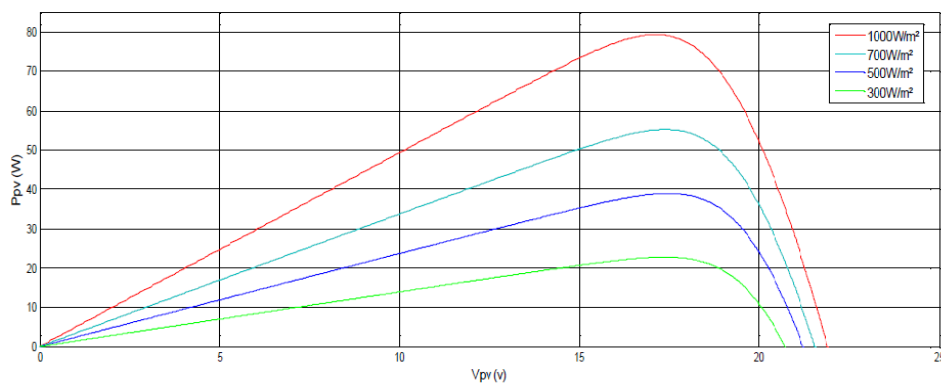


Figure 2-7: Influence de l'ensoleillement sur la caractéristique $P_{pv}(V_{pv})$

Les conclusions tirées de cette variation sont les suivantes:

- ❖ Le courant de circuit-ouvert I_{co} et la puissance varie proportionnellement à l'ensoleillement G .
- ❖ La tension à vide V_{co} varie peu avec l'ensoleillement pouvant être considérée comme une constante pour une installation donnée.

2.3.2.2 Influence de la température sur les caractéristiques du module photovoltaïque

Nous allons effectuer d'autres tests, mais cette fois ci en faisant varier la valeur de la température ambiante ($T_j=25, 40, 55, 70$ °C). Nous obtenons les courbes suivantes.

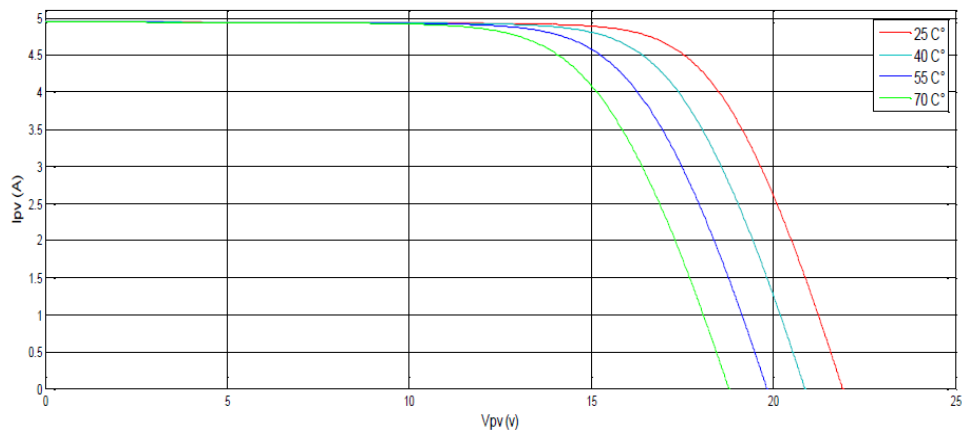


Figure 2-8: Influence de la température sur la caractéristique $I_{pv}(V_{pv})$

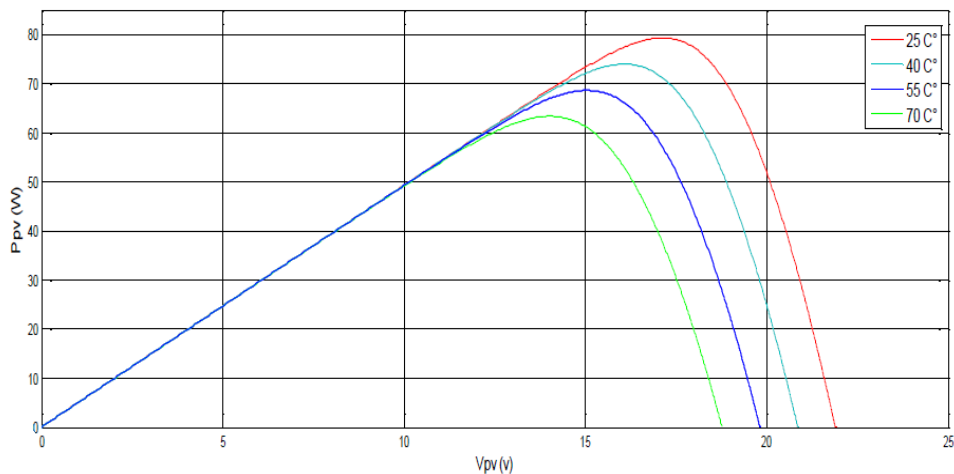


Figure 2-9: Influence de la température sur la caractéristique $P_{pv}(V_{pv})$

Les conclusions tirées de cette variation sont les suivantes:

- ❖ En faisant varier la température de 25°C à 70°C, nous remarquons que le courant de court-circuit I_{cc} et la puissance P_{pv} est presque dépendant de la température.
- ❖ En revanche, la tension de circuit ouvert V_{co} diminue lorsque la température augmente.

2.3.3 Commande du système photovoltaïque au point de puissance maximale

Dans cette partie, nous présenterons les méthodes de poursuite de la puissance maximale délivrée par le générateur photovoltaïque.

1. Les méthodes indirectes

- ❖ La méthode d'ajustement de courbe ;
- ❖ La méthode("look-up table") ;
- ❖ La méthode de la tension de circuit ouvert ;
- ❖ La méthode de court-circuit.

2. Les méthodes directes

- ❖ La méthode perturbation et observation (PO) ;
- ❖ L'incrément de conductance ;
- ❖ Algorithme basé sur le mode glissant ;
- ❖ Algorithme basé sur la logique floue ;
- ❖ Algorithme basé sur les réseaux neurones.

Parmi ces méthodes, on a préféré d'utiliser la méthode perturbation et observation parce qu'elle est simple et exige seulement des mesures de tension et du courant du panneau photovoltaïque V_{pv} et I_{pv} respectivement, elle peut dépister le point maximum de puissance même lors des variations de l'éclairement et la température.

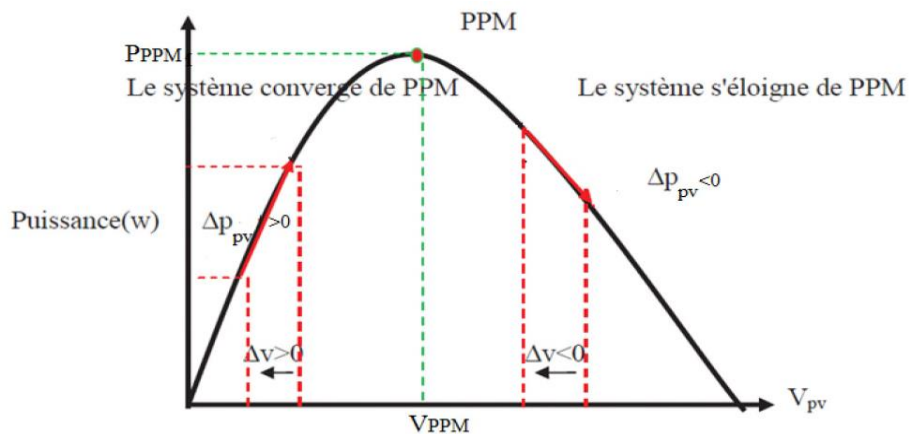


Figure 2-10: Schéma de convergence vers le PPM par la méthode P&O.[8]

Un organigramme de fonctionnement de cette méthode est montré dans la figure (2-11)

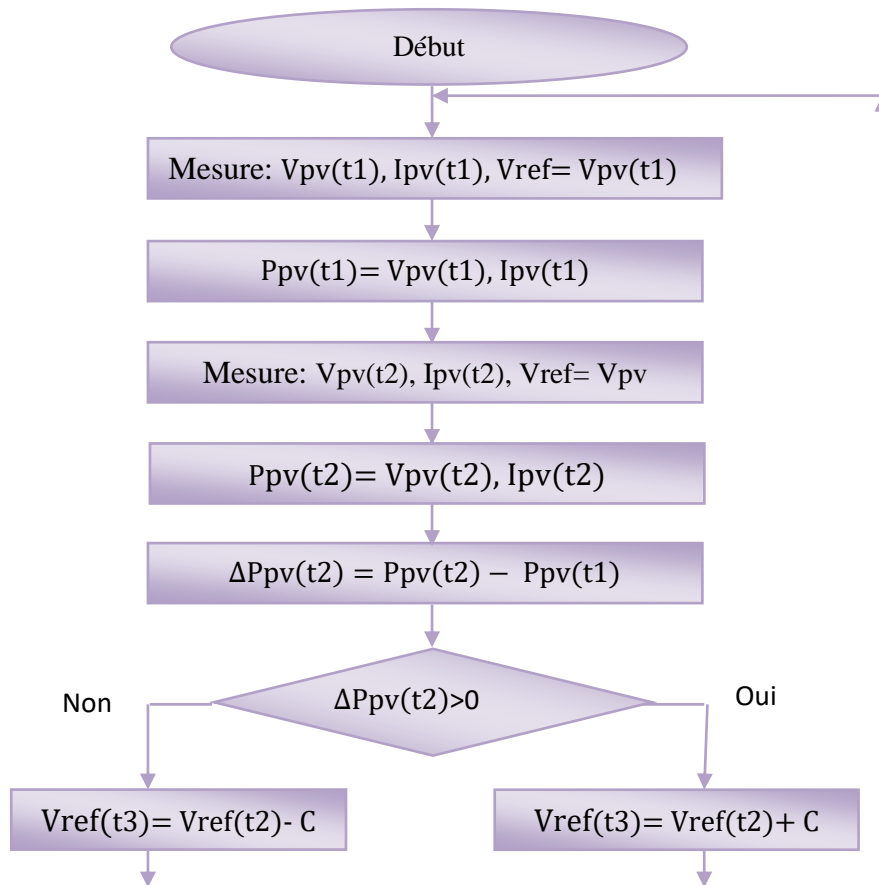


Figure 2-11: organigramme de la méthode perturbation et observation.

Les avantages de cette méthode sont: la connaissance des caractéristiques de générateur photovoltaïque n'est pas exigée, c'est une méthode simple. Néanmoins, en régime permanent, le point de fonctionnement oscille autour du MPP, provoquant ainsi une perte d'énergie. [8]

2.4 Les convertisseurs CC-CC (hacheurs)

2.4.1 Hacheur survolteur[9]

Connu aussi sous le nom de « Boost » ou hacheur parallèle ; son schéma de principe de base est celui de la figure (2-12). Son application typique est de convertir sa tension d'entrée en une tension de sortie supérieure.

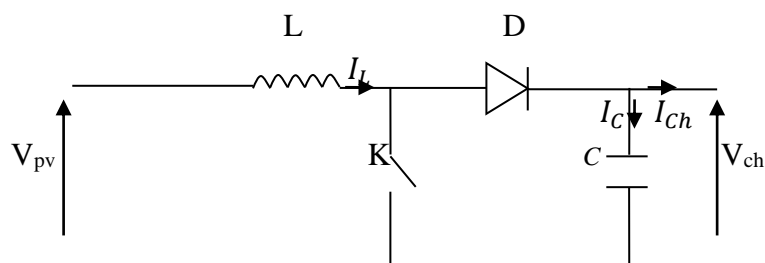


Figure 2-12: Schéma de principe d'un convertisseur survolteur.

Ce dispositif électronique de puissance qui est un convertisseur continu-continu, nous permet d'adapter la tension aux bornes du panneau photovoltaïque à partir d'une stratégie de commande permettant un fonctionnement au point de puissance maximale.

D'après la figure du hacheur survolteur:

Lorsque l'interrupteur (K) est fermé:

$$V_{pv} = L \frac{dI_L}{dt} \dots \dots \dots (2.7)$$

$$0 = C \frac{dV_{ch}}{dt} + I_{ch} \dots \dots \dots (2.8)$$

Lorsque l'interrupteur (K) est ouvert:

$$V_{pv} = L \frac{dI_L}{dt} + V_{ch} \dots \dots \dots (2.9)$$

$$I_L = C \frac{dV_{ch}}{dt} + I_{ch} \dots \dots \dots (2.10)$$

Nous pouvons représenter le convertisseur par un système d'équations unique. En valeurs moyennes, la tension de sortie est en fonction de la tension d'entrée et du rapport cyclique α . Son expression est donnée par l'équation. La régulation de la tension de sortie se fait alors en contrôlant le rapport cyclique α .

$$V_{ch\ moy} = \frac{1}{1-\alpha} V_{pv} \dots \dots \dots (2.11)$$

$$I_{ch\ moy} = (1 - \alpha) I_L \dots \dots \dots (2.12)$$

2.5 Modélisation de la pile à combustible[10],[13]

Dans le fonctionnement de la PEMFC, toute l'énergie provenant de l'hydrogène n'est pas seulement convertie en électricité, mais une partie d'elle est perdue sous trois principaux phénomènes: Pertes d'activations, ohmiques et par diffusion. Le modèle électrique de la PEMFC.

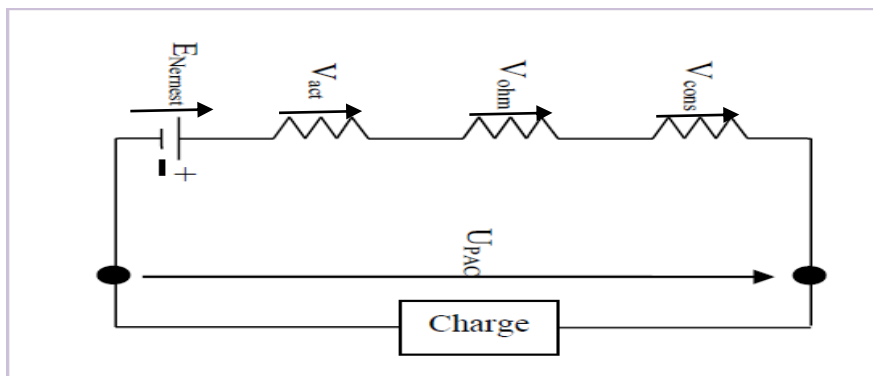


Figure 2-13: Schéma équivalent d'une PEMFC.

$$U_{pac} = E_{Nernst} - V_{act} - V_{ohm} - V_{conc} \dots \dots \dots (2.13)$$

V_{act}: Polarisation d'activation.

V_{ohm}: Polarisation ohmique.

V_{conc}: Polarisation de concentration.

$$E_{Nernst} = 1.229 - 0.85 \times 10^{-3} \times (T - 298.15) + 4.31 \times 10^{-5} \left[\ln(P_{H_2}^*) + \frac{1}{2} \ln(P_{O_2}^*) \right] \dots \dots \dots (2.14)$$

T: Température opératoire absolue de la pile (K).

P_{H₂}^{*}: Pressions partielles à l'interface de l'hydrogène (atm).

P_{O₂}^{*}: Pressions partielles à l'interface de l'oxygène (atm).

2.5.1 Polarisation d'activation

Le démarrage des réactions chimiques provoque les pertes d'activations, ils sont essentiellement dus aux réactions cathodiques.

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

$$V_{act} = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 \times T + \varepsilon_3 \times T \times \ln(C_{O_2}^*) + \varepsilon_4 \times T \times \ln(I_{PAC}) \dots \dots \dots (2.15)$$

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

ε₁, ε₂, ε₃, ε₄: sont des coefficients paramétriques appropriés à chaque modèle physique de la pile à combustible PEMFC.

$$C_{O_2}^* = \frac{P_{O_2}^*}{\left(5.08 \times 10^6 \times e^{-\left(\frac{498}{T}\right)} \right)} \dots \dots \dots (2.16)$$

C_{O₂}^{*}: représente les concentrations de l'oxygène (mol/cm³) décomposé 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.

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

$$P_{O_2}^* = P_{cath} \times (1 - X_{H_2O}^{Sat}) \dots \dots \dots (2.17)$$

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

X_{H₂O}^{Sat}: La fraction molaire de saturation de l'eau dans le gaz humidifié et supposée ≈ à 50 %, on obtient alors:

$$P_{O_2}^* = P_{cath} \times \frac{1}{2} \dots \dots \dots (2.18)$$

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

$$P_{H_2}^* = P_{anode} \times \left(1 - \frac{1}{2} \cdot X_{H_2O}^{Sat} \right) \dots \dots \dots (2.19)$$

P_{anode}: Est la pression de l'hydrogène à l'anode,

$$P_{H_2}^* = P_{anode} \times \frac{3}{4} \dots \dots \dots (2.20)$$

2.5.2 Polarisation ohmique

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

$$V_{ohm} = I_{PAC} \times (R_M + R_C) \dots\dots\dots (2.21)$$

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

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

$$R_M = \frac{l \times r_M}{A} \dots\dots\dots (2.22)$$

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

r_M : est la résistance spécifique de la membrane, obtenue par la relation suivante:

$$r_M = \frac{181.6 \times \left[1 + 0.03 \times \left(\frac{I_{PAC}}{A} \right) + 0.062 \times \left(\frac{T}{303} \right)^2 \times \left(\frac{I_{PAC}}{A} \right)^{2.5} \right]}{\left[\delta_{H_2O/SO_3^-} - 0.634 - 3 \times \left(\frac{I_{PAC}}{A} \right) \right] \times \exp \left[4.18 \times \left(\frac{T-303}{T} \right) \right]} \dots\dots\dots (2.23)$$

Le terme $\left(\frac{181.6}{\delta_{H_2O/SO_3^-} - 0.634} \right)$ 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 .

δ_{H_2O/SO_3^-} est la teneur en eau dans la membrane, admettant une valeur minimale et maximale respectivement de 0 et de 22. Et A la surface active de la pile (cm^2).

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

$$V_{ohm} = \frac{I_{PAC}}{A} \left[\frac{181.6 \times \left[1 + 0.03 \times \left(\frac{I_{PAC}}{A} \right) + 0.062 \times \left(\frac{T}{303} \right)^2 \times \left(\frac{I_{PAC}}{A} \right)^{2.5} \right]}{\left[\delta_{H_2O/SO_3^-} - 0.634 - 3 \times \left(\frac{I_{PAC}}{A} \right) \right] \times \exp \left[4.18 \times \left(\frac{T-303}{T} \right) \right]} \times l \times A \times R_C \right] \dots\dots\dots (2.24)$$

2.5.3 Polarisation 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:

$$V_{conc} = -B \left(1 - \frac{J}{J_{max}} \right) \dots\dots\dots (2.25)$$

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

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

J_{max} est la densité de Courant maximale.

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

$$E_s = n \times E_{PAC} \dots\dots\dots (2.26)$$

On remplace les expressions des pertes dans l'équation (2-13), et on obtient le potentiel réel global de la pile à combustible PEMFC, par l'équation suivante:

$$\begin{aligned}
 U_{PAC} = & 0.2817 - 0.85 \times 10^{-3}(T - 298.15) + 4.3081 \times T \left[\ln \left(\frac{3}{4} P_{anode} \right) + \frac{1}{2} \left(\frac{1}{2} P_{cath} \right) \right] + \\
 & \left[2.86 \times 10^{-3} + 2 \times 10^{-4} \ln(A) + 4.3 \times 10^{-5} \ln \left(\frac{0.75 P_{anode}}{1.091 \times 10^6 \times \exp\left(\frac{77}{T}\right)} \right) \right] \times T + 7.6 \times \\
 & 10^{-5} \ln \left(\frac{0.5 P_{anode}}{5.08 \times 10^6 \times \exp\left(\frac{498}{T}\right)} \right) - 1.93 \times 10^{-4} T \times \ln(I_{PAC}) - \\
 & I_{PAC} \left[\frac{181.6 \times \left[1 + 0.03 \times (I_{PAC}) + 0.062 \times \left(\frac{T}{303} \right)^2 \times \left(\frac{I_{PAC}}{A} \right)^{2.5} \right]}{A \left[\delta_{H_2O/SO_3} - 0.0634 - 3 \times \left(\frac{I_{PAC}}{A} \right) \right] \times \exp \left[4.18 \times \left(\frac{T-303}{T} \right) \right]} \right] l \times R_C \Bigg] + B \left(1 + \frac{J}{J_{max}} \right) \dots \dots \dots (2.27)
 \end{aligned}$$

2.6 Modélisation de la batterie [11]

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.

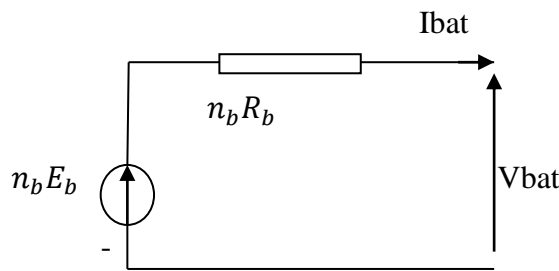


Figure 2-14: Schéma équivalent de la batterie.

Ce modèle est basé sur le schéma électrique de la figure(2-14), la batterie est décrite par deux éléments dont les caractéristiques dépendent d'un certain nombre de paramètres: tension à vide E_b et sa résistance interne R_b .

$$V_{bat} = n_b E_b + n_b R_b I_{bat} \dots \dots \dots (2.28)$$

Où V_{bat} et I_{bat} sont la tension et le courant de la batterie, E_b est la f.e.m. (force électromotrice) d'une cellule de la batterie et R_b sa résistance interne.

2.6.1 Modélisation de la capacité

Le modèle de la capacité donne la quantité d'énergie C_{bat} que peut restituer la batterie, en fonction du courant moyen de décharge. Son expression est établie à partir du courant I_{10} correspondant au régime de fonctionnement C_{10} .

$$C_{bat} = \frac{1.67 C_{10}}{1 + 0.67 \times \left(\frac{I_{bat, moy}}{I_{10}} \right)^{0.9}} * (1 + 0.005 * \Delta T) \dots \dots \dots (2.29)$$

Avec :

I₁₀ : Courant nominal de la batterie (en A) donné par le constructeur;

C₁₀ : Capacité nominale de la batterie (en Ah) en régime de décharge à courant constant durant 10 heures. Elle est donnée par le constructeur et elle est telle que:

$$C_{10} = 10 * I_{10} \dots\dots\dots (2.30)$$

ΔT : L'échauffement 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 .

$$EDC = 1 - \frac{Q_d}{C_{bat}} \dots\dots\dots (2.31)$$

Dont Q_d est calculé par la fonction suivante: $Q_d = I_{bat} * t$ (2.32)

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

2.6.2 Equations de la tension de décharge

En régime de décharge, la f.e.m et la résistance interne sont déterminées par:

$$E_{b_déch} = 1.965 + 0.12EDC \dots\dots\dots (2.33)$$

$$R_{b_déch} = R_{bat} = \frac{1}{C_{10}} \left(\frac{4}{1+|I_{bat}|^{0.3}} + \frac{0.27}{EDC^{1.5}} \right) \dots\dots\dots (2.34)$$

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

$$V_{bat_déch} = n[1.965 + 0.12EDC] - n \frac{|I_{bat}|}{C_{10}} \left(\frac{4}{1+|I_{bat}|^{0.3}} + \frac{0.27}{EDC^{1.5}} + 0.02 \right) (1 - 0.007\Delta T) \dots\dots\dots (2.35)$$

2.6.3 Equation de la tension de charge

L'équation de la tension en régime de charge est comme suit, elle est en fonction de l'état de charge et du courant de la batterie.

$$V_{bat,char} = n_b * [2 + 0.16.EDC] + n_b * \frac{|I_{bat}|}{C_{10}} * \left(\frac{6}{1+|I_{bat}|^{0.86}} + \frac{0.48}{(1-EDC)^{1.2}} + 0.036 \right) * (1 - 0.025\Delta T) \dots\dots\dots (2.36)$$

2.7 Electrolyseur [12]

L'électrolyseur produit de l'hydrogène et de l'oxygène à partir de l'eau. L'électrolyse de l'eau peut être considérée comme le processus inverse d'une pile à combustible alimentée par hydrogène. Contrairement à la réaction électrochimique se produisant dans la pile à

combustible, l'électrolyseur convertit l'énergie électrique (courant continu) en énergie chimique stockée en hydrogène.

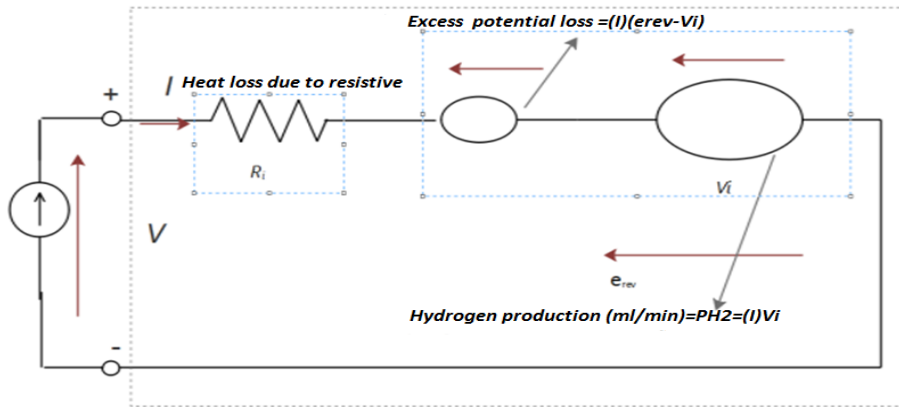


Figure 2-15: Schéma équivalent de l'électrolyseur PEM.

Afin d'obtenir les caractéristiques I-V et d'hydrogène, certaines équations ont été développées.

$$V = \left(\frac{1}{3.064}\right) * I + 1.476 = 0.326I + 1.476 = IR_i + e_{rev} \dots \dots \dots (2.37)$$

Cette équation indique un modèle de circuit équivalent simple pour le PEM, qui a une résistance initiale Ri, et potentiel inverse e_rev. Le potentiel idéal Vi (électro chimique) est calculé par:

$$V_i = \frac{\Delta G}{2F} \dots \dots \dots (2.38)$$

Où, ΔG est le changement d'énergie libre de Gibbs (J / mol) de l'hydrogène gazeux et F est la constante de Faraday (96.487 C / mol).

Si l'eau est en phase liquide, alors ΔG pour toute la température T (° C) peut être calculée par:

$$\Delta G = 285840 - 163.2(273 + T) \dots \dots \dots (2.39)$$

La valeur de Vi est calculée dans des conditions de fonctionnement nominales à température ambiante de 20 ° C et 1 atm de pression. Il s'élève à 1,223 V, ce qui est utile pour l'électrolyse et la production d'hydrogène. C'est aussi associée à l'électrochimie, le volume molaire Vm est donné par:

$$V_m = \frac{R(273+T)}{P} \dots \dots \dots (2.40)$$

Où R et P sont la constante de gaz idéals (0,082 1 atm k⁻¹ mol⁻¹) et pression, respectivement.

Le taux de production d'hydrogène qui est VH (ml / min) par rapport au courant d'entrée I (A) est déterminée par:

$$V_H = V_m(I) \left(\frac{10^3 ml}{l}\right) \left(\frac{60s}{min}\right) \left(\frac{I(\frac{C}{s})}{2F(C)}\right) \dots \dots \dots (2.41)$$

$$= V_m * 10^3 * 60 * \frac{I}{2F} \dots \dots \dots (2.42)$$

L'énergie électrochimique de l'hydrogène par seconde, PH2 qui est égal au VH est calculé par:

$$P_{H2} = V_m * 10^3 * 60 * \frac{I}{2F} \frac{2FV_i}{V_m * 10^3 * 60} = V_i * I \dots\dots\dots (2.43)$$

A partir des équations ci-dessus, il peut être clairement vu que la puissance utile qui est fournie par la cellule d'électrolyseur repose sur le courant d'entrée de l'électrolyseur I et tension idéale V_i . La puissance électrique d'entrée P de cellule électrolyseur PEM, qui est la fonction de la V_H , peut être déterminé par:

$$P = VI = I^2 * R_i + I * e_{rev} \dots\dots\dots (2.44)$$

$$= \left(V_H \frac{2F}{V_m * 10^3 * 60} \right)^2 * R_i + \left(V_H \frac{2F}{V_m * 10^3 * 60} \right) * e_{rev} \dots\dots\dots (2.45)$$

2.8 Modélisation du réservoir d'hydrogène[12]

L'hydrogène gazeux comprimé ou l'hydrogène liquide peuvent être stocké dans des réservoirs en utilisant différentes techniques comme stockage physique de l'hydrogène. Afin de stocker le gaz d'hydrogène qui est produit par l'électrolyseur, un module dynamique pour le réservoir est créé dans MATLAB / Simulink, et peut être exprimé comme suit:

$$P_b - P_{bi} = z * \frac{N_{H2} * R * T_b}{M_{H2} * V_b} \dots\dots\dots (2.46)$$

Où, P_b est la pression du réservoir qui est mesurée en (Pascal), P_{bi} est la pression initiale de réservoir de stockage (Pascal), R est la constante de gaz universelle (J / k mol · K), T_b est la température de fonctionnement (K), V_b est le volume du réservoir (m^3), T est la température, et Z est le facteur de compressibilité en fonction de la pression comme indiqué dans l'équation:

$$z = \frac{P * V_m}{R * T} \dots\dots\dots (2.47)$$

Où P et V_m sont la pression et le volume molaire, respectivement. Il a été remarqué que ce modèle détermine la pression du réservoir en utilisant le rapport de débit d'hydrogène dans le réservoir.

2.9 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons modélisé les différentes parties du système d'énergie hybride étudié (photovoltaïque et pile à combustible; les systèmes de stockage (la batterie et l'électrolyseur) et les convertisseurs utilisés). Afin de gérer ces différentes sources pour alimenter une charge variable, nous proposons un système de gestion qui va superviser les flux de puissances.

3.1 Introduction

Dans ce chapitre nous étudierons pour le même dimensionnement de générateur photovoltaïque et la même charge deux systèmes différents, le premier consiste à étudier un système hybride photovoltaïque avec batterie et le deuxième un système hybride photovoltaïque avec une pile à combustible.

3.2 Système hybride PV/Batterie

3.2.1 Description de système photovoltaïque avec stockage par batterie

C'est le système le plus répandu. Le composant de stockage permet d'emmagasiner de l'énergie et de la restituer à la charge lorsque le rayonnement solaire est faible ou absent.

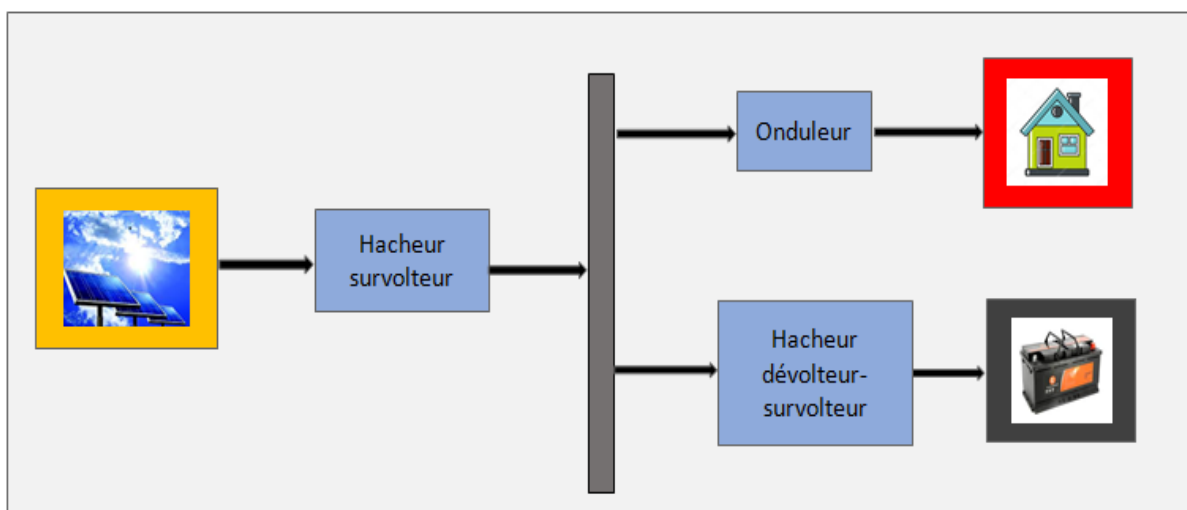


Figure 3-1: Schéma descriptif de système photovoltaïque avec batteries.

Un système photovoltaïque (PV) autonome est composé dans son ensemble d'un:

- Panneaux photovoltaïques;
- Moyen de stockage : électrochimique (batteries);
- Hacheur permettant d'alimenter le bus continu et de poursuivre le point de puissance maximum;
- Onduleur permettant d'alimenter les charges alternatives;
- Module de contrôle pour la charge et la décharge des batteries.

La source d'énergie de notre système est assurée par des panneaux photovoltaïques de 80 Wc, les échanges d'énergies entre les composants se font à travers un bus continu.

3.2.2 Dimensionnement des composants du système

3.2.2.1 Dimensionnement du système PV[9]

Le dimensionnement ayant un impact sur la qualité, le prix et la pérennité du système photovoltaïque, 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;

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

- ❖ Evaluation des besoins énergétiques;
- ❖ Estimation de l'ensoleillement;
- ❖ Dimensionnement des panneaux photovoltaïques.

Il existe plusieurs méthodes de dimensionnement d'un système photovoltaïque, et celle qu'on a choisi est la méthode de mois le plus défavorable qui correspond au mois pendant lequel la valeur de l'irradiation globale moyenne mensuelle journalière est la plus faible de l'année.

En Algérie, le mois de décembre est le mois le plus défavorable avec un maximum de 2,3 heures de soleil par jour.

3.2.2.1.1 Evaluation de la consommation de la charge

Pour évaluer l'énergie consommée par une charge il faut connaître deux choses essentielles:

- Puissance de la charge $P_{ch}[W]$;
- Durée de fonctionnement $T_{ch}[h/j]$.

Ainsi l'énergie consommée par une charge durant la journée s'écrit :

$$E_{ch} = P_{ch} * T_{ch} [Wh/j] \dots\dots\dots (3-1)$$

L'énergie moyenne consommée par jour sera la somme de toutes les énergies de chaque appareil.

$$E_j = \sum (P_i * T_i) [Wh/j] \dots\dots\dots (3-2)$$

3.2.2.1.2 Dimensionnement du générateur photovoltaïque

Besoin journalier de l'habitat

$$B_j = \sum_1^n P_{ch} * Dt \dots\dots\dots (3-3)$$

Avec : B_j : La consommation électrique journalière, Dt durée de fonctionnement de l'appareil.

P_{ch} : Puissance de l'appareil.

Puissance journalière du panneau photovoltaïque

$$P_{pv/j} = P_c * N_e \dots\dots\dots (3-4)$$

Avec : $P_{pv/j}$: puissance journalière du panneau P_c : puissance crête du panneau.

$N_e = \frac{G_s}{1000}$: Nombre d'heures équivalentes.

Avec : G_s : Valeur de l'ensoleillement moyen mensuelle du mois le plus défavorable de l'ensoleillement, 1000 : Valeur de l'ensoleillement dans les conditions STC(W/m^2).

Dans les installations photovoltaïques, les pertes sont approximées à 20%.

$$P_{pv/jr\acute{e}elle} = P_{pv/j} * (1 - 0.2) \dots \dots \dots (3-5)$$

Nombre de panneaux

$$N_{pv} = ENT \left[\frac{B_j}{\frac{P_{pv}}{jr\acute{e}elle}} \right] \dots \dots \dots (3-6)$$

3.2.2.2 Dimensionnement d'un système de stockage[9]

La capacité (C_{batt}) des batteries de stockage est déterminée à partir de la charge demandée, elle est exprimée par:

$$C_{batt} = \frac{B_j * J_{aut}}{V_{batt} * DOD * n_{batt}} \dots \dots \dots (3-7)$$

Avec : V_{batt} : Tension des batteries, **DOD** : le taux de décharge maximum des batteries;

J_{aut} : nombre de jours d'autonomie, $C_{batt,u}$: la capacité unitaire d'une batterie,

Nombre de batteries :

$$N_{batt} = \frac{C_{batt}}{C_{batt,u}} \dots \dots \dots (3-8)$$

3.2.2.3 Application pour une charge à usage d'habitation

La charge utilisée s'agit d'une alimentation en énergie d'une maison, nous avons pris en compte une liste d'appareil indispensable à utiliser et qu'on peut trouver en général dans chaque habitation (Tableau 3-1).

Charges		Nombre de charge	Puissance nominale (W)	Heures d'utilisation (h)	Consommation (Wh/j)
Lampe fluorescente	Cuisine	01	20	03	120
	Salle de séjour	02	20	03	120
Lampe à incandescence	Chambre 1	01	20	02	40
	Chambre 2	01	20	02	40
	Toilette douche	03	40	02	240
Téléviseur		01	80	06	480
Radio		01	40	04	160
Réfrigérateur		01	32	24	768
Divers			210	04	840
Total			582		2808

Tableau 3-1: Consommation d'énergie journalière pour une maison.

3.2.2.3.1 Profil de consommation

Pour rendre compte l'utilisation de l'électricité produite, nous avons défini un profil basé sur les habitudes de consommation d'une famille. Ce profil tient compte des périodes d'utilisation au cours de la journée. Le profil de notre charge est représenté dans la figure(3-2).

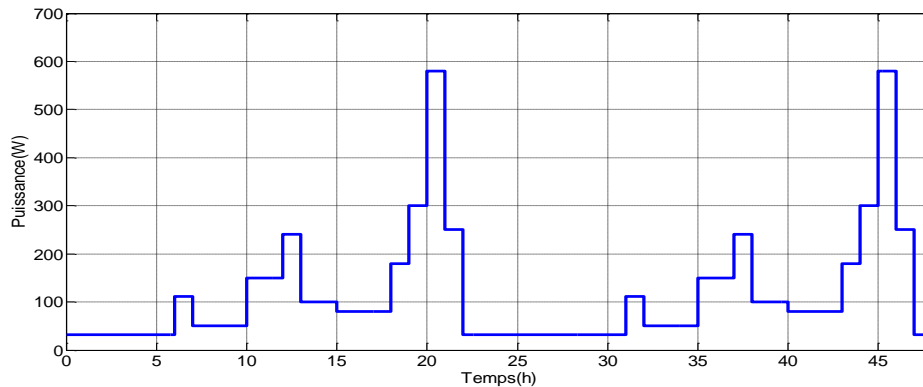


Figure 3-2: profil de charge.

Calcul de la demande journalière d'énergie

Caractéristiques du système PV autonome sont mentionnées dans le tableau (3-2):

Rayonnement moyen quotidien du mois le plus défavorable : E_{sol}[KWh/m².j]	2.3
Tension de la batterie : U_{bat}[V]	48
nombre de jours d'autonomie : N_{aut}[j]	02
Rendement électrique des batteries : n_b [°/°]	0.9
Coefficient des pertes : C_p [°/°]	20
Profondeur de décharge des batteries : PD	60
Puissance d'un module photovoltaïque : $P_{pv, u}$ [W]	80
Tension nominal d'un panneau photovoltaïque : V_c[V]	12

Tableau 3-2: Caractéristiques du système PV autonome

Pour les différents calculs de notre installation, on les représente dans le tableau (3-3):

Consommation journalière : E_j[Wh/j]	2808
Puissance du champ photovoltaïque : P_{pv}[W]	508
Nombre des panneaux PV : N_{pv}	20
Nombre des panneaux en série : N_s	10
Nombre des panneaux en parallèles : N_p	2
Capacité de la batterie : C_{batt}[Ah]	200
Nombre des batteries : N_{batt}	6
Puissance maximale quand tous les récepteurs fonctionnent simultanément : $P_{ch, m}$ [W]	582

Tableau 3-3:Résultats de dimensionnement.

3.2.3 Gestion de puissance PV/Batteries[9]

Pour superviser l'installation PV/Batteries, on suppose que les batteries sont initialement à moitié chargées. Le système de gestion s'occupe principalement de l'alimentation de la charge et de la protection des batteries (on prend un état de charge minimum $EDC_{min} = 30\%$ et un état de charge maximum $EDC_{max} = 90\%$). Nous avons des différents modes qui régissent le fonctionnement du système proposé et qui sont:

- **MODE 1:** Le générateur photovoltaïque est suffisant pour satisfaire la charge $P_{pv} \geq P_{ch}$
Le surplus est destiné à charger les batteries.
- **MODE 2 :** P_{pv} est insuffisante pour alimenter la charge $P_{pv} < P_{ch}$ et $EDC > EDC_{min}$
$$P_{ch} = P_{pv} + P_{batt}$$
- **MODE 3 :** La charge est alimentée par la batterie $P_{batt} = P_{ch}$
 $EDC \geq EDC_{min}$
- **MODE 4 :** La P_{pv} suffisant pour alimenter la charge $P_{pv} = P_{ch}$
- **MODE 5 :** Les batteries complètement déchargé $EDC < EDC_{min}$ et $P_{pv} = 0$.

Nous présentons un tableau qui nous permet d'analyser et étudier les différents modes qu'on peut distinguer lors du fonctionnement

Modes	K_1	K_2	K_3	P_{ch}
Mode1	on	on	off	P_{pv}
Mode2	on	off	on	$P_{pv}+P_{bat}$
Mode3	off	off	on	P_{bat}
Mode4	on	off	off	P_{pv}
Mode5	off	Off	off	arrêt

Tableau 3-4:L'état des interrupteurs et les différents modes.

L'organigramme de la gestion est présenté dans la figure (3-3)

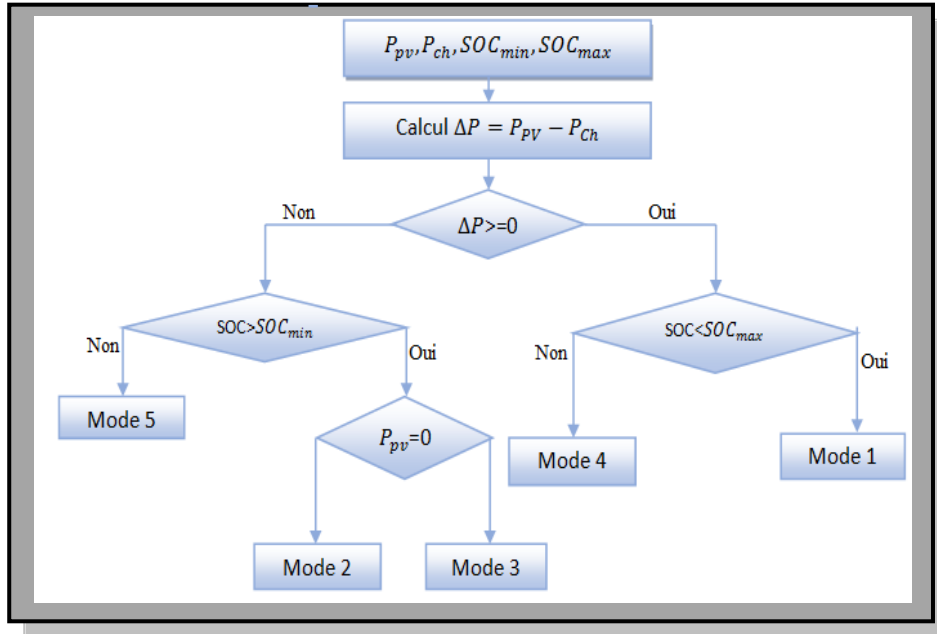


Figure 3-3: Algorithme de gestion.

3.2.4 Simulation du système

Le système PV/Batterie est composé de 20 panneaux photovoltaïque de 80W, de 6 batteries de stockage de 48V, 200Ah et d'une charge représentant une maison de consommation journalière de 2808Wh/j. Différentes simulations sont effectuées pour évaluer les performances du système. Les différentes parties du système (panneau photovoltaïque, convertisseur CC/CC, les batteries et la charge) sont modélisées par des blocs séparés puis reliés entre eux d'une manière cohérente.

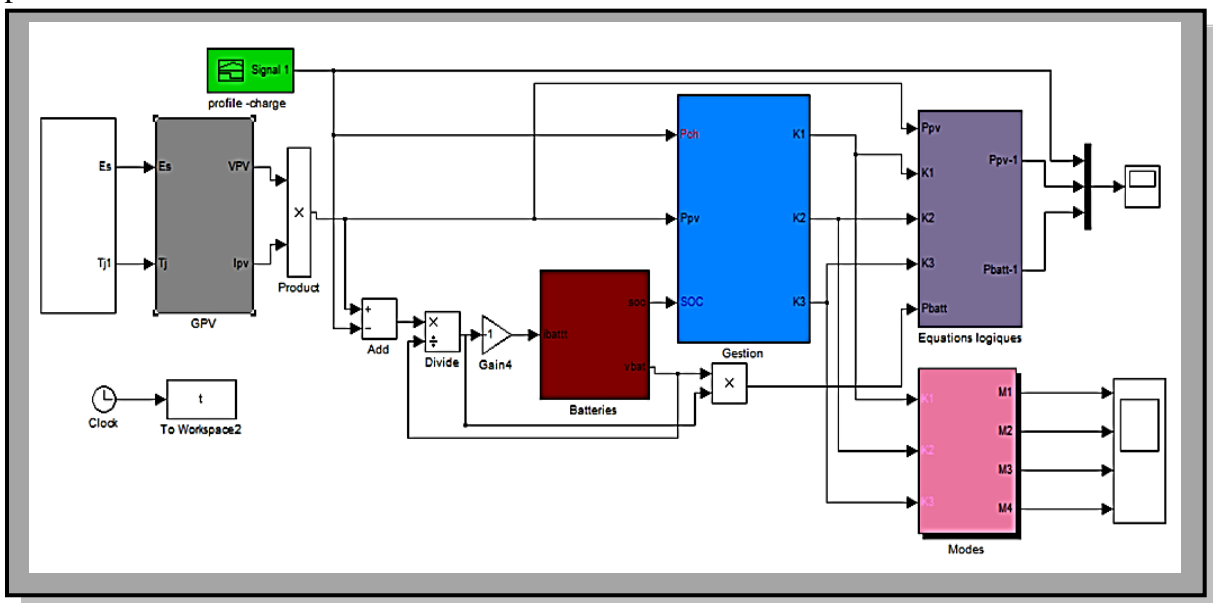


Figure 3-4: Schéma bloc du système PV/Batteries.

3.2.4.1 Résultats de simulation pour deux journées :

Les valeurs d'ensoleillements et de température de deux journées différentes ont été considérées dans notre travail comme suit:

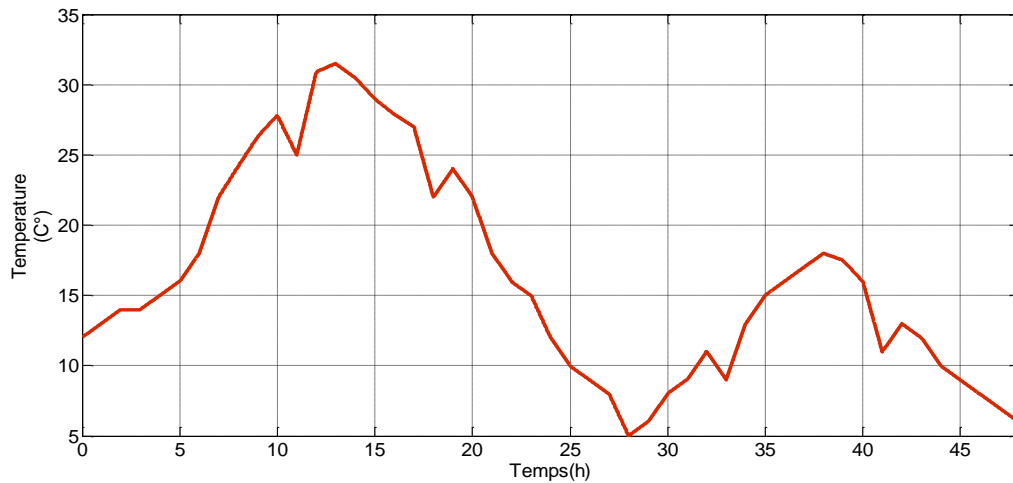


Figure 3-5: Profil de la température.

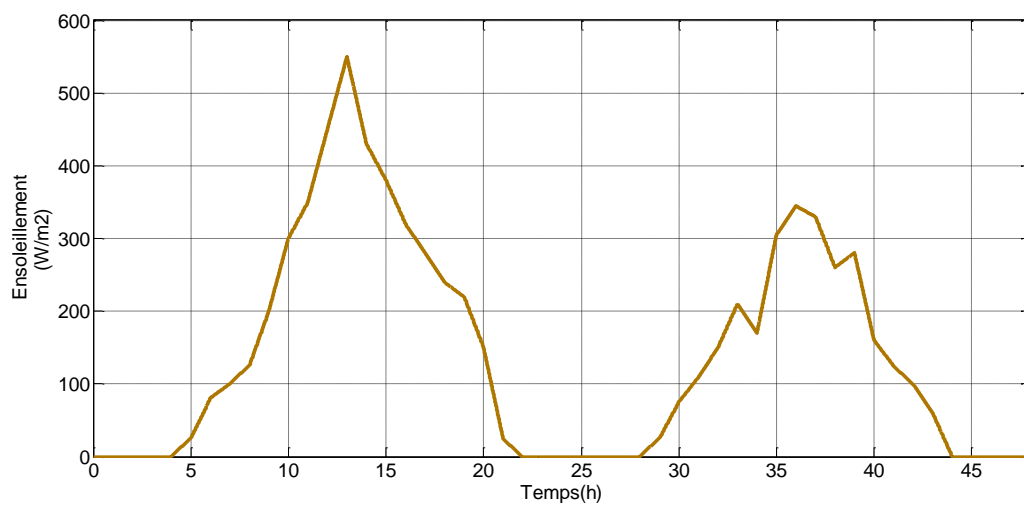


Figure 3-6: Profil de l'ensoleillement.

La figure (3-7) montre l'évolution de la tension des batteries.

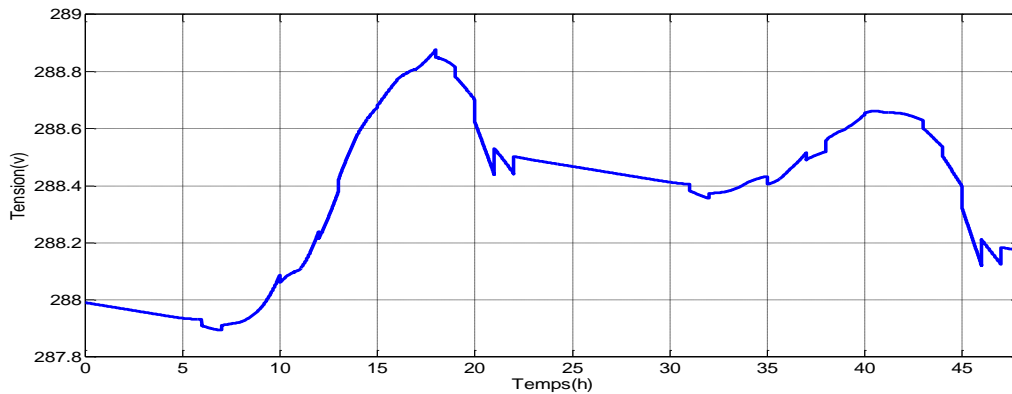


Figure 3-7: Tension des batteries.

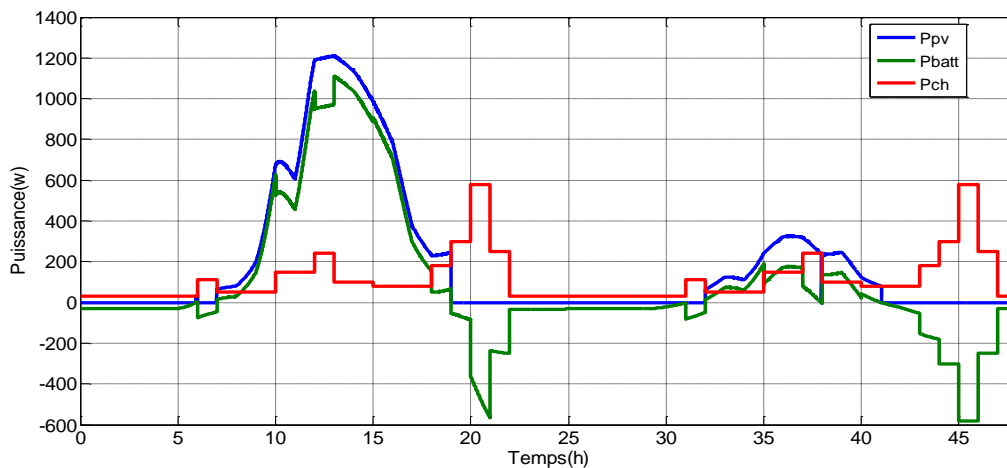


Figure 3-8: Allure des puissances (photovoltaïque, batterie, charge)

La figure (3-9) montre les instants de fonctionnement ouvert ou fermé des interrupteurs, on peut remarquer que les trois interrupteurs fonctionnent à des instants différents:

- ❖ Interrupteur K_1 : Se ferme dans l'intervalle de temps $t \in ([4h, 22h], [28h, 44h])$.

Celui-là est en On en plusieurs modes de fonctionnement mode 1, 2 et 4.

- ❖ Interrupteur K_2 : Se ferme dans l'intervalle du temps $t \in ([8h, 19h], [30.5h, 31h], [32h, 42.4h])$.

Celui-là est en On uniquement pour le mode 1, il a donc la même allure que ce dernier.

- ❖ Interrupteur K_3 : Se ferme dans l'intervalle de temps $t \in ([0, 8h], [19h, 30.5], [31h, 32h], [42.4h, 48h])$.

Celui-là est en (On) pour deux modes (2 et 3).

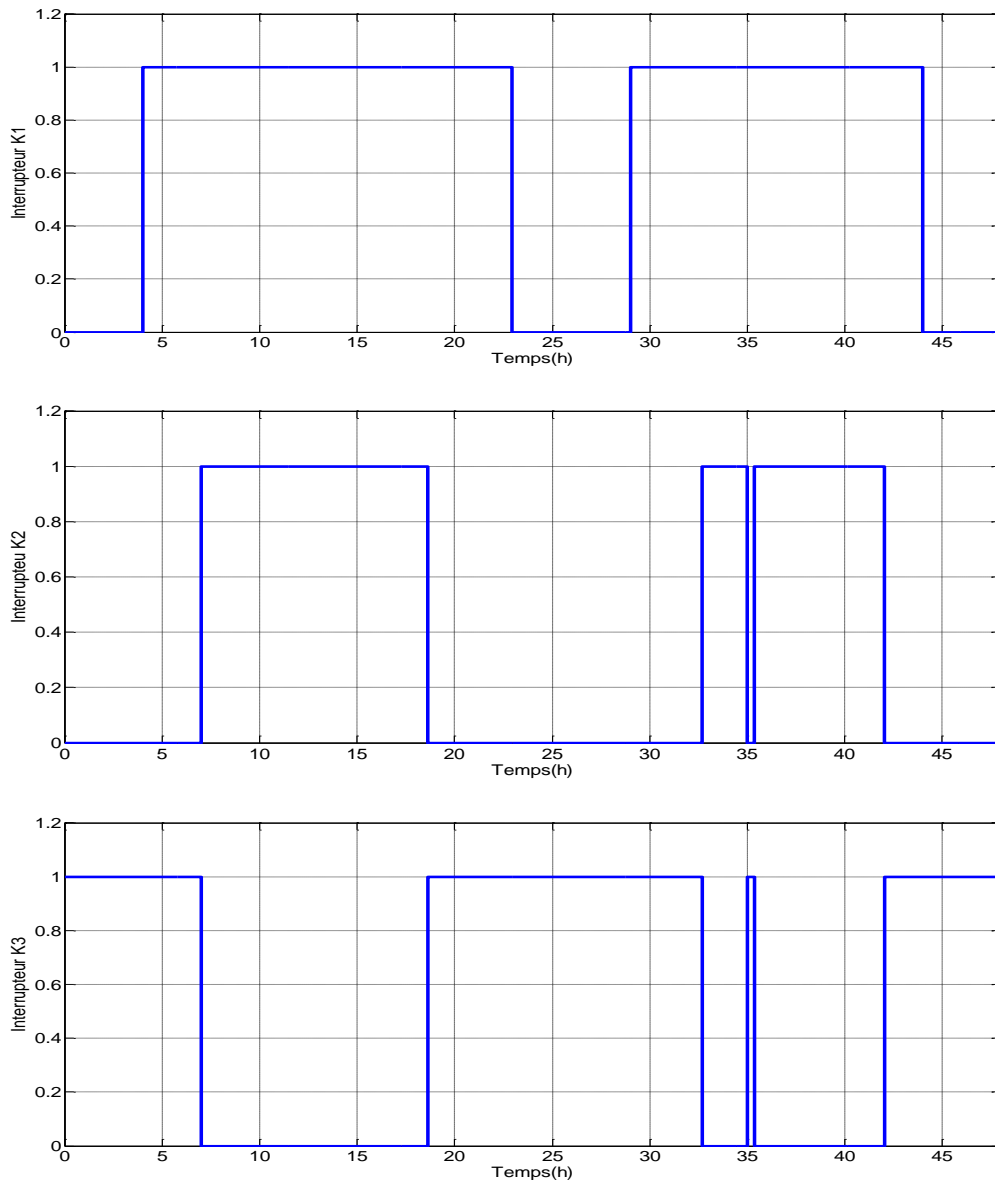


Figure 3-9: Fonctionnement des interrupteurs K_1 , K_2 et K_3

La figure (3-10) représente les différents modes de fonctionnement. Au cours de deux jours, les modes utilisés étaient les modes 1, 2, 3. Le mode 4 ne s'est pas produit car les batteries ne se chargent pas au maximum.

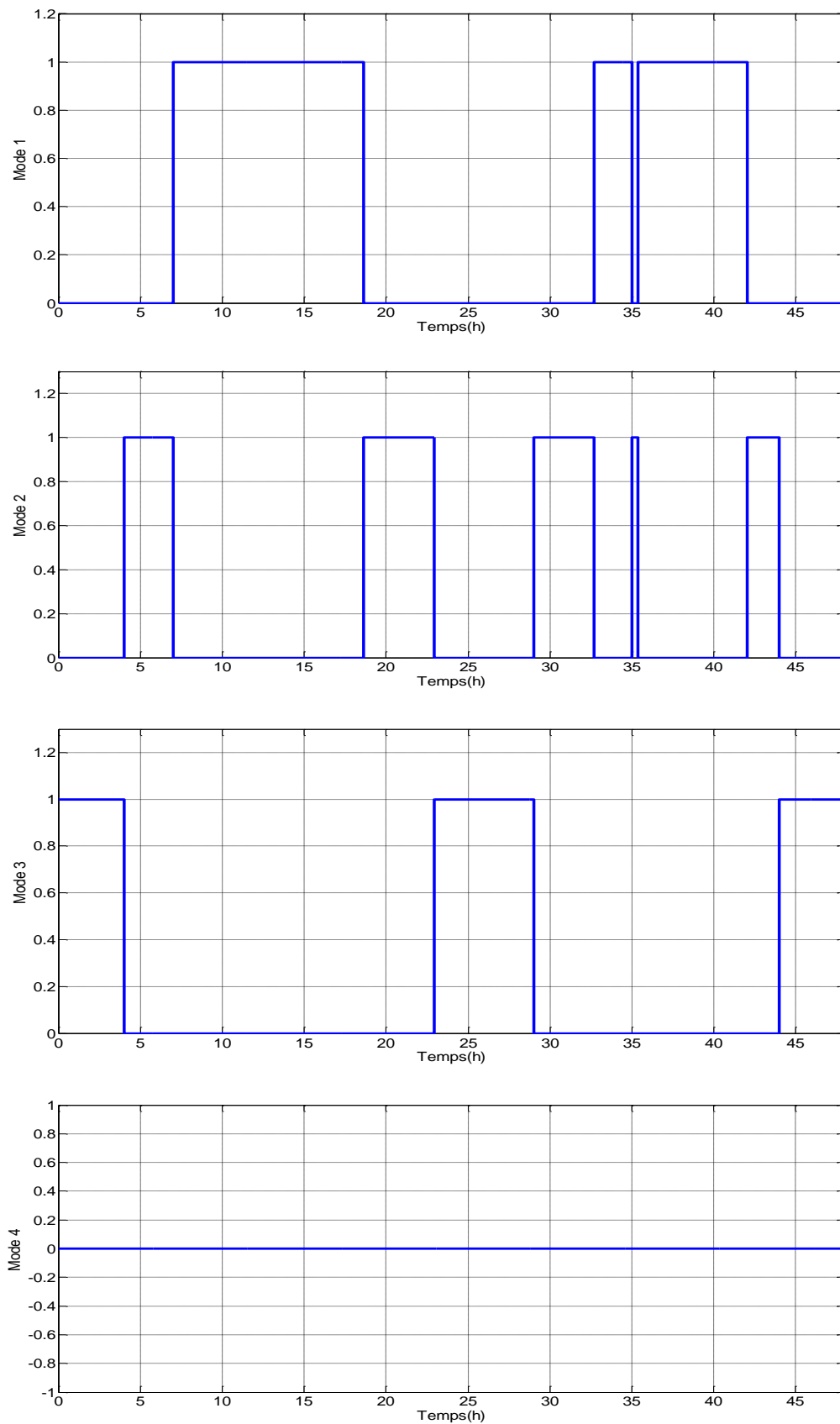


Figure 3-10: Fonctionnement avec les différents modes.

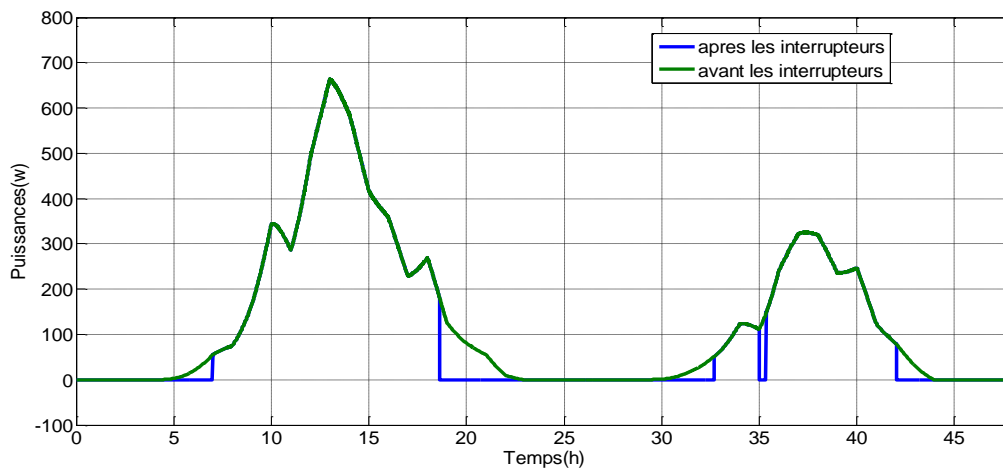


Figure 3-11: Comparaison entre les deux puissances P_{pv} (avant et après les interrupteurs).

Nous remarquons que la puissance photovoltaïque obtenue en tenant compte de la gestion suit l'état des interrupteurs imposé ce qui montre le bon fonctionnement de la gestion.

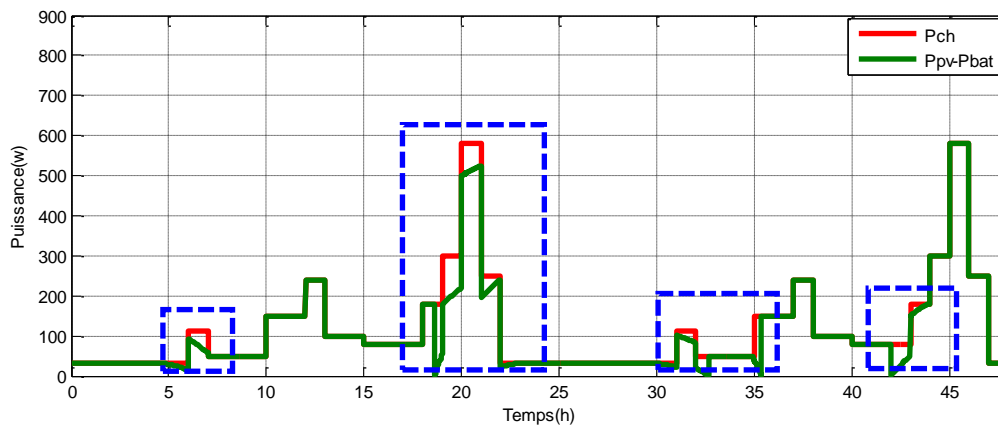


Figure 3-12: Comparaison entre la somme des puissances des différentes sources et la puissance de charge.

La figure 3-12 montre la comparaison entre la somme des puissances fournies par le système d'énergie hybride (P_{pv} et P_{bat}) et la puissance de charge. Comme la figure le montre les deux courbes ne sont pas identiques, donc le système hybride PV/batterie ne satisfait pas la charge à quelques instants ([4.69h, 7h],[19h, 22h],[32h, 35h] et [42h, 44h]).

La figure 3-13 montre une comparaison entre l'état de charge de la batterie avec et sans l'utilisation de l'algorithme de maximisation de puissance (MPPT).

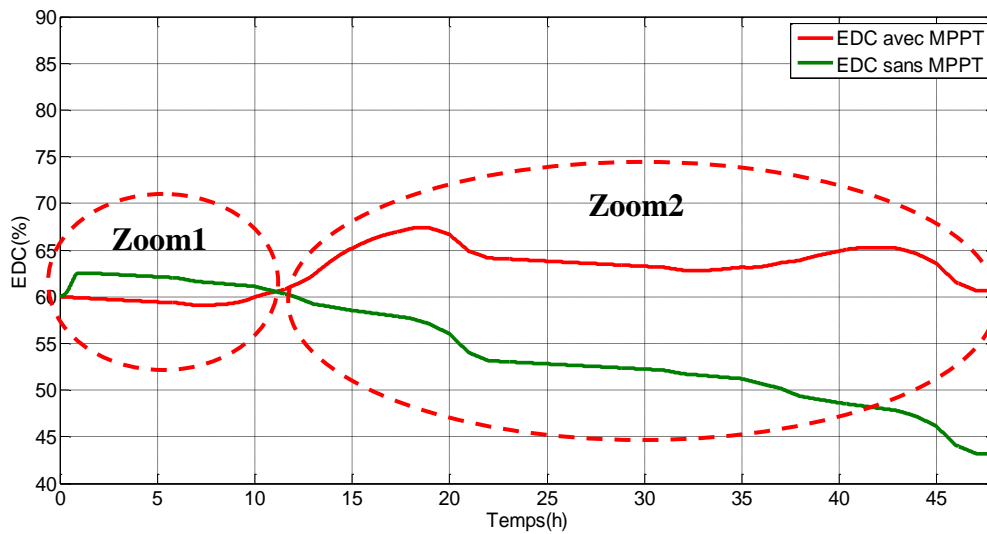


Figure 3-13: Comparaison entre l'état de charge de la batterie avec et sans MPPT.

Nous remarquons au début de la journée (pas d'ensoleillement), que l'état de charge (EDC) avec l'utilisation de la MPPT est moins que celui sans MPPT, ce qui est du à notre avis à la consommation d'énergie du hacheur. Cette variation est évaluée dans notre cas de 2.4% à 2.7%.

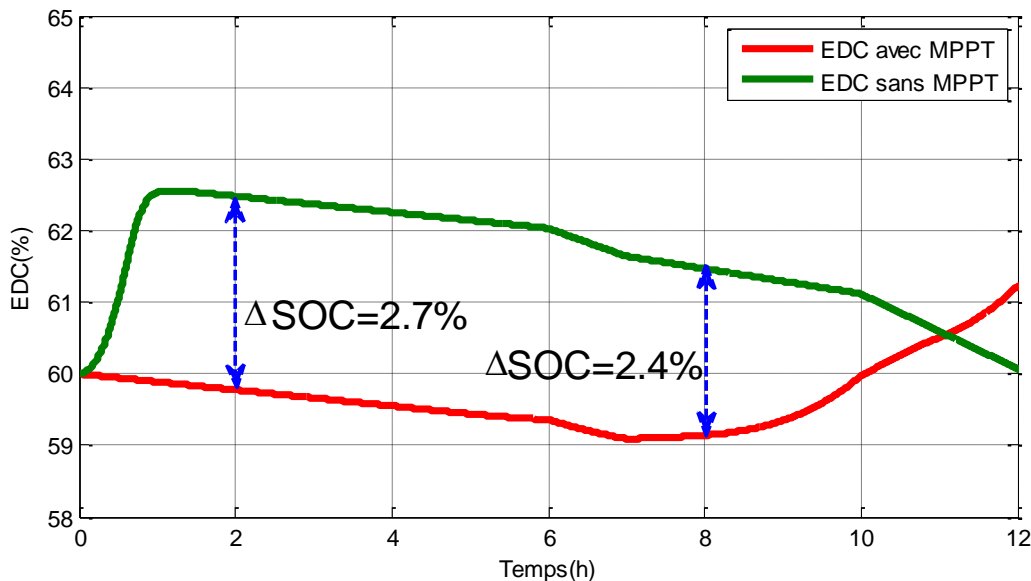


Figure 3-14: Zoom1 de l'état de charge

Une fois que l'ensoleillement à commencer (à partir de 10 h), nous remarquons une nette amélioration de l'état de charge avec l'introduction de la MPPT, qui est évaluée dans notre cas de 10% à 17.5%.

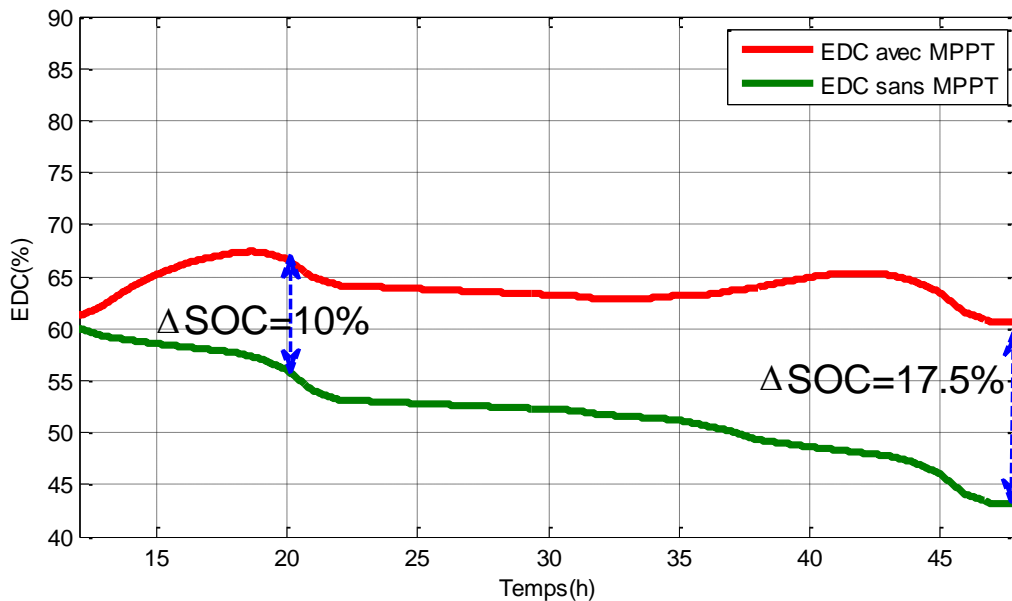


Figure 3-15: Zoom2 de l'état de charge

Nous pouvons conclure, une fois que le système commence à fonctionner, que l'introduction de l'algorithme MPPT sollicite moins les batteries ce qui très intéressant ; les batteries seront moins sollicités ce qui va augmenter leur durée de vie.

3.3 Système hybride PV/PAC

3.3.1 Description du système

Le système PV/PAC est composé dans son ensemble d'un:

- Générateur photovoltaïque;
- Pile à combustible;
- Electrolyseur et un réservoir d'hydrogène;
- Convertisseurs statiques (hacheur, onduleur);
- Charge.

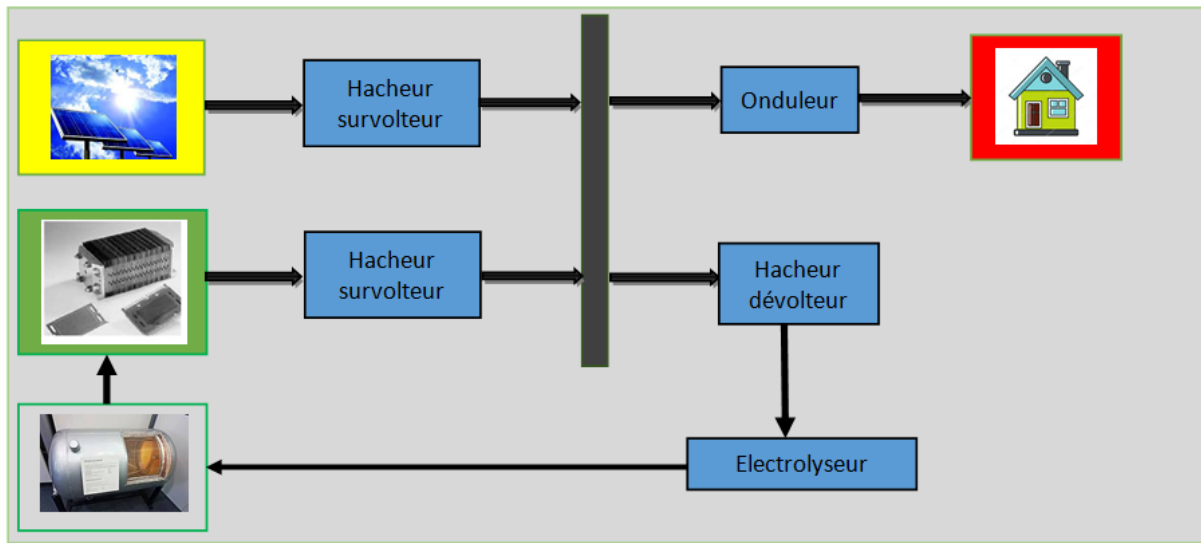


Figure 3-16: Schéma descriptif du système photovoltaïque avec pile à combustible.

3.3.2 Dimensionnement des composants du système

Pour le dimensionnement du panneau photovoltaïque et le profil de la charge c'est les mêmes que le système PV/Batteries.

3.3.2.1 Dimensionnement de la pile à combustible

Pour déterminer le nombre de cellules de la pile à combustible à mettre en série, on constate qu'une élévation d'un facteur 2 via le convertisseur survolteur donne un bon rendement.

Le stack doit alors fournir une tension $U/2$ au point de puissance nominale. Afin de maintenir un bon rendement de la PAC, il ne faut pas descendre en dessous de 0,64v par cellule et $0,6 \text{ A/cm}^2$.

Nombre de cellules:

$$N_{cel} = \frac{U_{stack}}{v_{cel}} \dots \dots \dots (3-9)$$

Avec: U : la tension du bus CC, v_{cel} : la tension de la cellule, U_{stack} : La tension fournit par le stack.

3.3.2.2 Dimensionnement du réservoir d'hydrogène

Pour le réservoir d'hydrogène on a pris un réservoir de 20L et de 50bar initialement chargé à 20bar.

3.3.3 Gestion du système PV/PAC

Pour la gestion d'énergie, on calcule d'abord la puissance nette de l'ensemble du système hybride. Cette puissance nette est égale à la différence entre la puissance du PV et la puissance produite par les sources renouvelables P_{ch} (la somme de la puissance du PV et de PAC).

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

$$\Delta P = P_{pv} - P_{ch}$$

Si $\Delta P > 0$, la charge est alimentée par PV et chargement de l'électrolyseur.

Si $\Delta P = 0$ ($P_{pv} = P_{ch}$), la charge est alimentée par PV.

Si $\Delta P < 0$, on a deux cas:

- $P_{pv} = 0$, PAC alimente la charge.

- P_{pv} est insuffisant $P_{ch} = P_{PV} + P_{PAC}$, il y a une compensation.

Les différents modes de fonctionnement du système sont les suivants :

Modes	K ₁	K ₂	K ₃
Mode1	On	On	Off
Mode2	On	Off	On
Mode3	Off	Off	On
Mode4	On	Off	Off
Mode5	Off	Off	Off

Tableau 3-5: L'état des interrupteurs et les différents modes.

L'organigramme de la gestion est présenté dans la figure (3.17).

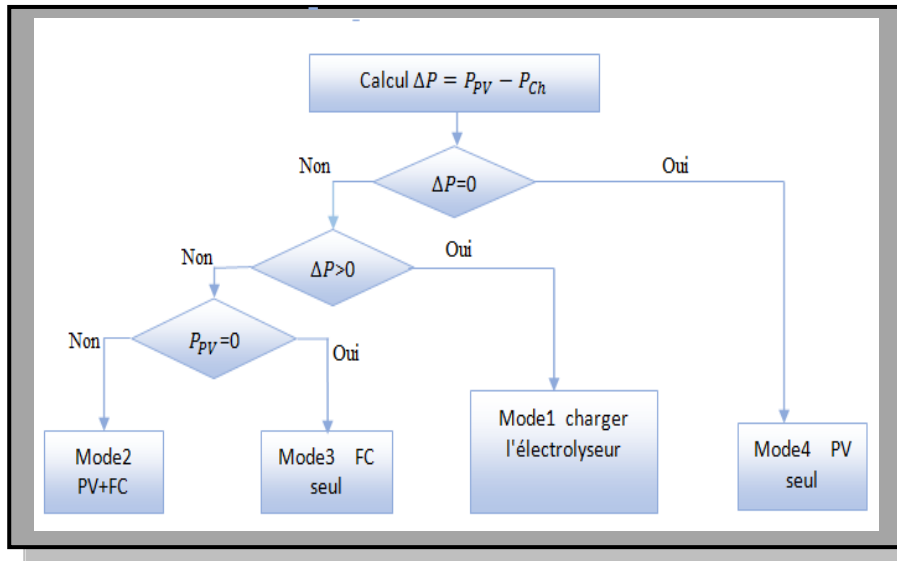


Figure 3-17: Algorithme de gestion de puissance du système étudié.

3.3.4 Simulation du système

Le système PV/PAC est composé du même nombre de panneaux, d'une même charge, d'un électrolyseur et d'une pile à combustible. Différentes simulations sont effectuées pour évaluer les performances du système. Les différentes parties du système (panneau photovoltaïque, convertisseur CC/CC, pile à combustible et la charge) sont modélisées par des blocs séparés puis reliées entre eux.

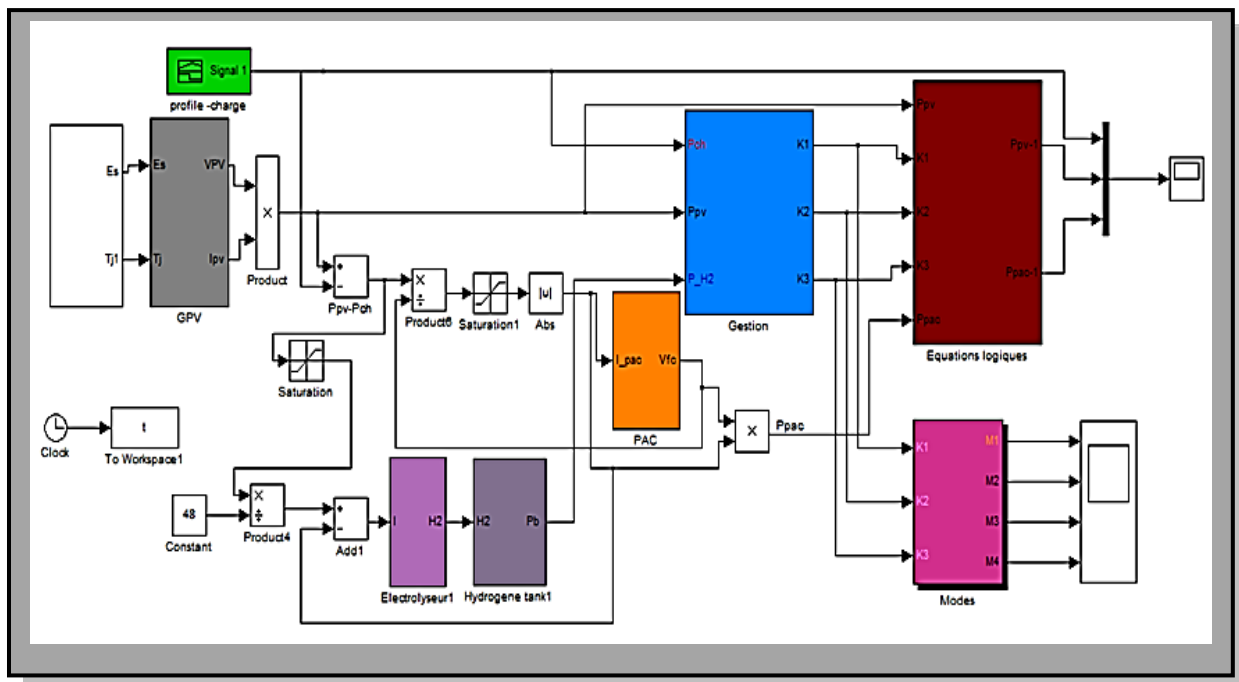


Figure 3-18: Schéma bloc du système PV/PAC.

3.3.4.1 Résultats de simulation pour deux journées

Avec le même profil d'ensoleillement et de température on a obtenu les résultats suivants:

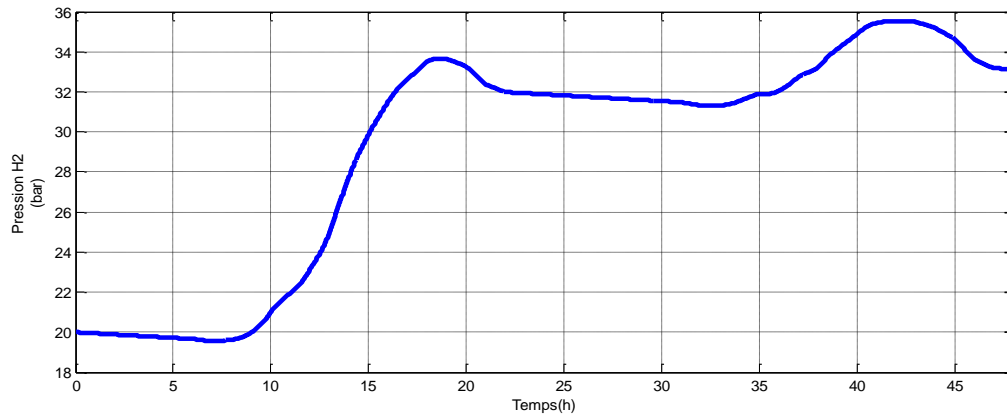


Figure 3-19: Pression d'hydrogène.

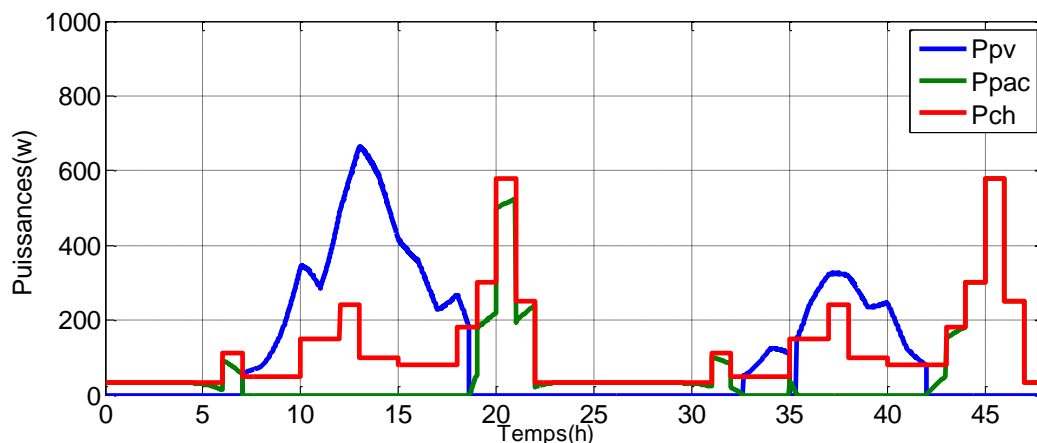


Figure 3-20: Allure des puissances (photovoltaïque, batteries, charge)

La figure (3-21) montre les instants de commutation (ouvert ou fermé) des interrupteurs. Les trois interrupteurs fonctionnent à des instants différents:

- ❖ Interrupteur K_1 : Se ferme dans l'intervalle de temps $t \in ([4h, 22h], [28h, 44h])$.

Celui-là est en On en plusieurs modes de fonctionnement mode 1, 2 et 4.

- ❖ Interrupteur K_2 : Se ferme dans l'intervalle du temps $t \in ([8h, 19h], [30.5h, 31h], [32h, 42.4h])$.

Celui-là est en On uniquement pour le mode 1, il a donc la même allure que ce dernier.

- ❖ Interrupteur K_3 : Se ferme dans l'intervalle de temps $t \in ([0, 8h], [19h, 30.5], [31h, 32h], [42.4h, 48h])$. Celui-là est en On uniquement pour le mode2, mode3.

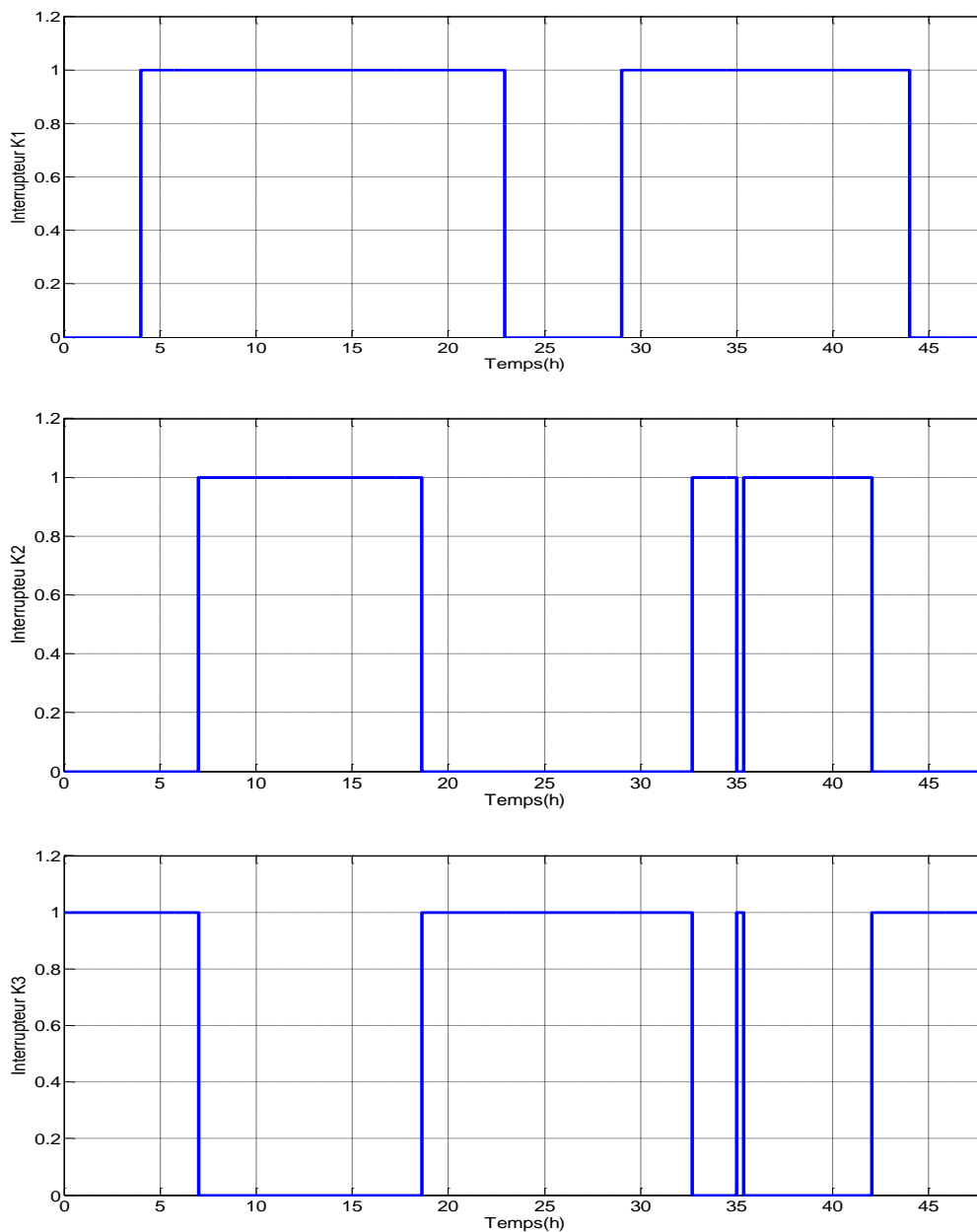


Figure 3-21: Fonctionnement des interrupteurs K_1 , K_2 et K_3 .

La figure (3-22) représente les différents modes de fonctionnement. Au cours de deux jours, les modes utilisés étaient les modes 1, 2, 3. Le mode 4 ne s'est pas produit car le réservoir d'hydrogène ne se charge pas au maximum.

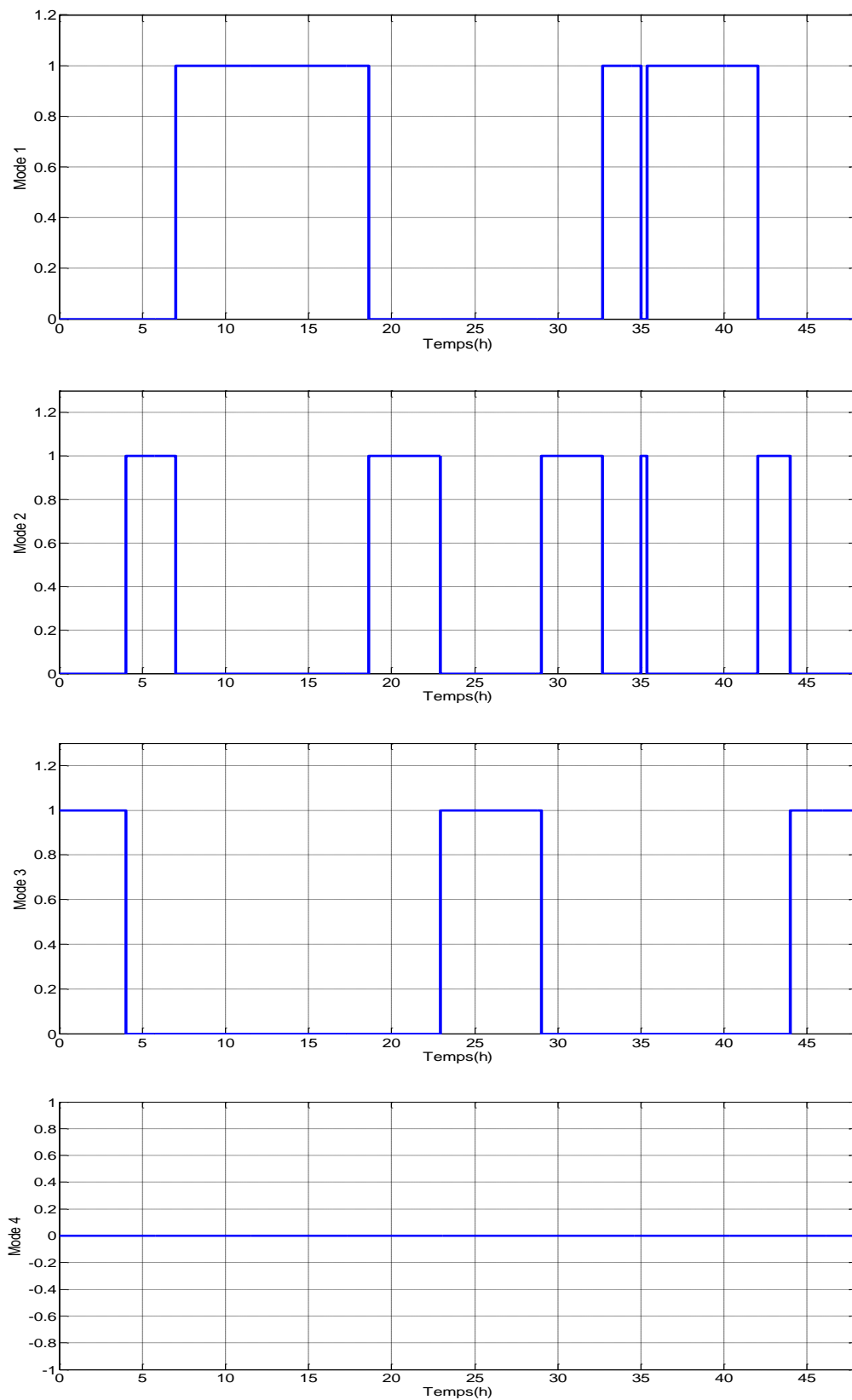


Figure 3-22: Différents modes dans le cas PV/PAC.

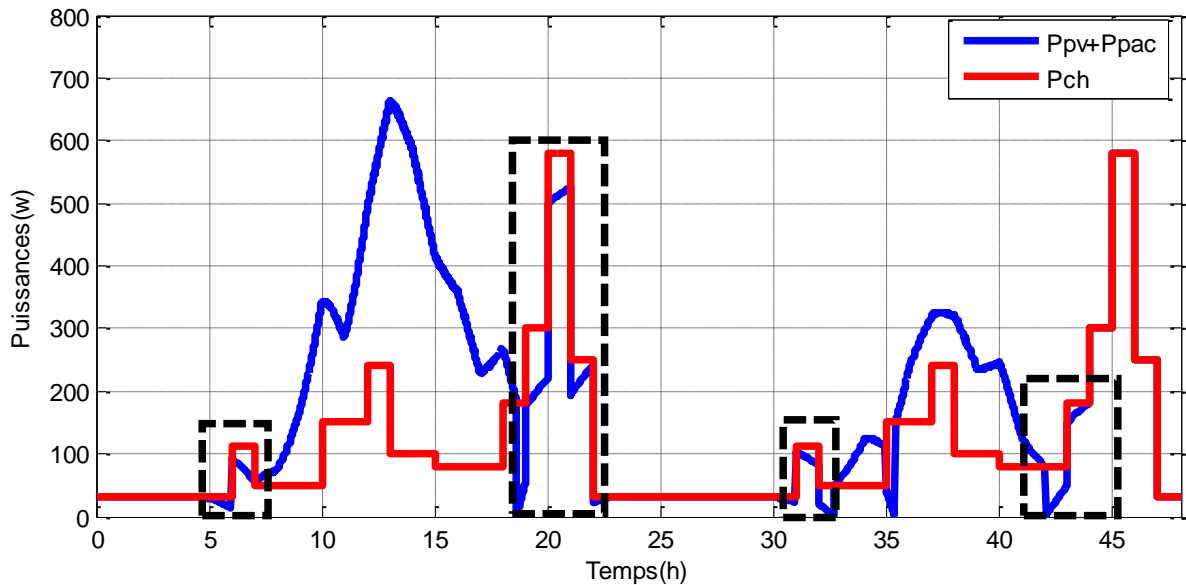


Figure 3-23: Comparaison entre la somme des puissances des différentes sources et la puissance de charge.

La figure (3-23) montre la comparaison entre les deux puissances de charge. On remarque que le système hybride PV/PAC ne satisfait pas la charge tout le temps, essentiellement entre [5h, 7h], [19h, 22h], [30.5h, 32h] et [42h, 43h] qui correspondent aux instants de faible ensoleillement.

3.4 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté deux systèmes différents (PV/Batterie, PV/PAC), ainsi que leurs dimensionnements et leurs résultats de simulation. L'utilisation d'un système de gestion permet de faire fonctionner le système dans les différentes conditions, avec la stratégie de contrôle qui a été établie, il détermine les différentes puissances disponibles et la puissance de charge demandée.

Les résultats montrent que les deux systèmes ne sont pas suffisants pour alimenter tout le temps la charge malgré un calcul de dimensionnement préalablement fait. Pour cela, nous proposons de combiner les trois sources afin d'alimenter la charge au maximum.

4.1 Introduction

Après avoir effectué deux tests de simulation sous Matlab/Simulink, nous avons remarqué que les systèmes PV/Batterie et PV/PAC ne peuvent pas satisfaire la charge. Alors comme solution nous avons proposé d'hybrider les trois sources. Dans ce chapitre, on va faire une gestion du système hybride PV/PAC/batterie sous Matlab/Simulink. En tenant compte que le dimensionnement du générateur photovoltaïque et de la charge ont été fait dans le chapitre précédent.

4.2 Description du système étudié

Pour tester l'efficacité de la stratégie de gestion de l'énergie proposée appliquée à un système d'énergie hybride, une simulation sous Matlab/Simulink sur une période de deux jours a été effectuée. La structure générale du système proposé est présentée dans la (figure 4-1).

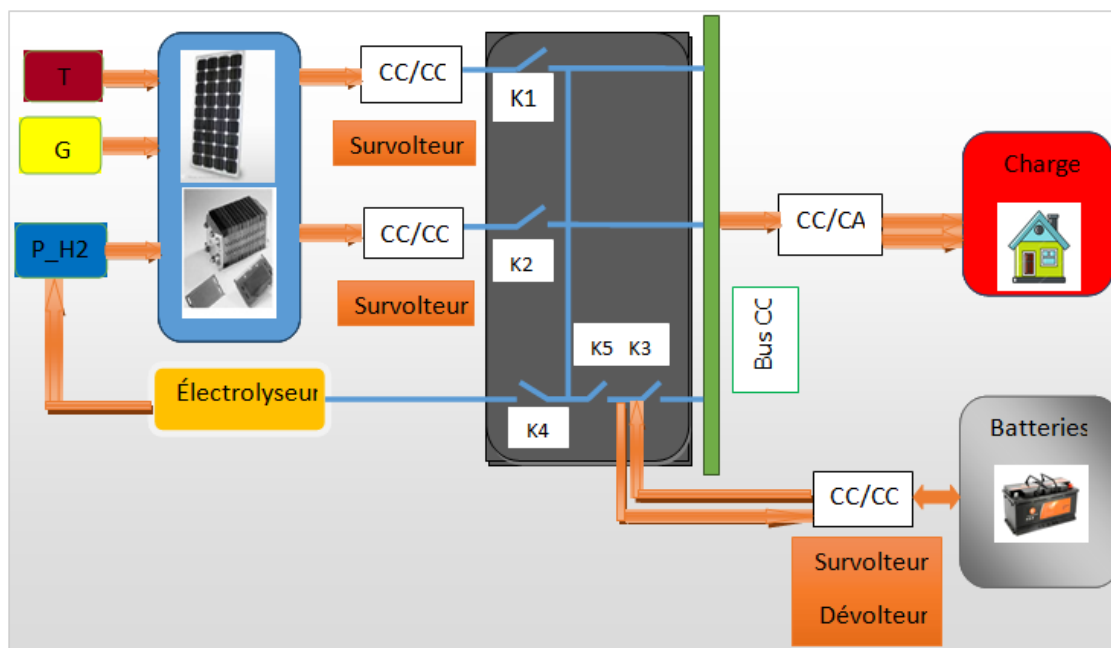


Figure 4-1: Structure générale du système proposé.

Remarque :

Pour la même charge que le chapitre précédent on a utilisés le même dimensionnement de générateur photovoltaïque par contre l'espace de stockage (nombre de batteries) et la surface des cellules de la pile ont diminués a la moitié grâce à l'hybridation de ces éléments (PV/Batteries/Pile à combustible)

Le tableau ci-dessous montre les différents états des interrupteurs et les modes produits

K ₁	K ₂	K ₃	K ₄	K ₅	P _{pv}	P _{pac}	P _{bat}	P _{elect}	P _{bat-ch}	P _{ch}	Modes
1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	P _{pv}	M1
1	0	0	1	1	1	0	0	1	1	P _{pv}	M2
1	0	0	0	1	1	0	0	0	1	P _{pv}	M3
1	0	0	1	0	1	0	0	1	0	P _{pv}	M4
1	1	1	0	0	1	1	1	0	0	P _{pv} +P _{batt} +P _{pac}	M5
0	1	1	0	0	0	1	1	0	0	P _{batt} +P _{pac}	M6

Tableau 4-1:L'état des interrupteurs et les différentes modes.

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

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

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

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

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

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

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

chargement des batteries.

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

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

chargement de réservoir d'hydrogène.

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

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

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

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

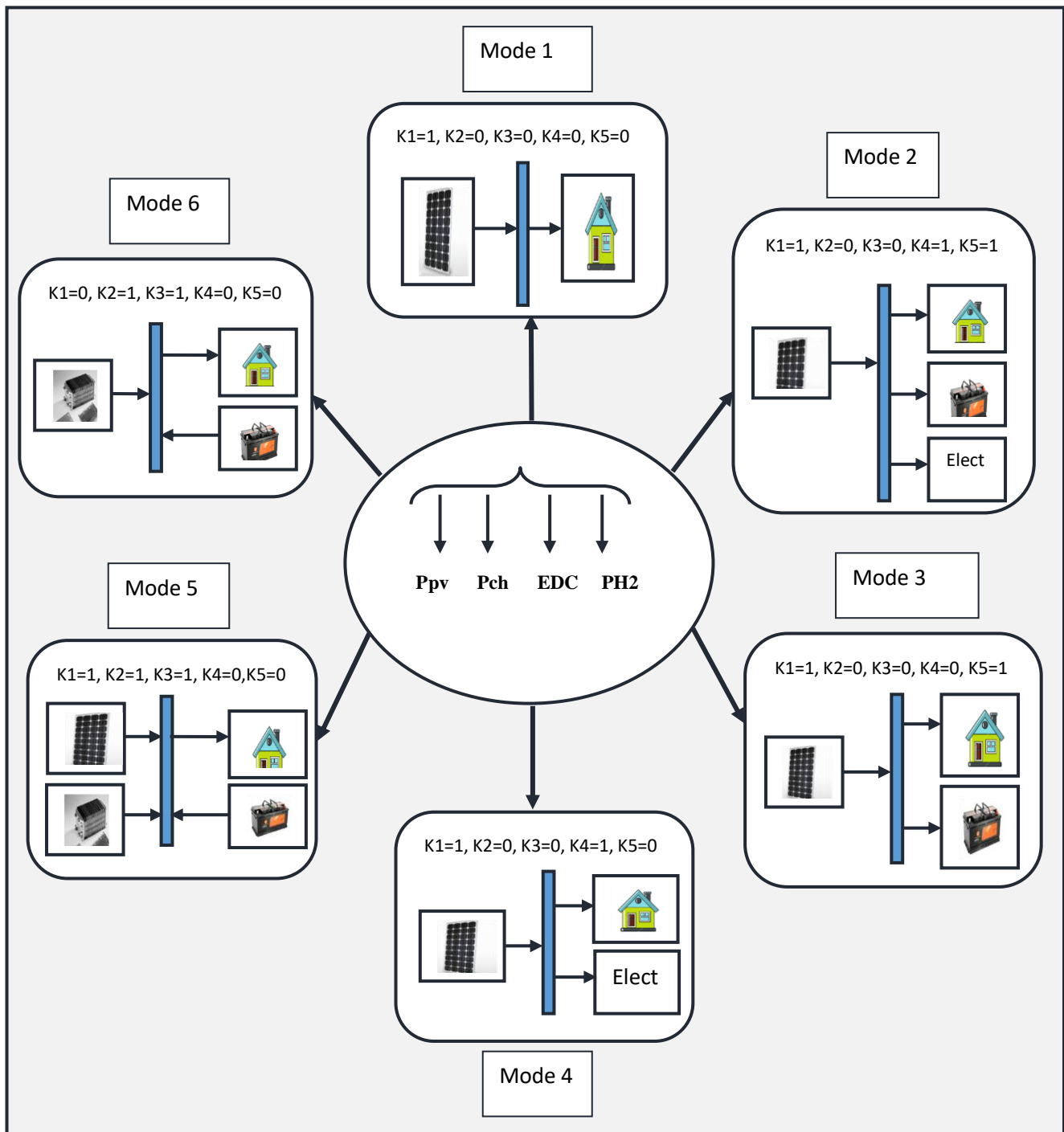


Figure 4-2 : Les différents modes de fonctionnement

4.3 Simulation du système :

Le schéma bloc du système hybride étudié sous Matlab/Simulink est présenté dans la figure (4-3).

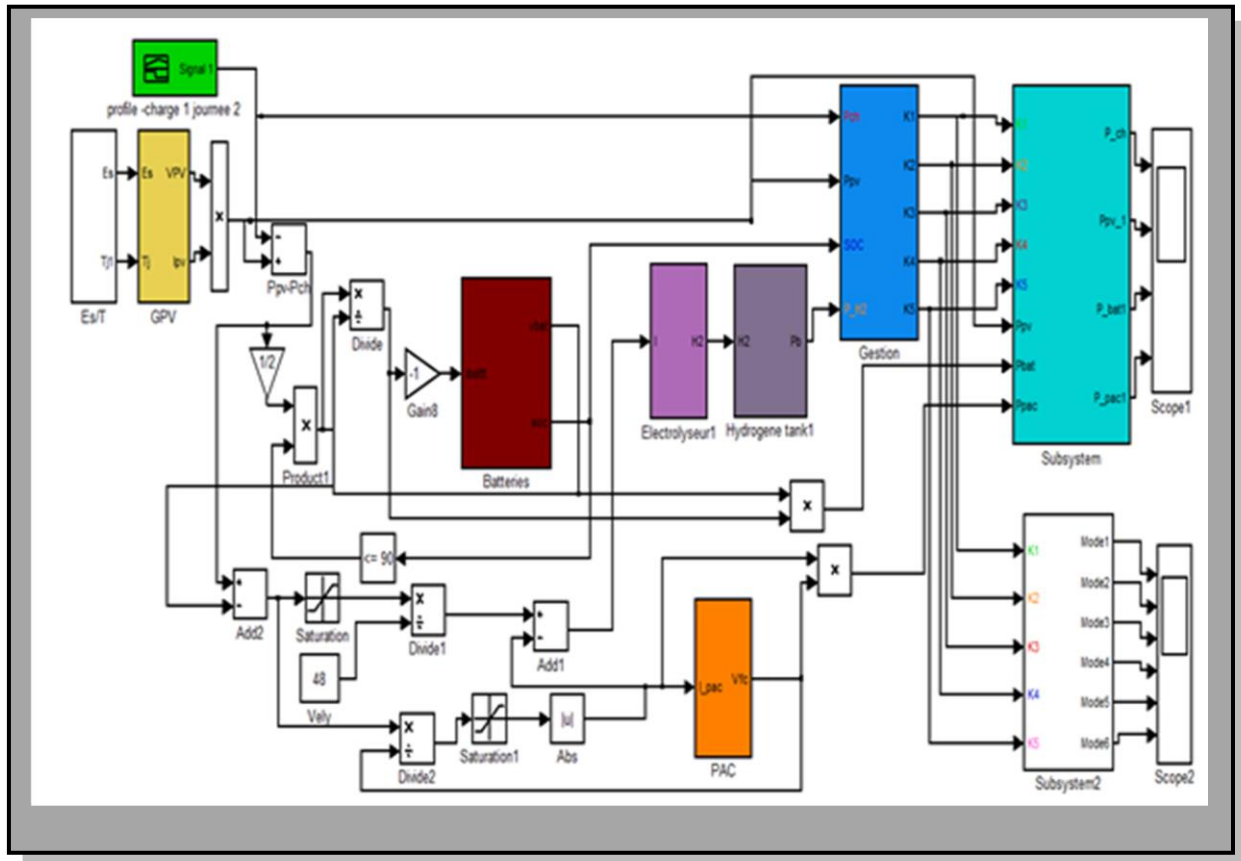
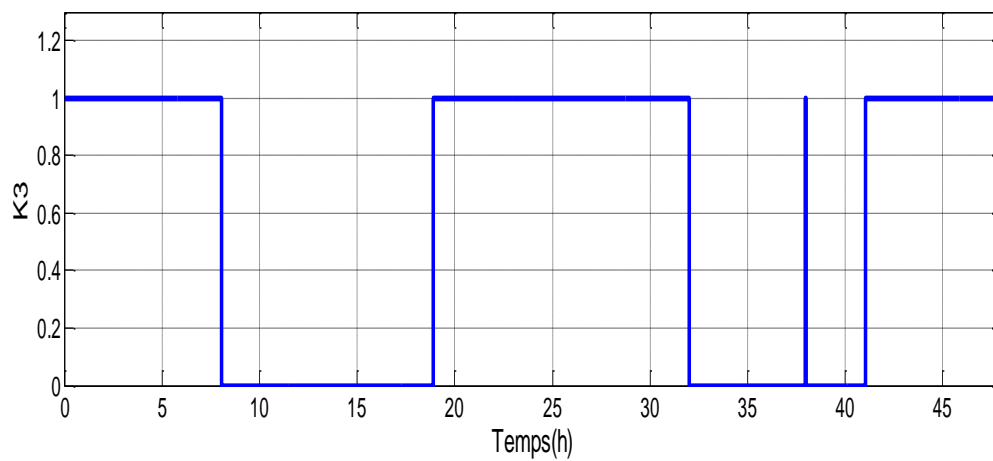
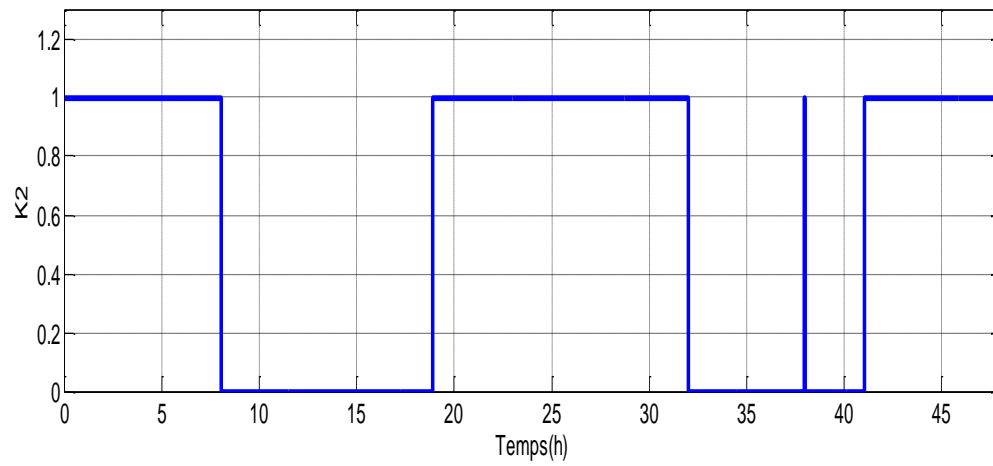
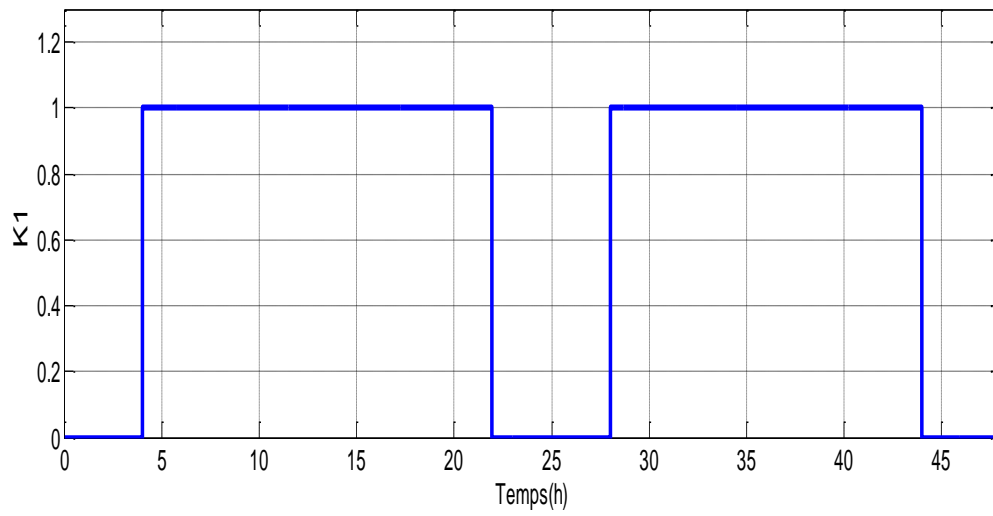


Figure 4-3 : Schéma bloc du système hybride PV/PAC/BATTERIES

Afin de vérifier la performance du notre système dans les différentes situations, des études de simulation ont été réalisées, pour tester la robustesse de la méthode proposée, on a chois les mêmes profils de la puissance de la charge, l'ensoleillement et la température que le chapitre précédant pendant deux jours différents.

4.3.1 Les résultats de simulation :

Les résultats obtenus par simulation Matlab/ simulink pour un fonctionnement sain sous les différents tests sont présentés sur les figures suivantes:



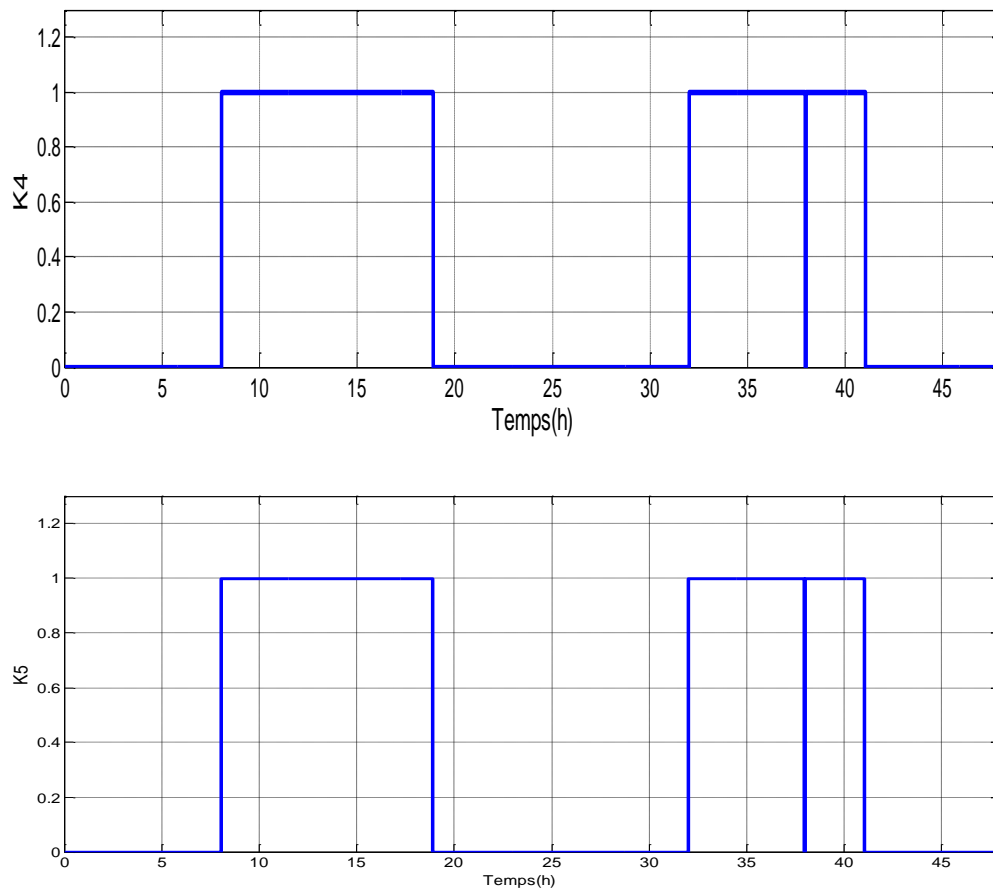


Figure 4-4: fonctionnement des interrupteurs K_1 ; K_2 ; K_3 ; K_4 et K_5 .

La figure (4-4) représente le fonctionnement des différents interrupteurs (K_1 ; K_2 ; K_3 ; K_4 et K_5).

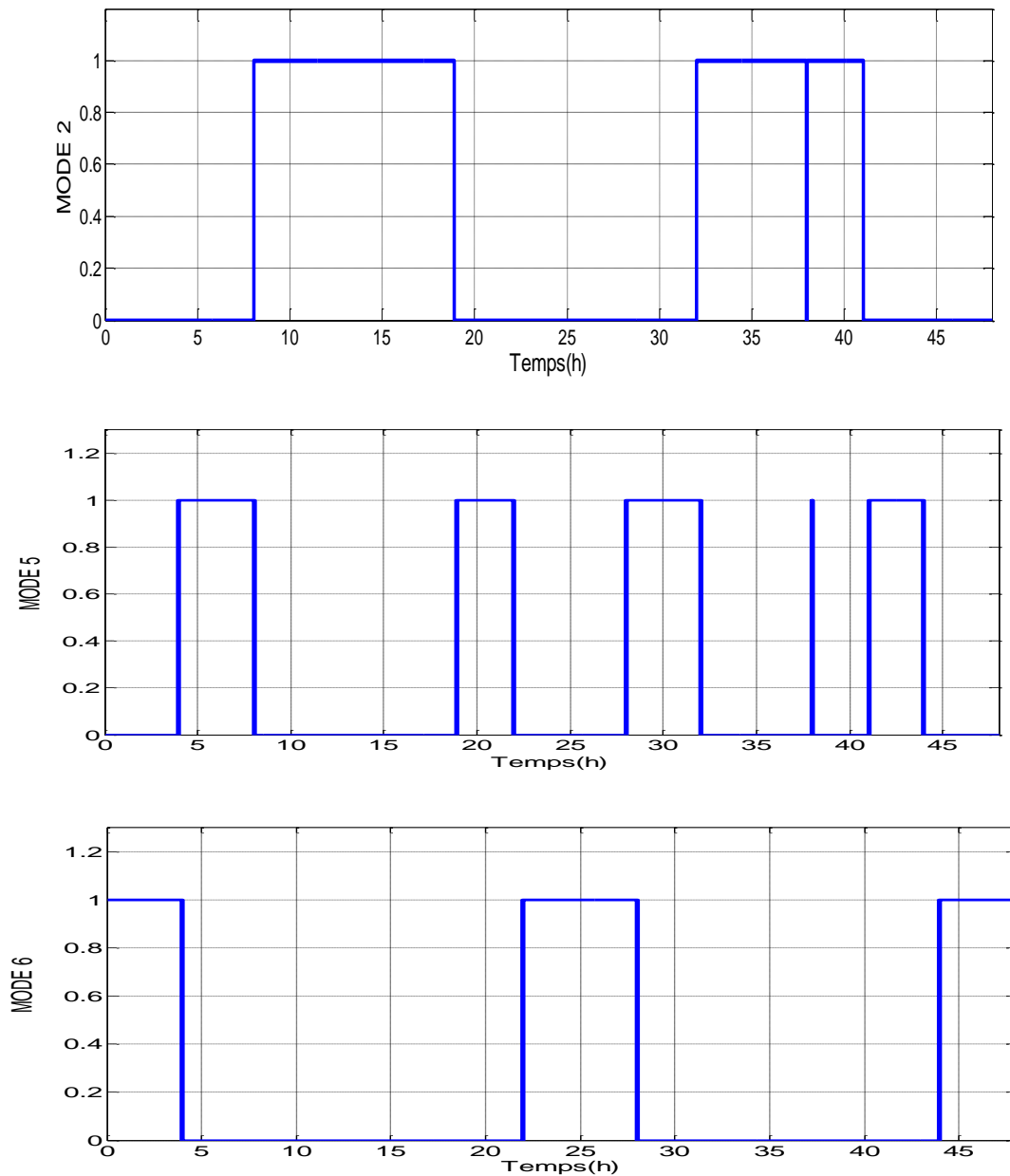


Figure 4-5: Les différents modes.

A partir des résultats de simulation obtenus dans la figure (4-5), nous constatons qu’au cours de ces deux jours, la source d’énergie renouvelable a été exploitée au maximum, les modes utilisées sont les modes 2, 5 et 6. Les modes 1, 3 et 4 ne sont pas produits car les batteries et réservoir d’hydrogène n’ont pas atteint leur maximum.

Les figures (4-6), (4-7) montrent respectivement la forme de la tension de la batterie et l’état de charge batteries, notant qu’elles ont la même forme.

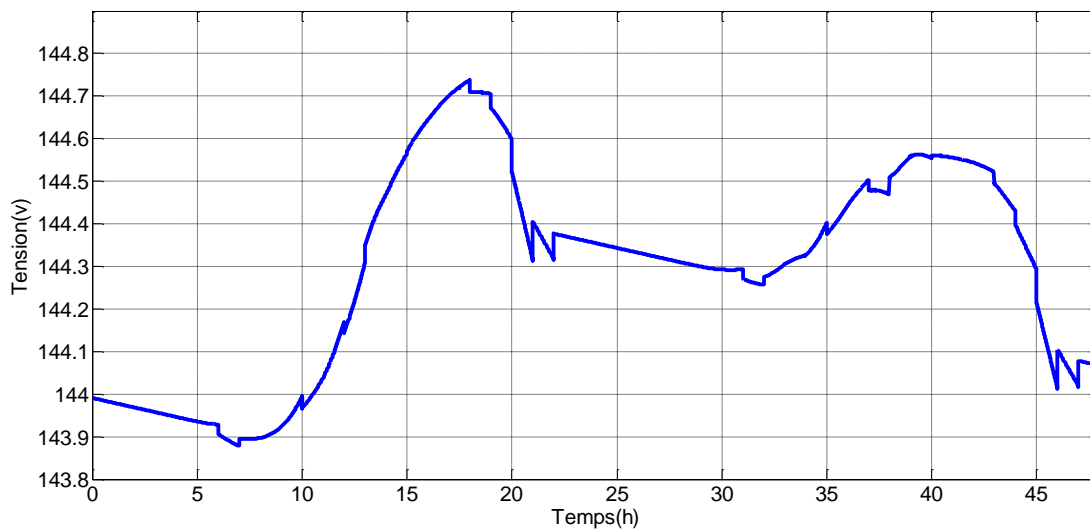


Figure 4-6: Allure de la tension des batteries.

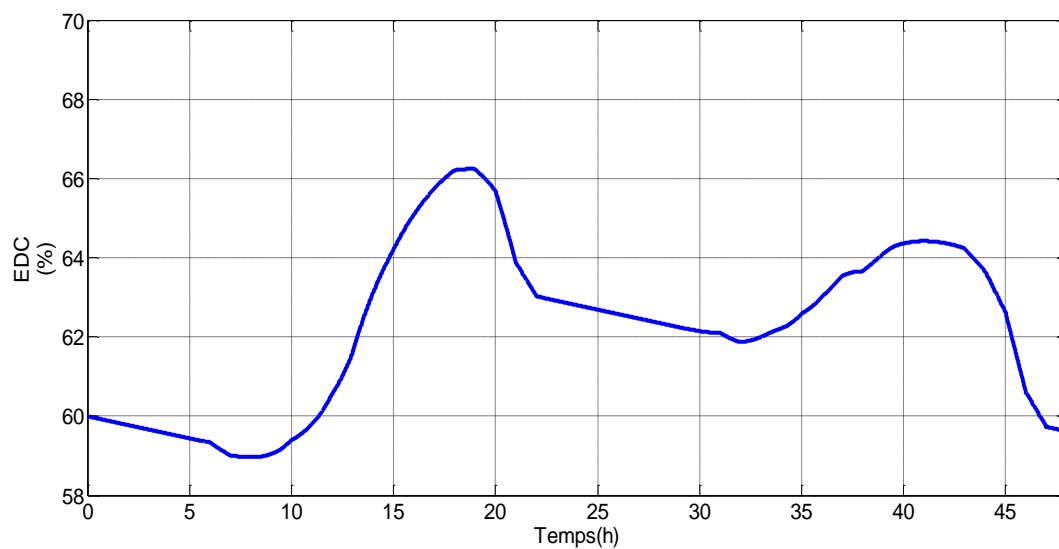


Figure 4-7: L'état de charge des batteries.

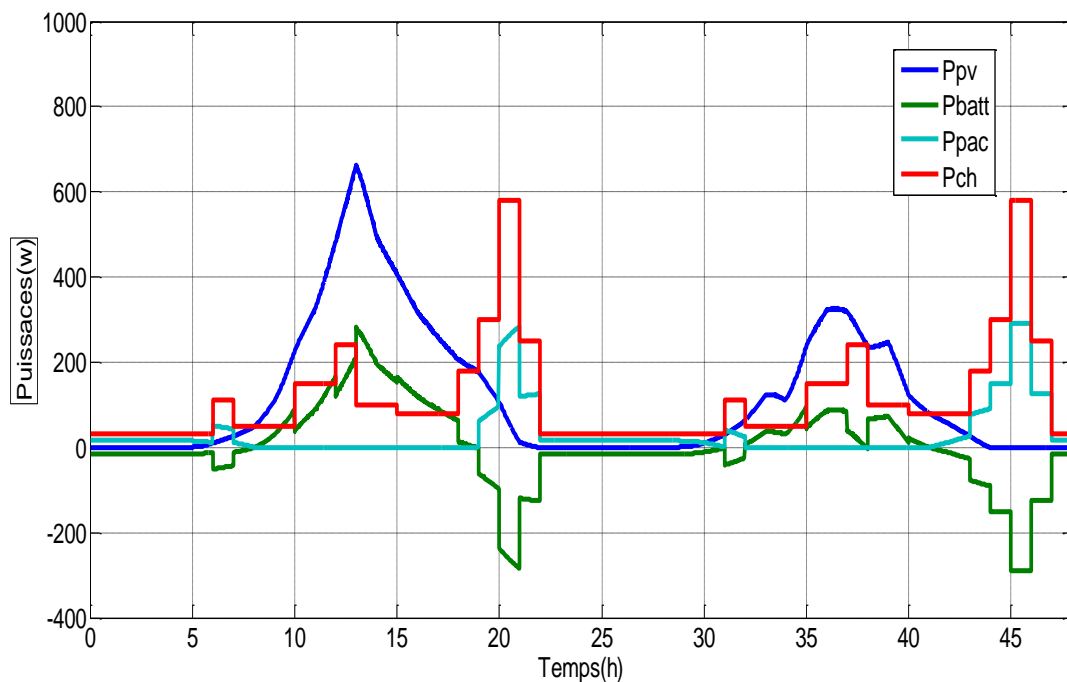


Figure 4-8: Allure des différentes puissances de système hybride.

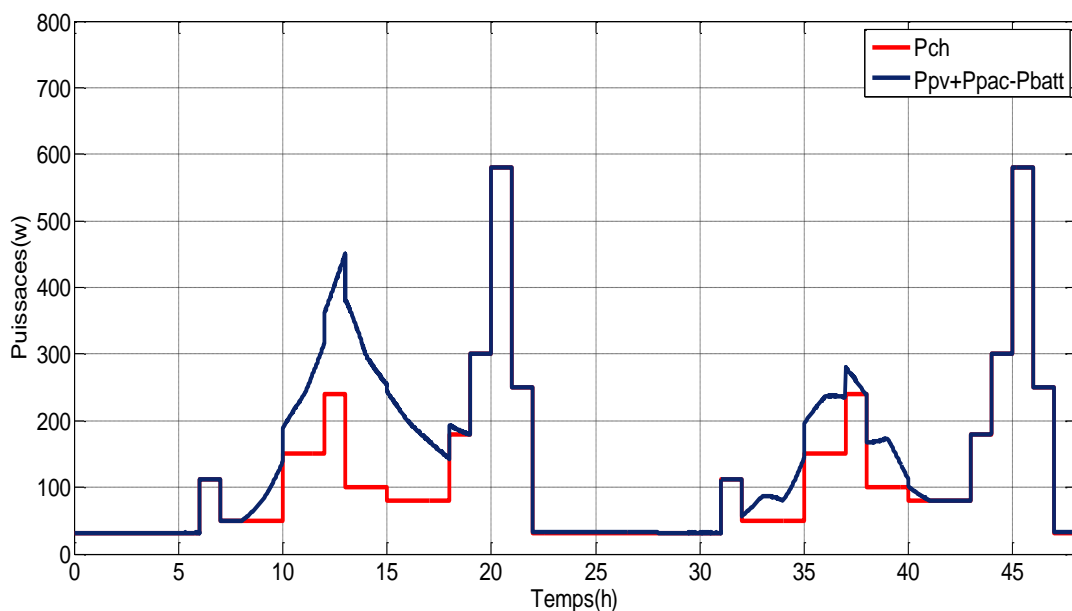


Figure 4-9: Comparaison entre la somme des puissances obtenues après gestion des différentes sources et la charge.

La figure (4-9) montre une comparaison entre la somme des puissances fournies par le système d'énergie hybride et la puissance de la charge imposée. La somme de ces puissances est supérieure à la puissance de la charge. A partir de ces résultats, on peut conclure que la méthode de gestion proposée à fonctionner correctement. De plus il a eu un excès qu'on peut utilisé à alimenter d'autres charges supplémentaires.

4.4 Conclusion

Dans ce chapitre, le dimensionnement d'un système hybride autonome (photovoltaïque, pile à combustible et batteries) a été effectué après l'estimation du potentiel énergétique et l'énergie demandée par l'utilisateur.

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

Conclusion générale

L'objectif du travail présenté dans ce mémoire est le dimensionnement et la simulation du fonctionnement du système hybride qui se compose d'un générateur photovoltaïque, d'une pile à combustible et d'un dispositif de stockage pour l'alimentation d'une maison.

Dans ce travail, nous avons étudié trois configurations différentes (PV/batteries), (PV/PAC) et PV/PAC/batteries. Pour chaque configuration un système de gestion a été proposé et appliqué. Nous avons remarqué que dans les deux premières configurations la charge n'a pas été satisfaite. Par contre dans la troisième configuration non seulement la charge a été satisfaite mais il y a eu même un excès de puissance. Ce qui montre le bon fonctionnement du système de gestion proposé.

Les résultats obtenus montrent que la gestion développée nous a permis, l'alimentation de la charge sans interruption et la protection des batteries des décharges profonde et des éventuelles surcharges.

Comme perspectives, nous souhaiterons :

- ❖ Utiliser le surplus d'énergie pour alimenter d'autres charges telle que le pompage de l'eau.
- ❖ Produire de l'hydrogène à partir d'énergies renouvelables pour alimenter la pile à combustible.
- ❖ Valider les résultats obtenus par des essais expérimentaux.
- ❖ Ajouter d'autres sources d'énergie à l'hybridation (comme l'éolien).

Références bibliographiques

- [1] Z. Roumila, « Etude d'un système hybride (Photovoltaïque- Eolien- Diesel)», Mémoire de Doctorat, Université Bejaia, 2017/2018.
- [2] L. Stoyanov, «Etude de différentes structures de systèmes hybrides à sources d'énergie renouvelables», Thèse de Doctorat de l'Université Technique de Sofia, 2011.
- [3] H. Khamtache, L. Moali, «Gestion de puissance d'un Système Hybride», Mémoire de fin d'études, Université de Bejaia, 2016/2017.
- [4] I. Vechiu, «Modélisation et analyse de l'intégration des énergies renouvelables dans un réseau autonome», Thèse de Doctorat de l'Université du Havre, France, 2005.
- [5] P.M. Koumba, «Etude d'intégration de sources d'énergie renouvelable à un réseau électrique autonome», Université du Québec, 2013.
- [6] L. Croci, « Gestion de l'énergie dans un système multi-sources photovoltaïque et éolien avec stockage hybride batteries/super-condensateurs », Thèse de Doctorat de l'université de Poitiers, 2013.
- [7] S. Belaid Maitre de conférence classe B, « Cours Energie Solaire Photovoltaïque », Université de Bejaia 2014/2015.
- [8] A. Litim «Application de la logique floue pour la poursuite du point de puissance maximale d'un générateur photovoltaïque», Mémoire fin d'études de l'université Saida.
- [9] M. Boudehouche, M. Ouennoughi, « Gestion d'un système photovoltaïque avec stockage», Mémoire de fin d'étude, Université de Bejaia, 2016.
- [10] F. Amrouche, B. Mahmah, M. Belhamel et H. Benmoussa, «Modélisation d'une Pile à Combustible PEMFC Alimentée Directement en Hydrogène-Oxygène et Validation Expérimentale», Revue des Energies Renouvelables, Vol. 8, N°2, pp. 109 – 120, 2005.
- [11] Safa Hakim, M. Elyaqouti, L. Bouhouch, and A. Moudden, «Comparaison de deux modèles de batterie utilisés dans les systèmes photovoltaïques».
- [12] Mohamed Albarghot, Mahmud Sasi and Luc Rolland, «MATLAB/Simulink Modeling and Experimental Results of a PEM Electrolyzer Powered by a Solar Panel».

Références bibliographiques

- [13] M. Belatel, F.Z. Aissous et F. Ferhat, «Contribution à l'étude d'une pile à combustible de type PEMFC utilisée pour la production d'énergie électrique verte», Revue des Energies Renouvelables, Vol. 15 N°1 (2012) 13 – 28.
- [14] Corinne Alonso, « Contribution à l'optimisation, la gestion et le traitement de l'énergie», UNIVERSITÉ PAUL SABATIER – TOULOUSE III, Décembre 2003.
- [15] N-O Cherchali , A. Morsli , M. S. Boucherit, L.Barazane and A. Tlemcani, « Application de la Logique Floue pour la Poursuite du Point de Puissance Maximale d'un Système Photovoltaïque », Laboratoire de Recherche en Electrotechnique et Automatique.
- [16] J.Royer, T.Djiako, E.Schiller et B.S.Sy, « Le pompage photovoltaïque manuel de cours à l'intention des ingénieurs et des techniciens », Université d'Otatawa , 1998.
- [17] Otman Benseddik, « Etude et optimisation du fonctionnement d'un système photovoltaïque », Mémoire de master2, Université Kasdi Merbah- Ouargla, 2012.
- [18] F. Slama, « Modélisation d'un système multi générateurs photovoltaïques interconnectés au réseau électrique », Mémoire de magister, Université Ferhat Abbas – Sétif, 2011.
- [19] L.Debou et D.Maghribi. « Commande d'un système hybride (photovoltaïque éolienne) de production d'énergie», Mémoire d'ingénieure d'état. Université de Bejaia, 2008.
- [20] R. Alkama. «Cours pile à combustible», université de Bejaia, 2018
- [21] I. Hacini, «Etude et gestion d'un système d'énergie hybride», Mémoire de Magister, Université de Bejaia, 2015.
- [22] «Alloprof-L'électrolyseur de l'eau», Consulté le 02/04 /2018.