



Université Mohamed Khider de Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de génie électrique

MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologies
Électrotechnique
Machine électrique

Réf. :

Présenté et soutenu par :
CHIKH BACHIR

Le : mercredi 22 juin 2022

Simulation et commande d'une source hybride (Pile à combustible-Batterie)

Jury :

Pr	Khaled YAHIA	Pr	Université de Biskra	Président
Dr	Messaoud MOHAMMEDI	MCB	Université de Biskra	Encadreur
Pr	Mohamed SAHRAOUI	Pr	Université de Biskra	Examineur



Université Mohamed Khider de Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de génie électrique

MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologies
Électrotechnique
Machine électrique

Réf. :

Simulation et commande d'une source hybride (Pile à combustible-Batterie)

Le :

Présenté par : Avis favorable de l'encadreur :

Signature Avis favorable du Président du Jury

Cachet et signature

Dédicace

*Parce qu'il a des choses plus faciles à écrire qu'à dire je dédie
ce*

A mes symboles d'affection et de tendresse

Ma chère « maman » et mon cher « père »

*A mes « frère » et mes chers « sœurs » chacun de son nom pour
leur soutien moral et leurs*

Sacrifices au long de ma formation

« A ma grand famille »

*A tous qui m'ont encouragé et aidé dans la réalisation de ce
projet*

Remerciements

Je remercie tout d'abord « DIEU » qui m'a donné la santé, le courage, la patience et la volonté durant toutes les années de mes études et m'avoir

permis la réalisation de ce présent travail.

J'en profite pour exprimer ma sincère gratitude à mon modérateur « Dr. Massoud Mohammadi » à l'Université de Biskra. Pour ses précieux conseils, ses encouragements et ses discussions techniques innovantes et pour m'avoir fourni toutes les facilités nécessaires tout au long de ce travail. Cela n'aurait pas été possible sans sa motivation et son soutien sans fin, et j'exprime ma plus profonde gratitude aux membres estimés du jury qui ont accepté de juger ce travail. Je tiens à remercier le «Dr. Yahia Khaled » de l'Université de Biskra, qui m'a fait l'honneur de présider le jury de cette thèse. Je tiens également à remercier « Dr. Mohamed Sahraoui » pour la discussion de cette thèse. Je tiens à remercier toute la faculté et l'administration du Laboratoire de génie électrique de Biskra « LMSE » ainsi que tous mes collègues et amis du fond du cœur et toutes les personnes qui m'ont aidé de près ou de loin à faire ce travail.

RESUME

Face au développement rapide des nouvelles technologies et des installations sensibles qui consomment sans interruption une électricité de qualité, l'alimentation électrique sans interruption connaît aujourd'hui une croissance exponentielle, notamment avec le nouvel élan des énergies renouvelables ces dernières années, qui a émergé des systèmes hybrides. Dans ce contexte, nous sommes passés à l'étude des sources d'énergie hybrides. Ledit système se compose de deux sources d'énergie, à savoir une batterie et une pile à combustible.

Dans ce travail, un élément de contrôle basé sur le concept de planéité est utilisé où une boucle d'énergie est utilisée pour contrôler le flux d'énergie dispersée à partir de différentes sources stables (gestion de l'énergie).

Table des matières

chapitre 1 : Généralité sur les sources (théories ,types, modèles mathématiques)		
1.1	Introduction	2
1.2	Pile à combustible	2
1.2.1	Historique	2
1.2.2	Définition	3
1.2.3	Principes de fonctionnemen	4
1.2.4	Différents types de piles à combustible	5
1.2.5	Paramètres agissant sur la dégradation des piles à combustible	6
1.2.6	Caractéristique électrique de la pile à combustible	7
1.2.7	Domaines d'applications des piles PEM	9
1.2.8	Avantages et inconvénients des piles à combustible de type PEM	10
1.2.8.1	Avantages des piles à combustible de type PEM	10
1.2.8.2	Inconvénients des piles à combustible de type PEM	11
1.3	Batteries	11
1.3.1	Définition	11
1.3.2	Principe de fonctionnement	12
1.3.3	Les différents types de batteries	13
1.3.4	Modélisation des batteries	13
1.3.5	Modèle électrique des batteries "Modèle de Thévenin"	14
1.3.6	Paramètres de charge et de décharge	15
1.3.6.1	Etat de charge des batteries	15
1.3.6.2	Profondeur de la décharge de la batterie	16
1.4	Conclusion	16

chapitre 2 :Généralité sur les systèmes hybrides		
2.1	Introduction	18
2.2	Généralité sur le système hybride	18
2.2.1	Définition	18
2.2.2	Classification	19
2.2.2.1	Régime du fonctionnement	19
2.2.2.2	Structure du système hybride	19
2.3	Systèmes hybride autonomes d'énergie	22
2.3.1	Energie solaire photovoltaïque	23
2.3.1.1	Cellule photovoltaïque	23
2.3.1.2	Module photovoltaïque	23
2.3.2	Energie éolienne	24
2.3.2.1	Différents types d'éoliennes	25
2.3.3	Classifications des systèmes d'énergies hybrides	26
2.3.3.1	Système d'énergie hybride autonome	26
2.3.3.2	Système d'énergie hybride connectes au réseau	26
2.3.4	Configurations de bus dans les systèmes hybrides	26
2.3.4.1	Architecture à bus DC	26
2.3.4.2	Architecture à bus AC	27
2.3.4.3	Architecture mixte (DC&AC)	28
2.3.5	Les convertisseurs statiques	28
2.3.5.1	Convertisseur DC/DC (hacheur)	28
2.3.5.2	Convertisseur DC/AC (onduleur)	28
2.3.5.3	Convertisseur AC/DC (Redresseur)	29
2.4	Modélisation du système hybride étudié (pile à combustible et batterie)	29
2.4.1	Architecture avec deux convertisseurs	30
2.5	Conclusion	33

Chapitre3 :Modélisation et simulation du système étudié		
3.1	Introduction	35
3.2	Modulation du système étudié	35
3.2.1	Les Convertisseur	36
3.2.1.1	Convertisseur_Boost	36
3.2.1.2	Convertisseur Buck-Boost	38
3.2.2	Définition d'un système platitude	41
3.2.3	Modèle mathématique du système hybride	42
3.2.4	Régulation de l'énergie du système hybride et planification de la trajectoire de référence	42
3.2.5	Démonstration de la platitude du système hybride proposée	44
3.2.6	Contrôle des convertisseurs Asservissement des trajectoires à leur référence	46
3.3	Résulta et simulation le système étude	48
3.4	Conclusion	53

Liste des figures

Chapitre1 :

Figure 1.1 : L'expérience de Sir William Grove

Figure 1.2 : pile à combustible

Figure 1.3: principe de la réaction catalytique dans l'électrode volumique

Figure 1.4 : schéma de principe d'une pile à combustible PEM

Figure 1.5 : Courbe de polarisation classique d'une cellule de pile à combustible PEM

Figure 1.6 : Modèle simple de pile à combustible

Figure 1.7 : Décharge/charge d'un Batterie électrochimique (W.P)

Figure 1.8 : Modèle simple d'une batterie

Figure 1.9 : Circuit électrique du Modèle Thévenin

Chapitre2 :

Figure 2.1: Structure générale d'un système électrique hybride

Figure 2.2 : Classification des systèmes hybrides

Figure 2.3 : Architecture 1: PàC avec *Bus DC*

Figure 2.4 : Architecture 2: PàC avec Convertisseur avec *Bus DC*

Figure 2.5 : Architecture 3 : PàC avec Convertisseur avec *Bus DC* Source stockage avec Convertisseur avec *Bus DC*

Figure 2.6 : Schéma général du système d'énergie hybride

Figure 2.7 : La structure d'une cellule photovoltaïque

Figure 2.8 : Les composantes d'un champ photovoltaïques

Figure 2.9 : Les composantes de l'aérogénérateur

Figure 2.10 : conversion de l'émerger cinétique du vent

Figure 2.11 :Structure à bus DC d'un système hybride

Figure 2.12 : Structure à bus AC d'un système hybride

Figure 2.13 : Structure à bus mixte (DC& AC) d'un système hybride

Figure 2.14: Schéma de principe de l'hybridation directe d'une PàC et d'une batterie

Figure 2.15 : Architecture de la source hybride PàC/Batterie

Figure 2.16: Schémas équivalents du convertisseur de la PàC en mode de conduction continue

Chapitre3 :

Figure 3.1: Architecture du système hybride étude

Figure 3.2 : Différents constituants du système hybride pile à combustible et batterie

Figure 3.3 : Convertisseur Boost

Figure 3.4: Topologies du Convertisseur Boost

Figure 3.5 : Convertisseur Buck-Boost

Figure 3.6 : Topologies du Convertisseur Buck-Boost

Figure 3.7 : Fonction de transfert statique du convertisseur Buck-Boost

Figure 3.8 : commande du Buck-boost

Figure 3.9 : Schéma bloc du asservissement de trajectoire

Figure 3.10 : Schéma bloc du asservissement de trajectoire2

Figure 3.11 : Schéma de simulation du système études

Figure 3.12 : Allure du V_{Bus} et sa référence

Figure 3.13 : (A) Allure de la tension de batterie / (B) Allure du courant de batterie et sa référence

Figure 3.14 : (A) Allure de la tension de pile à combustible / (B) Allure du courant de pile à combustible et sa référence

Figure 3.15 : Allure du transfert de puissances de $P_{CH} / P_{Bat} / P_{FC}$

Figure 3.16 : (A) Commande du convertisseur Boost du pile à combustible / (B) Commande du convertisseur Buck-Boost du batterie

Liste des Tableaux

Chapitre1 :

Tableau 1.1 : Différents types de piles à combustible

Tableau 1.2 Paramètres agissant sur les dégradations des Piles à combustible

Tableau 1.3: Matériaux constituant les principaux accumulateurs électrochimiques

Chapitre3 :

Tableau 3.1 : Paramètre de la pile à combustible

Tableau 3.2 : Paramètre de la batterie utilisée

INTRODUCTION GÉNÉRALE

INTRODUCTION GÉNÉRALE

La consommation mondiale d'énergie est étroitement liée à la population. L'augmentation de la population mondiale ainsi que l'activité industrielle dans les pays en développement ont entraîné une explosion des besoins énergétiques. L'exploitation excessive des ressources fossiles pour répondre à ces besoins est la principale cause de rejet de gaz polluants. Des études environnementales ont prouvé que l'augmentation de la consommation d'énergie s'accompagne d'une augmentation massive de l'émission de gaz toxiques dans l'atmosphère, à l'origine de la pollution de l'air et de l'eau. Dans cette situation, les chercheurs et les travailleurs dans ce domaine ont commencé à s'orienter vers des sources et des méthodes de production renouvelables et environnementales, et l'exploitation des énergies propres sur terre, telles que l'énergie solaire, hydroélectrique, éolienne, géothermique...etc. Viser à réduire la demande d'énergie des sources traditionnelles. En conséquence, une ville propre et durable.

Ces dernières années, l'utilisation de systèmes électriques hybrides a progressé dans de nombreux secteurs industriels tels que les systèmes embarqués (voitures, bateaux, avions, etc.), les alimentations électroniques (ordinateurs portables, téléphones portables, lecteurs portables, etc.) obstétrique. Dans un avenir proche, l'utilisation de systèmes électriques hybrides deviendra de plus en plus importante, et ce phénomène s'explique par la réduction de la production de pétrole et la demande de réduction des émissions de gaz dangereux. Le plus souvent, diverses sources électriques telles que des systèmes photovoltaïques, des piles à combustible ou des éoliennes, et des dispositifs de stockage tels que des batteries sont présentes en grand nombre dans ce type de système. De toutes les sources d'énergie disponibles, les piles à combustible, les systèmes photovoltaïques et les éoliennes ont les énergies spécifiques les plus élevées.

Un système hybride est un système qui utilise au moins deux sources d'énergie différentes pour fonctionner. Dans ce travail, nous proposons d'étudier un système électrique hybride composé de deux sources d'énergie (pile à combustible) et d'un dispositif de stockage (batterie). L'utilisation de dispositifs de stockage dans le système est devenue nécessaire du fait des limitations liées aux sources utilisées, elles coupent l'alimentation électrique dans le cas des piles à combustible et des limitations dynamiques imposées par les sources électrochimiques. Pour connecter les sources électriques principales et auxiliaires à un système hybride-électrique, nous utilisons des transformateurs fixes qui sont devenus un élément essentiel des équipements de conversion de puissance au cours des dernières décennies.

Ce mémoire propose une stratégie de contrôle pour piloter une source hybride composée d'une pile à combustible comme source primaire et batterie qui joue le rôle d'une source secondaire de stockage. Les deux sources d'énergie sont connectées au bus continu via deux convertisseurs DC/DC : BOOST et BACK-BOOST.

Dans ce travail , une commande basée sur la notion de platitude dans laquelle une boucle d'énergie est utilisée pour contrôler le flux d'énergie entre les différentes sources est la charge (gestion de l'énergie) .Les signaux de commande des convertisseurs sont générés par des régulateurs PI où leurs consignes viennent des la commande basée sur la platitude.

Dans le premier chapitre, nous avons examiné les éléments de base qui composent notre système hybride : piles à combustible, batteries.

Dans le deuxième chapitre, nous avons présenté plusieurs structures et méthodes de contrôle différentes utilisées pour contrôler les systèmes hybrides.

Dans le troisième chapitre nous simulerons le modèle mathématique de notre système hybride étudié.

Chapitre 1

Généralité sur les piles à combustible et les batteries

1.1 Introduction :

Durant les dernières décennies, l'exploitation des ressources renouvelables s'avère une solution pertinente permettant de remplacer les sources fossiles d'une manière partielle ou totale. En effet, l'intérêt de ces ressources réside à la fois dans leur caractère inépuisable et leur comportement respectueux de l'environnement.

Dans ce premier chapitre nous allons présenter brièvement l'analyse et le principe de fonctionnement des différents types de sources électriques d'un système hybride. Nous analyserons aussi leurs caractéristiques physiques et électrique, leurs limitations et modèles ainsi que leurs avantages et inconvénients.

Dans ce travail, les éléments fondamentaux qui constituent notre système hybride sont :les piles à combustible et les batteries.

1.2 Piles à combustible :

1.2.1 Historique :

La pile à combustible (PAC) convertit de l'énergie chimique en énergie électrique. Sa technologie est devenue de plus en plus familière aux cours des dernières décennies mais a pourtant été découverte il y a plus de 150 ans. En 1839, Sir William Grove, un juriste anglais et chercheur amateur en chimie, décrit une expérience où de l'eau et de l'électricité sont produites à partir d'oxygène et d'hydrogène. L'expérience de Grove donne naissance à la batterie à gaz (**Figure 1.1**), rebaptisée plus tard pile à combustible [1].

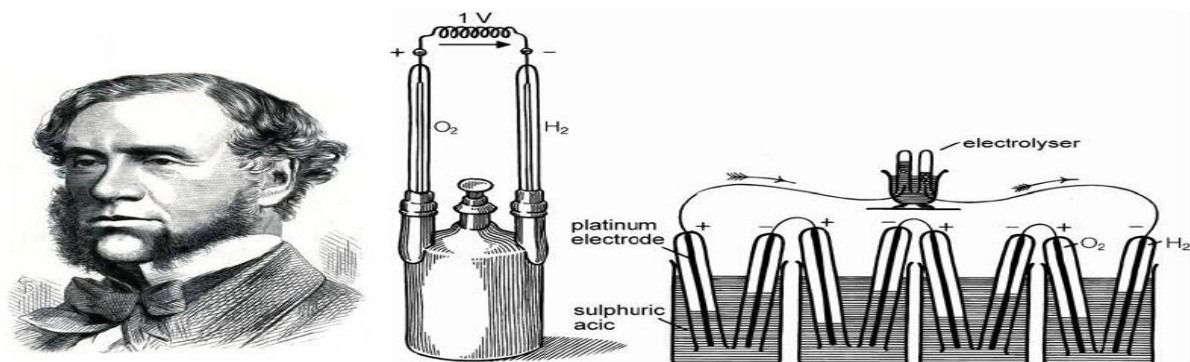


Figure 1.1 : L'expérience de Sir William Grove

La découverte de W. Grove, en revanche, a été ignorée et reléguée au statut de curiosité savante, alors que l'extraction des combustibles fossiles et le développement du moteur thermique battaient leur plein. Le docteur Francis Bacon a repris l'étude de W. Grove en 1932 et

a réussi à créer une pile à combustible de 5 kW en 1959. La NASA (National Aeronautics and Space Administration, États-Unis) cherchait une technique pour générer de l'électricité à bord de ses engins spatiaux lorsque la pile à combustible a été inventée. En raison de la présence d'oxygène et d'hydrogène dans les systèmes de propulsion, la pile à combustible apparaît comme un excellent dispositif. La capsule Gemini a utilisé avec succès des piles à combustible en 1964.

L'intérêt de l'utilisation de la pile à combustible dans le domaine des transports remonte à 1973. La première crise pétrolière a conduit les gouvernements, les industries et les laboratoires à chercher une alternative aux énergies fossiles pour tenter de s'assurer une indépendance énergétique [2].

1.2.2 Définition :

Par définition, la pile à combustible produit l'électricité à partir d'une réaction chimique due au passage d'un gaz riche en hydrogène à travers une anode et d'oxygène (ou d'air) à travers une cathode avec un électrolyte entre l'anode et la cathode qui permet l'échange des charges électriques (ions). Le flux d'ions à travers l'électrolyte produit un courant électrique dans un circuit externe vers une charge [3].

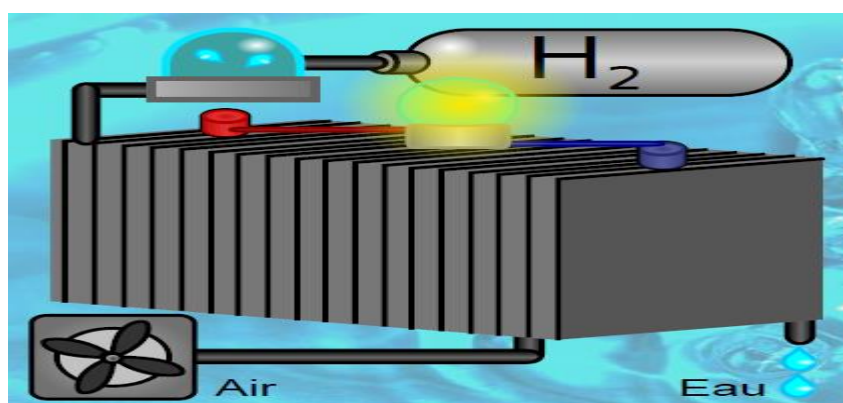


Figure 1.2 : pile à combustible

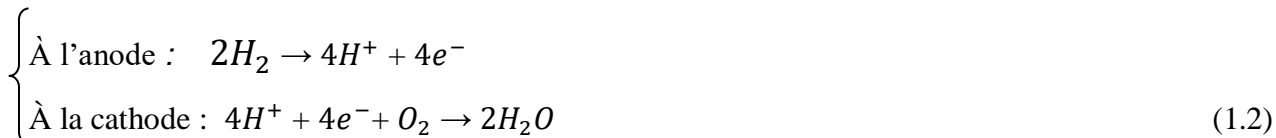
1.2.3 Principes de fonctionnement :

Une pile à combustible est un dispositif de conversion d'énergie qui convertit l'énergie chimique directement en énergie électrique sans aucun processus thermique ou mécanique. Le principe de fonctionnement d'une pile à combustible est décrit par une relation chimique. Cette réaction chimique est une oxydoréduction électrochimique. Elle fait réagir l'hydrogène et l'oxygène pour produire de l'électricité, de l'eau et de la chaleur, selon la réaction chimique globale suivante



Cette réaction s'opère au sein d'une structure essentiellement composée de deux électrodes (l'anode et la cathode) qui seront les conducteurs électroniques, séparées par un électrolyte solide qui sera le conducteur protonique.

Plus précisément, les réactions suivantes interviennent aux deux électrodes :



Ces réactions d'oxydation de l'hydrogène (à l'anode) et de réduction de l'oxygène (à la cathode) s'effectuent à l'interface électrolyte/électrode en présence d'un catalyseur (platine) . en des points appelés "points triples" (**Figure 1.3**).

En ces points, nous trouvons, autour de la particule de catalyseur :

- Une continuité physique avec l'électrolyte pour assurer la conduction des proto H^+ .
- Une continuité physique avec le conducteur électronique qu'est l'électrode, pour assurer la conduction des électrons e^- .
- Une structure poreuse capable d'assurer la diffusion de l'hydrogène ou de l'oxygène moléculaire.
- Une structure hydrophobe pour assurer l'élimination de l'eau formée, dans le cas de la cathode.
- Une structure thermiquement conductrice pour assurer l'évacuation de la chaleur de réaction [4].

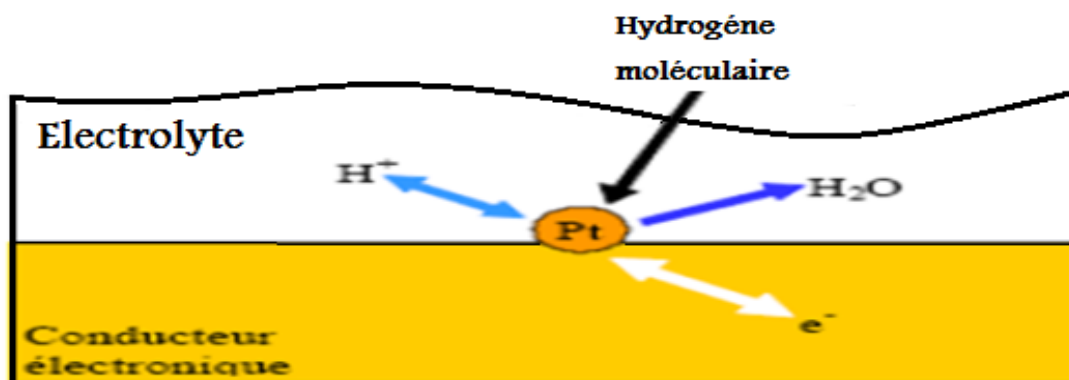


Figure 1.3: principe de la réaction catalytique dans l'électrode volumique

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

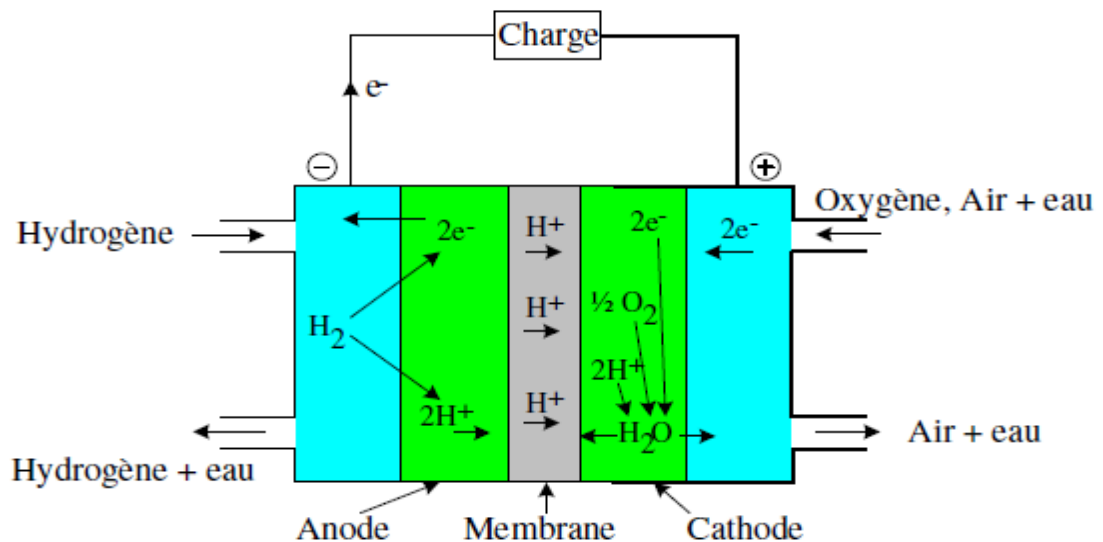


Figure 1.4 : schéma de principe d'une pile à combustible PEM [5].

1.2.4 Différents types de piles à combustible :

C'est l'électrolyte utilisé qui différencie les piles à combustible et qui donne leur nom aux grandes familles de piles. La température de fonctionnement est aussi un facteur de différenciation et l'on parle de piles à combustible basse température ou haute température. En pratique plus la température de fonctionnement est basse, plus le système est simple à utiliser. Mais en contrepartie plus les catalyseurs sont onéreux et plus le carburant doit être riche en hydrogène [5].

Les principaux types de pile à combustible sont les suivants:

- pile alcaline AFC
- pile à membrane échangeuse de protons PEMFC
- pile à méthanol direct DMFC
- pile à acide phosphorique PAFC
- pile à carbonate fondue MCFC
- pile à électrolyte solide SOFC

Les principales caractéristiques et propriétés de ces différentes piles sont rappelées dans le tableau 1 :

	PEMFC	AFC	PAFC	MCFC	SOFC	DMFC
Electrolyte	Polymère conducteur de protons	Solution alcaline	Acide phosphorique	Carbonate fondu	Céramique	Polymère conducteur de protons
Catalyseur	Platine	Platine	Platine	Nickel et l'oxyde de nickel	Carma nickel-zircon	platine
Rendement électrique pile en (%)	35-40	60-70	50	65	45-65	20-30
Champs d'applications	Automobile cogénération	Applications spatiales	Cogénération	Cogénération	Cogénération	Applications mobiles

Tableau 1.1 : Différents types de piles à combustible

1.2.5 Paramètres agissant sur la dégradation des piles à combustible :

La mauvaise gestion de l'eau et la chaleur produite par la pile lors de son fonctionnement peut affecter sa durée vie et ses performances sur un long terme. En effet, le taux de dégradation de la pile peut augmenter en fonction de certains paramètres tels que la température (augmentation jusqu'à 90 °C ou diminution jusqu'à -20 °C), la diminution de l'humidité relative, et l'augmentation du courant de sortie la cellule. (Le Tab 1-2) résume les principaux paramètres agissant sur les performances des piles à combustible PEM [6].

paramètres	influence
Augmentation de la Température (°C)	<ul style="list-style-type: none"> • A des température très élevées 90°C la puissance de sortie de la pile commence a diminuer • Diminution de la conductivité protonique(les proton H+) • La vitesse des réaction de vient plus importante
Diminution de la (°C)	<ul style="list-style-type: none"> • Solidification de l'eau • Dégradation de la MEA (Membrane Electrode Assembly)

	<ul style="list-style-type: none"> • diminution de la conductivité jusqu'à 30%
Faible Humidité Relative (RH)	<ul style="list-style-type: none"> • Contrainte mécanique au niveau de la cellule Corrosion de la couche du carbone • Augmentation de la taille des particules du platine (PT) • Diminution de taux de dissolution du platine
Augmentation de la densité du courante de la cellule	<ul style="list-style-type: none"> • Augmentation de la quantité de l'eau formée • Accélération de la corrosion des électrodes

Tableau 1.2 : Paramètres agissant sur les dégradations des Piles à combustible

1.2.6 Caractéristique électrique de la pile à combustible :

La tension à vide de la cellule (**Figure 1.5**) est fonction du potentiel électrochimique de la réaction d'oxydoréduction. Idéalement, ce potentiel électrochimique est de 1,23V (potentiel standard) pour des conditions standard de température et de pression (1 atm, 25 °C). En pratique, la tension à vide se situe légèrement en dessous de 1 V .

La courbe de polarisation est la caractéristique électrique d'une pile à combustible. Elle représente la tension de la cellule en fonction de la densité de courant (**Figure 1.5**) et dépend de la température de fonctionnement, de la pression des réactifs et du taux d'humidité de la membrane. La densité courant i_{PAC} (A/cm²) est définie par:

$$i_{PAC} = I_{PAC} / A_{cell} \tag{1.3}$$

avec I_{PAC} le courant de la pile a combustible et A_{cell} la surface d'une membrane .

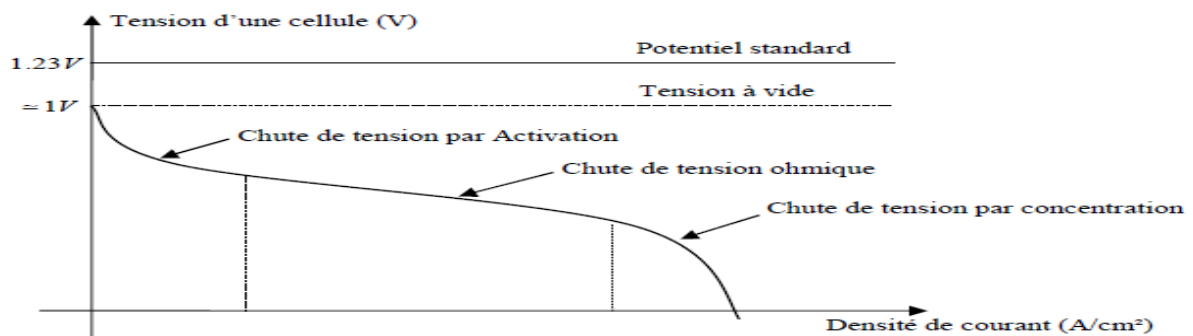


Figure 1.5 : Courbe de polarisation classique d'une cellule de pile à combustible PEM

La courbe de polarisation (**Figure 1.5**) peut être décomposée en 3 zones distinctes, chacune caractérisée par des chutes de tension prépondérantes :

- Chute de tension par activation : La réaction électrochimique doit franchir un seuil d'activation pour s'initier. La couche de catalyseur présente dans les électrodes aide à accélérer la réaction.
- Chute de tension ohmique : Les chutes de tension ohmiques sont causées par la résistance électrique de la membrane et par la résistance électrique de l'ensemble électrodes/plaques bipolaires.
- Chute de tension par 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.

La courbe de polarisation à la (**Figure 1.5**) est donnée pour une cellule élémentaire. De manière classique, en faisant l'hypothèse que toutes les cellules ont un comportement électrique identique, la tension totale de la pile à combustible V_{PAC} est donnée par :

$$\text{➤ } V_{PAC}(I_{PAC}) = N_{cell} \times V_{cell}(I_{PAC}) \quad (1.4)$$

avec V_{cell} la tension élémentaire d'une cellule et N_{cell} le nombre de cellules.

La puissance brute PAC P fournie par la pile à combustible est :

$$\text{➤ } P_{PAC}(I_{PAC}) = V_{PAC}(I_{PAC}) \times I_{PAC} \quad (1.5)$$

Une pile à combustible est capable de fournir de la puissance électrique tant qu'elle est alimentée en réactifs (oxygène et hydrogène). Ceci implique qu'une pile à combustible ne peut fonctionner seule et a besoin d'un ensemble de composants périphériques pour fonctionner [1].

Les pertes d'activation sont dues au démarrage des réactions chimiques à l'anode et à la cathode. Une partie de l'énergie disponible est utilisée pour briser et reformer les liaisons chimiques aux électrodes. Si ces pertes interviennent aux deux électrodes, Il s'ensuit que les pertes d'activation sont essentiellement dues aux réactions cathodiques. La relation entre les pertes d'activation et la densité de courant est donnée par l'équation de Tafel :

$$v_{act} = A \cdot \ln\left(\frac{I_{FC} + i_n}{i_0}\right) \quad (1.6)$$

où (I_{FC}) est le courant délivré par la pile à combustible, i_0 le courant d'échange caractérisant à vide les échanges électrode-électrolyte, i_n le courant interne permettant de tenir compte d'une éventuelle traversée de gaz et/ou d'électrons à travers l'électrolyte et A la pente de la droite de Tafel [7].

Les pertes ohmiques sont dues à la résistance qu'oppose 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 :

$$\text{➤ } V_{ohm} = R_m \times (I_{FC} + i_n) \quad (1.7)$$

où (R_m) est la résistance totale de la pile à combustible.

La consommation des gaz appauvrit les mélanges gazeux et diminue la pression partielle des gaz. Cette réduction de pression dépend du courant délivré et des caractéristiques des circuits de gaz. Cette chute de tension s'exprime en fonction d'un courant limite i_L , pour lequel tout le combustible étant utilisé, sa pression tomberait à zéro, et d'une constante B appelée constante de transport ou de transfert de masse :

$$\text{➤ } v_{conc} = -B \cdot \ln \left(1 - \frac{I_{FC} + i_n}{i_L} \right) \quad (1.8)$$

La plus simple représentation de la pile à combustible sous la forme d'un modèle électrique consiste à mettre une source de tension continue en série avec une impédance électrique (**Figure 2.6 .a**). Cette impédance électrique est donnée sur la (**Figure 2.6. b**) et contient une capacité de double couche C_{CD} et une résistance R_T qui caractérise les phénomènes de transfert de charges aux électrodes. La résistance R_M représente la membrane et les différentes résistances de contact. Dans ce cas, les phénomènes de diffusion sont négligés [8].

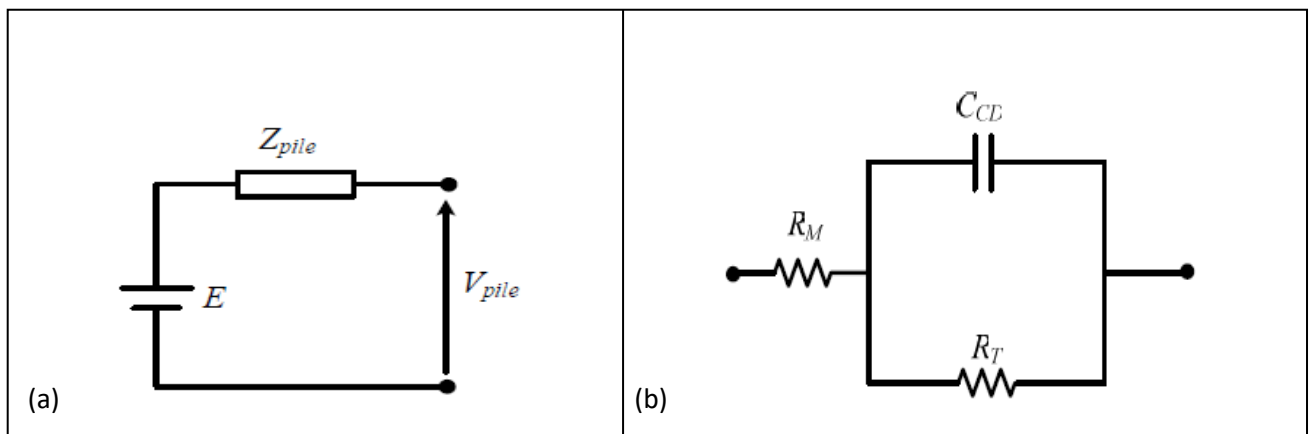


Figure 1.6 : Modèle simple de pile à combustible

1.2.7 Domaines d'applications des piles PEM :

La pile PEM est simple à utiliser car elle fonctionne à basse température. L'utilisation d'un électrolyte solide et la basse température n'entraînent aucun problème de production (dilatation des pièces du système, corrosion, etc.). De ce fait, il a attiré l'attention de constructeurs dans des

secteurs variés où ces fonctionnalités sont des atouts précieux (applications portables, transport automobile, petites cogérations, etc.)

La cellule PEM alimentée à l'hydrogène pur est conçue pour remplacer les batteries dans les applications portables afin de donner plus d'autonomie et une recharge rapide en remplaçant le réservoir de carburant.

Dans le domaine des transports, la batterie PEM a l'avantage de ne pas générer de polluants au niveau du véhicule lorsqu'elle utilise de l'hydrogène pur et peut aider au développement de voitures hybrides.

Les applications stationnaires sont aussi concernées par les piles PEM. Essentiellement en petite et moyenne puissance où la basse température de fonctionnement et les possibilités de fonctionner en régime variable sont des avantages [5].

1.2.8 Avantages et inconvénients des piles à combustible de type PEM :

Les avantages et inconvénients des piles à combustible dépendent bien entendu du type de pile considéré et donc de l'application envisagée.

Nous nous intéressons principalement ici à la pile PEM même si certaines des qualités et des défauts de cette pile se retrouvent autres types de pile [9].

1.2.8.1 Avantages des piles à combustible de type PEM :

Les avantages généralement cités sont :

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

1.2.9.2 Inconvénients des piles à combustible de type PEM :

Elles présentent aussi quelques inconvénients :

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

1.3 Batteries :

1.3.1 Définition :

Les batteries sont des accumulateurs électrochimiques capables de stocker de l'énergie chimique et de la convertir en énergie électrique dans les deux sens. Il est possible de transformer l'énergie électrique en énergie chimique. Les batteries sont l'une des sources les plus attrayantes pour une utilisation dans les véhicules électriques et hybrides en raison de leur énergie et de leur puissance spécifiques, de leur réversibilité et de leur faible coût (par rapport à d'autres technologies). Cependant, des recherches importantes sont encore nécessaires dans des domaines tels que la fabrication, la sécurité et le recyclage [10].

le plus largement répandu toutes applications confondues reste incontestablement le stockage électrochimique au moyen de batteries. Ce succès s'explique en partie par l'avantage considérable que ces batteries apportent par rapport à d'autres solutions, celui de la mobilité.

Le développement de générateurs électrochimiques performants est donc critique pour les applications portables (ordinateurs, téléphones portables, outils, etc.), notamment dans le secteur des transports, où se développent les véhicules hybrides et tout électriques, ainsi que l'électrification croissante des fonctions à bord des aéronefs. c'est-à-dire leur capacité à stocker et à décharger de l'énergie de manière réversible pendant des centaines de cycles. Cette cyclabilité, associée à une efficacité énergétique de plus de 97 %, rend les batteries particulièrement intéressantes dans les applications stationnaires, comme le stockage de l'électricité produite à partir d'énergies primaires renouvelables pour équilibrer l'offre et la demande dans les réseaux électriques locaux (à l'échelle des bâtiments ou d'un quartier) [11].

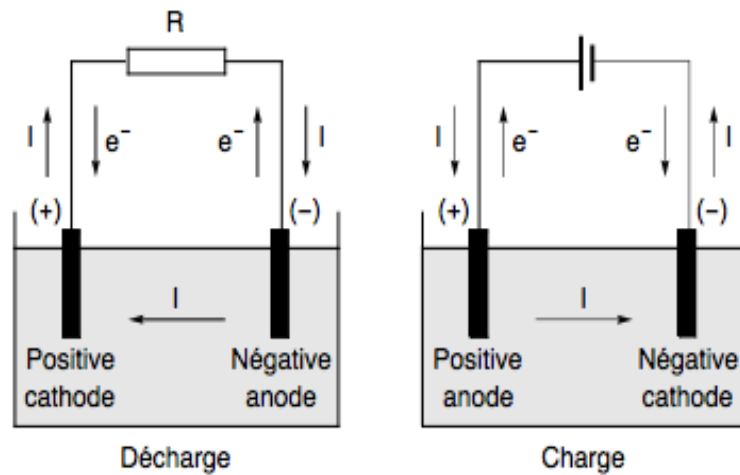


Figure 1.7 : Décharge/charge d'un Batterie électrochimique [12].

1.3.2 Principe de fonctionnement :

Un accumulateur est constitué d'une électrode positive et d'une électrode négative, toutes deux immergées dans un milieu électriquement isolant appelé électrolyte. Cet électrolyte est souvent une solution liquide contenant des ions négatifs (anions) et positifs (cations) résultant de la dégradation d'un sel. Pour éviter un contact direct (qui provoque des courts-circuits), ces deux électrodes sont physiquement séparées par une membrane poreuse appelée séparateur, qui est également imbibée d'électrolyte. Chaque électrode possède un collecteur de courant qui sert de conducteur électrique et est enfermé dans un film qui contient les matières actives (qui sont différentes pour chaque électrode) nécessaires au fonctionnement de l'accumulateur. Durant la décharge, le fonctionnement est identique à celui d'une pile où des réactions électrochimiques ont lieu spontanément au niveau des électrodes : le matériau actif à l'électrode négative (Red2) va s'oxyder en libérant des électrons (réactions d'oxydation) qui vont transiter par le circuit extérieur via les collecteurs de courant, alimenter un équipement (ou un récepteur, par exemple une lampe) puis arriver à l'électrode positive où ils sont captés (réactions de réduction) par le matériau actif la constituant (Ox1). Lorsque le matériau actif de l'électrode négative ne peut plus libérer d'électrons ou lorsque celui de l'électrode positive ne peut plus en consommer, le système ne peut plus délivrer d'énergie et doit alors être rechargé [13].

1.3.3 Les différents types de batteries :

Les différents types de batteries et leurs caractéristiques sont résumés dans le tableau suivant :

Type de batterie	EB(V)	Anode	Cathode	Électrolyte
Acide-Plomb	2.1	PbO2	Pb	H2SO4
Nickel-Cadmium	1.2	Ni	Cd	KOH
Nickel-Fer	1.2	Ni	Fe	KOH
Nickel-Zinc	1.7	Ni	ZnO2	KOH
Nickel-Métal Hydrure	1.23	Ni	Métal hydrure	KOH
Aluminium-Air	1.5	AL	O2	KOH
Zinc-Air	1.65	Zs	O2	KOH
Sodium-Soufre	2.1	S	Na	BAI_2O_3
Sodium-Nickel	2.1_2.2	Nicl	Na	BAI_2O_3
Lithium-Sulfate de Fer	1.75_2.21	FeS2	LiAL OU Lisi	$LiCl/KCl$
Lithium-Ion	3.6	Intercalation de carbone	LicoO2	<i>Organique</i>

Tableau 1.3: Matériaux constituant les principaux accumulateurs électrochimiques[12].

1.3.4 Modélisation des batteries :

Le modèle le plus simple d'une batterie est représenté sur (la Figure 1.11) . Il est constitué d'une source de tension correspondant à la tension de circuit ouvert V_0 en série avec une résistance ($r_s = R_{ohm} + R_{int}$) constituée de deux termes. R_{int} (résistance interne) terme variable représente la réaction chimique et correspond aux chutes de tension dues à une réaction d'activation et à la concentration d'électrolytes. R_{ohm} (résistance ohmique) est constante et correspond à la résistance des conducteurs.

La détermination analytique exacte de la résistance ou de la chute de tension de la batterie est difficile et est généralement obtenue par des essais expérimentaux. La chute de tension augmente avec une augmentation du courant de décharge et une diminution de l'énergie stockée [7].

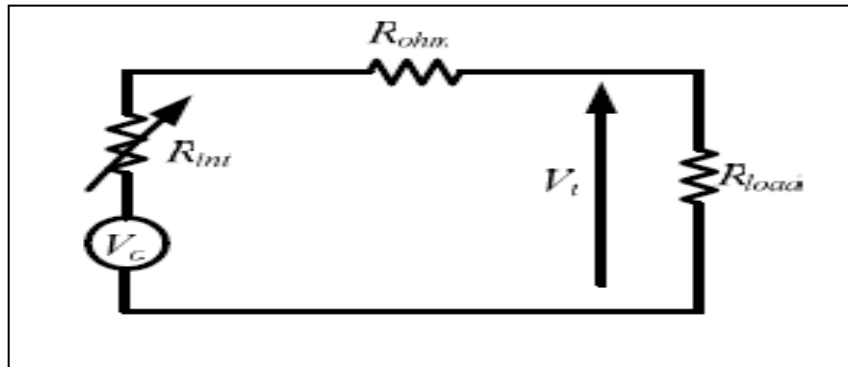


Figure 1.8 : Modèle simple d’une batterie

La tension de sortie $V_t = V_G - (R_{int} + R_{ohm})I$ est régie par la loi classique des générateurs de tension non idéaux. Ce modèle de base est particulièrement simple à mettre en application, mais il ne tient pas compte des variations d’impédance interne de la batterie en fonction de l’état de charge, de la concentration en électrolyte, de la température ou encore du nombre de cycles qu’a déjà subi la batterie.

Ce modèle permet en particulier de montrer l’importance de la résistance interne dans le calcul de la puissance massique d’une batterie. En effet avec ce modèle, la puissance maximale qui peut être délivrée a pour valeur :

$$P_{\max} = \frac{V_G^2}{4(R_{ohm} + R_{int})} \quad (1.9)$$

1.3.5 Modèle électrique des batteries ‘Modèle de Thévenin’ :

La modélisation de la batterie est une tâche importante afin de l’utiliser de manière efficace, estimer son état de charge et de la protéger contre les décharges profondes qui peuvent provoquer leur endommagement de façon irréversible. Plusieurs paramètres influencent l’efficacité de la batterie et son fonctionnement à savoir le courant de charge, la température et le SOC .

Dans la littérature plusieurs modèles de batterie ont été proposés et particulièrement selon la technologie choisie et le domaine d’utilisation. Le modèle le plus simple est celui d’un circuit électrique composé d’une source de tension en série avec une résistance interne, ce modèle est connu par le modèle de ‘Thévenin’. Un tel modèle néglige la dynamique de l’électrochimie. Cependant, ces dynamiques sont relativement rapides et peuvent être négligées pour un modèle dédié aux considérations énergétiques. Le circuit équivalent est représenté dans (la Figure 1.12) [14].

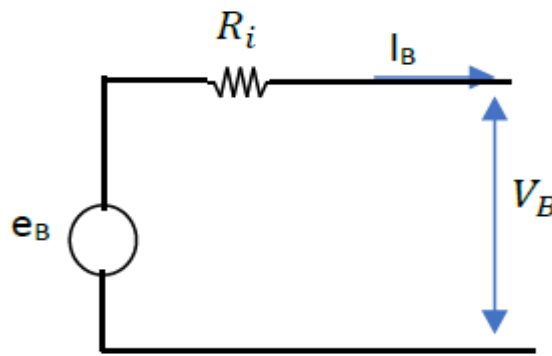


Figure 1.9 : Circuit électrique du Modèle Thévenin

où e_B est la tension du circuit ouvert de la batterie et dépendant de l'état de charge. La variable R_i est la résistance interne définie comme une fonction de l'état de charge mais aussi de la direction du courant de la batterie. Ce modèle simple permet d'exprimer la tension en sortie de la batterie comme suit :

$$V_B = e_B - R_i \times i_B \quad (1.10)$$

1.3.6 Paramètres de charge et de décharge :

1.3.6.1 Etat de charge des batteries :

Le paramètre clé de la batterie est l'état de charge. Ce dernier est une quantité sans dimension déterminée comme le rapport entre la capacité résiduelle $Q_{résiduelle}$ et la capacité nominale Q_n de la source de stockage de l'énergie telle que déterminé. En effet, le SOC est un indicateur de la quantité d'énergie disponible et son estimation est fondamentale pour la gestion de l'énergie. Dans les batteries, le SOC dépend de multiples facteurs tels que le courant, l'historique de décharge, l'âge, l'autodécharge, etc. Pour cela, l'estimation du SOC dans les batteries est une tâche difficile [15].

$$SOC = \frac{Q_{résiduelle}}{Q_n} \quad (1.11)$$

Quand les modèles théoriques sont utilisés pour estimer le SOC, les résultats sont fondés sur les paramètres estimés et/ou hypothèses de simplification.

La méthode de Coulomb Counting (connue sous la méthode d'intégration du courant) est retenue et la plus utilisée pour estimer le SOC et consiste à mesurer la tension du circuit ouvert de la batterie au démarrage pour estimer le SOC initial en utilisant les informations de data sheet de la batterie. Ensuite, le courant de la batterie est intégré pour estimer la quantité de charge fournie (ou récupérée compte tenu d'une charge) par les batteries. Cette méthode est formellement présentée par :

$$SOC = SOC_0 - \frac{100}{Q_n} \int i_B dt \quad (1.12)$$

Avec :

SOC_0 est la valeur initiale du SOC , Q_n est la valeur nominale de la capacité de la batterie en (Ah). La plupart des chercheurs utilisent un protocole de test qui vise à décharger et à charger complètement la batterie afin d'estimer un état de charge initiale. L'intérêt de cette méthode réside dans sa simplicité et sa souplesse (cette méthode peut être améliorée en considérant les pertes ou le vieillissement).

1.3.6.2 Profondeur de la décharge de la batterie :

Dans différents types de batteries, l'énergie stockée dans la batterie ne peut pas être retirée complètement, (en d'autres termes, la batterie ne doit pas être déchargée complètement), sans causer des dommages graves et souvent irréparables à la batterie. La profondeur de décharge de la batterie détermine la fraction de puissance qui peut être retirée de la batterie. Presque toutes les batteries sont classées en fonction de leur capacité. Cependant. L'énergie réelle qui peut être extraite de la batterie est souvent nettement inférieure à la capacité nominale. Cela se produit, en particulier pour les batteries au plomb-acide. L'extraction de la pleine capacité de la batterie réduit considérablement sa durée de vie [10].

La profondeur de décharge de la batterie est déterminée par l'équation suivante :

$$DoD = 1 - SoC \quad (1.13)$$

4.1 Conclusion :

La définition des principes de fonctionnement et la modélisation des sources d'énergie sont nécessaires pour évaluer le comportement d'un système hybride électrique. C'est pourquoi dans ce chapitre, nous avons présenté les sources d'énergie électrique les plus utilisées dans la réalisation de source hybride électrique. Ces sources sont : les piles à combustibles, les batteries électrochimiques.

Chapitre 2

Généralité sur les systèmes hybrides

2.1 Introduction:

L'hybridation des sources consiste à combiner deux ou plusieurs dispositifs (qui contiennent au moins un élément stockage) de manière à combiner les avantages respectifs de chacun tout en minimisant leurs inconvénients. Par exemple, l'hybridation d'une batterie électrochimique (ou une pile à combustible) avec un supercondensateur ou des panneaux photovoltaïques avec des batteries électrochimiques peut surmonter les problèmes des sources qui ont une faible puissance spécifique et les sources qui ont une faible énergie spécifique.

2.2 Généralité sur le système hybride :

2.2.1 Définition

Les systèmes hybrides sont les technologies émergentes de production d'énergie qui intègrent deux ou plusieurs sources de production issues autant des sources renouvelables, que des sources conventionnelles (généralement les générateurs Diesel) ou d'une combinaison des deux sources. Un système hybride de production de l'énergie se distingue de deux façons :

- Il combine et exploite plusieurs sources et technologies de production d'énergie disponibles et facilement mobilisables.
- Sa complexité spécifique au niveau de la gestion des apports est à bien des égards identiques à celle d'un réseau électrique traditionnel.

Un système hybride de production d'énergie doit notamment :

- Assurer, en tout temps, l'énergie suffisante demandée par la charge et, si possible, produire le maximum d'énergie à partir des sources d'énergie renouvelable, tout en maintenant une qualité déterminée d'énergie fournie.
- Obéir à des règles d'exploitation basées sur une priorisation économique des ressources énergétiques disponibles.

Compter sur une gestion automatisée des composants du système hybride afin de garantir la stabilité du système [16].

La plupart du temps, les systèmes électriques hybrides peuvent être représentés par (**Figure 2.1**). Cette structure est assez générale où sur laquelle on peut ajouter ou enlever les sources et les charges suivant la topologie du système. Le réseau électrique ou la pile à combustible pourraient par exemple constituer la source principale [17].

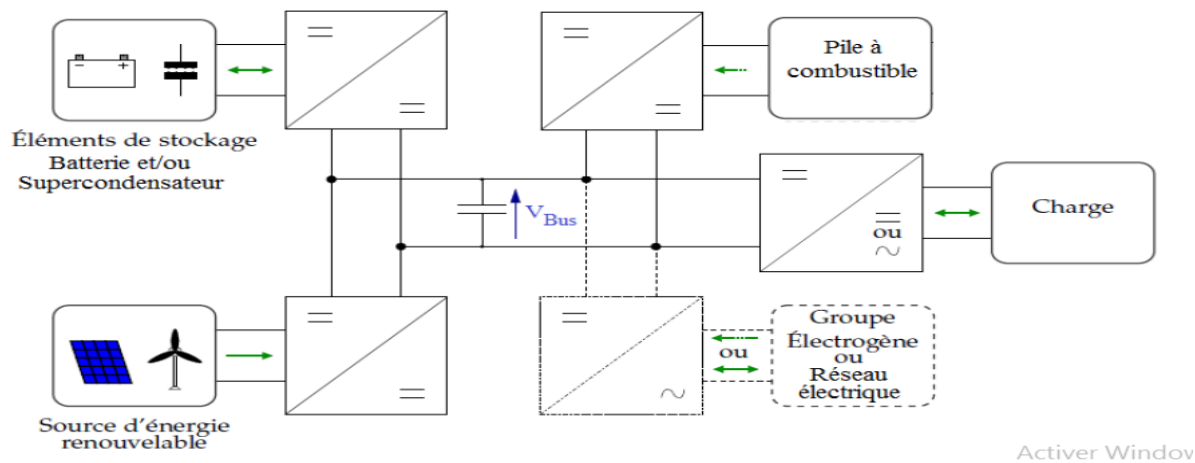


Figure 2.1: Structure générale d'un système électrique hybride

2.2.2 Classification :

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

2.2.2.1 Régime du fonctionnement :

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

2.2.2.3 Structure du système hybride :

Trois critères peuvent être pris en compte dans le classement en fonction de la structure du système. Le premier critère est la présence ou non d'une source d'énergie classique. Cette source conventionnelle peut être un générateur diesel, une micro turbine à gaz, et dans le cas d'une étude du réseau électrique complet – une centrale tout entière.

Un second critère possible est la présence ou non d'un dispositif de stockage. La présence d'un élément de stockage permet d'assurer une meilleure satisfaction des charges électriques pendant les périodes d'absence d'une ressource primaire. Les dispositifs de stockage peuvent être des batteries rechargeables, des supercondensateurs et des électrolyseurs avec réservoirs d'hydrogène[18].

La dernière classification possible est celle relative au type de sources d'énergie renouvelables utilisées. La structure du système peut contenir un système photovoltaïque, une éolienne, un convertisseur d'énergie hydraulique (centrales hydroélectrique ou utilisation des vagues) ou une combinaison de ces sources. Un critère important pour la sélection de la source utilisée est le potentiel énergétique disponible qui dépend de l'endroit d'installation du système hybride. Un autre facteur déterminant est le consommateur électrique alimenté. Son importance détermine le besoin d'une source supplémentaire, d'un dispositif de stockage et/ou d'une source conventionnelle [19].

Une généralisation de la classification présentée est illustrée sur la (**Figure 2.2**).

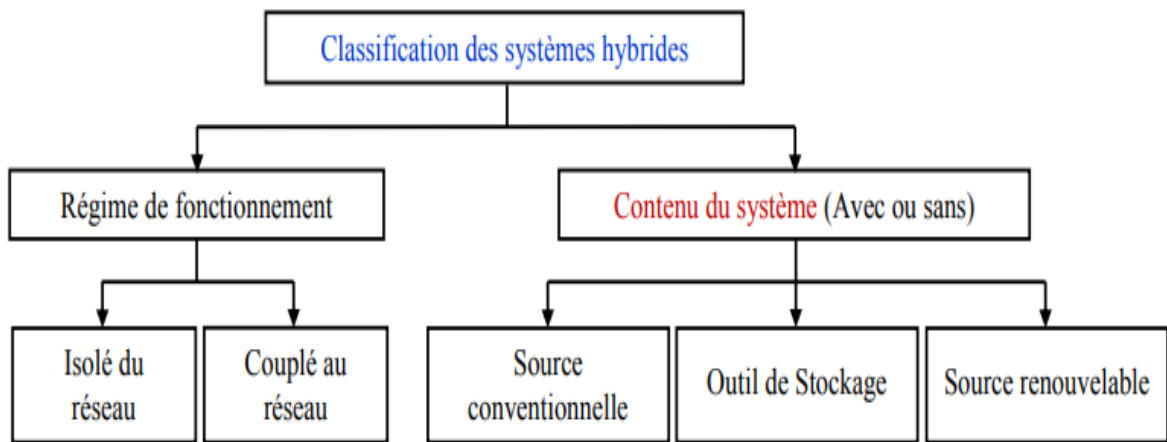


Figure 2.2 : Classification des systèmes hybrides

Le choix des systèmes multi sources multi convertisseurs s'est porté sur trois configurations différentes pour lesquelles nous présentons leurs modélisations et qui sont :

- Dans cette architecture, le système PàC impose sa tension au bus DC. Le convertisseur lié à la source de stockage est un buck / boost réversible en courant.

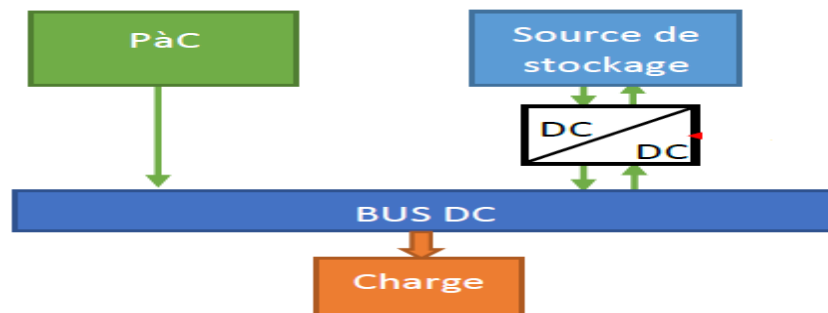


Figure 2.3 : Architecture 1: PàC avec Bus DC

- Pour le deuxième cas, la PàC est connectée au bus DC via le convertisseur Boost unidirectionnel et le système de stockage est lié directement au bus DC. Donc c'est la source secondaire qui impose sa tension au bus.

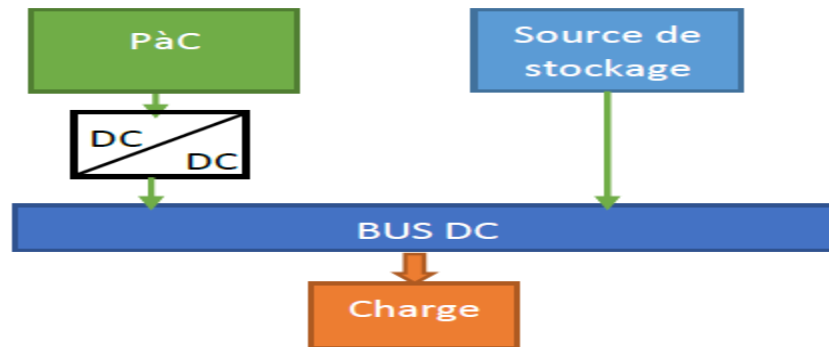


Figure 2.4 : Architecture 2: PàC avec Convertisseur avec Bus DC

- Le système PàC et la source de stockage sont connectés au bus DC via un convertisseur Boost et un convertisseur Buck / Boost, respectivement. Dans cette architecture, la tension du bus DC est librement choisie dans la plage de fonctionnement des convertisseurs [20].

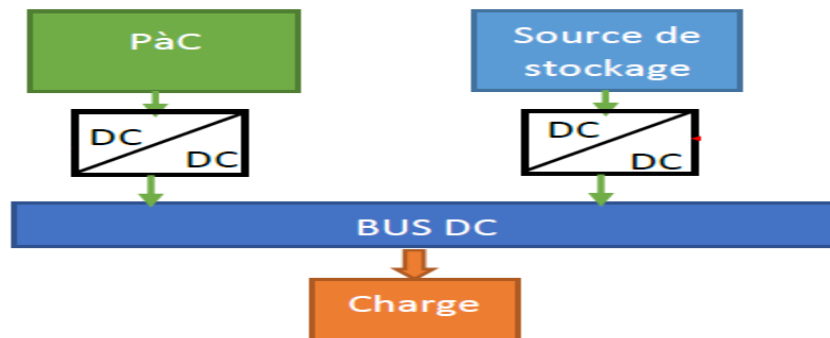


Figure 2.5 : Architecture 3 : PàC avec Convertisseur avec Bus DC Source stockage avec Convertisseur avec Bus DC

Les avantages des architectures 1 et 2, où un seul convertisseur est utilisé, est la réduction de pertes liées au convertisseur, la simplicité de le commander puisqu'il y'a un seul degré de liberté et le faible coût de l'installation avec moins d'encombrement. Cependant, cette topologie présente un risque de sécurité due au fait que la source connectée directement au bus DC n'est pas limitée en courant.

En revanche, l'architecture 3 permet de palier le problème de sécurité de l'installation et elle s'adapte à tous niveaux de tension et de courant. Dans ce travail de thèse, l'architecture 3 est retenue pour la suite de notre travail.

2.3 Systèmes hybride autonome d'énergie :

Les systèmes d'énergie hybrides (SEH) associent au moins deux technologies complémentaires : une ou plusieurs sources d'énergie classiques, généralement des générateurs diesels, et au moins une source d'énergie renouvelable

Les sources d'énergie renouvelable, comme l'éolienne et le photovoltaïque, ne délivrent pas une puissance constante. Leur association avec des sources classiques permet d'obtenir une production électrique continue. Les systèmes d'énergie hybrides sont généralement autonomes par rapport aux grands réseaux interconnectés et sont souvent utilisés dans les régions isolées.

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 maintenant la qualité de l'énergie fournie. De plus, l'économie de carburant et la baisse de prix obtenues par la génération hybride doivent au moins couvrir l'investissement fait pour les générateurs d'énergie renouvelable et les autres composants auxiliaires du système [21].

Les systèmes d'énergie hybride sont généralement autonomes par rapport aux grands réseaux interconnectés et sont souvent utilisés dans les régions isolées. En plus des sources d'énergie, un système hybride peut aussi incorporer des convertisseurs, des charges et des éléments de stockage comme montre la figure [22].

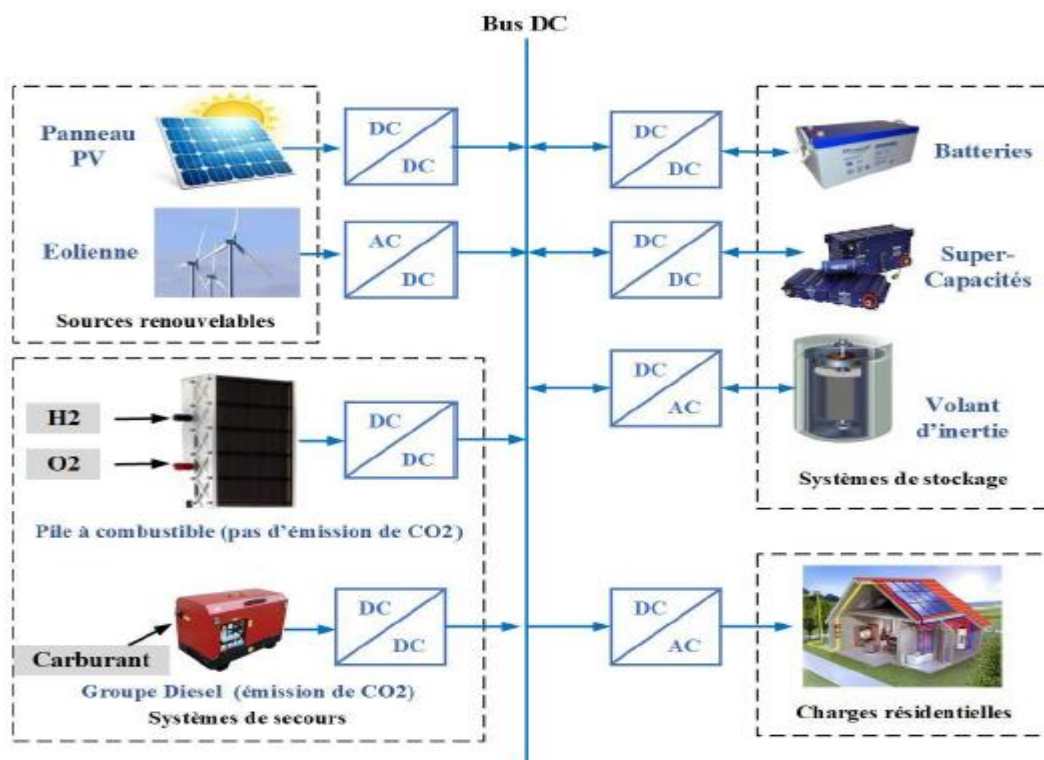


Figure 2.6 : Schéma général du système d'énergie hybride [6].

2.3.1 Energie solaire photovoltaïque :

L'énergie solaire photovoltaïque est une énergie électrique produite à partir du rayonnement solaire grâce à des panneaux ou des centrales solaires photovoltaïques [23].

2.3.1.1 Cellule photovoltaïque :

Les cellules photovoltaïques sont des composants optoélectroniques qui transforment directement la lumière solaire en électricité par un processus appelé « effet photovoltaïque » [24].

L'effet photovoltaïque est découvert en 1839 par Antoine Becquerel dans une pile constituée par des électrodes de platine et de cuivre oxydé plongeant dans une solution électrolytique acide. Plus généralement, on qualifie de photoélectriques tous les phénomènes électriques provoqués par l'action de la lumière sur la matière qui provoquent une éjection d'électrons du matériau [25].

- l'émission photoélectrique.
- la photoconductivity.
- l'effet photovoltaïque.

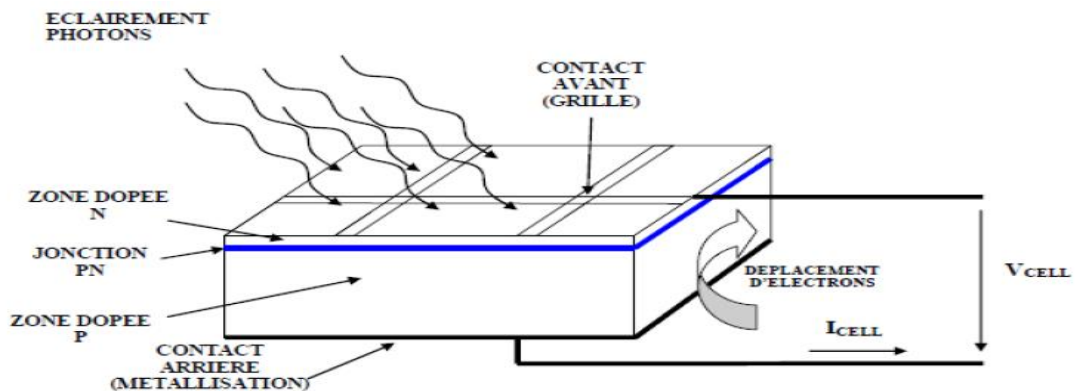


Figure 2.7 : La structure d'une cellule photovoltaïque

2.3.1.2 Module photovoltaïque :

Pour produire plus de puissance, les cellules sont assemblées pour former un module (Figure 2.9). Ainsi, les connexions en série de plusieurs cellules augmentent la tension pour un même courant, tandis que la mise en parallèle accroît le courant en conservant la tension [24].

➤ **Panneau photovoltaïque :** Le panneau photovoltaïque se compose de modules photovoltaïques interconnectés en série et/ou en parallèle afin de produire la puissance

requis. Ces modules sont montés sur une armature métallique qui permet de supporter le champ solaire avec un angle d'inclinaison spécifique.

- **Champ photovoltaïque :** Un champ photovoltaïque est considéré comme une association de plusieurs panneaux PV connectés en série et/ou en parallèle, combinés pour donner la tension et le courant nécessaires. Le nombre nécessaire de panneaux PV connectés en série est déterminé en divisant la tension du bus continu du système par la tension nominale du panneau PV, alors que le nombre de branches de panneaux PV connectées en parallèle est considéré, dans le cadre de ce travail, comme une variable d'optimisation

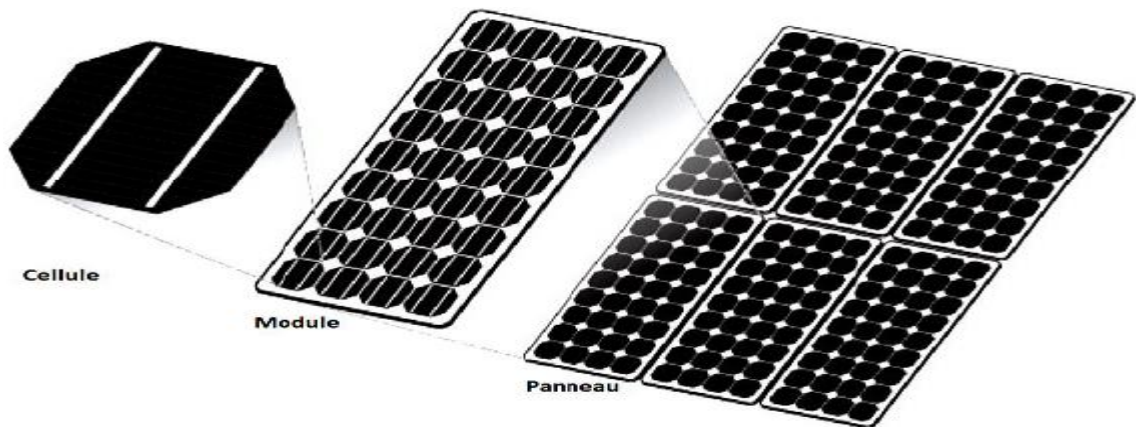


Figure 2.8 : Les composantes d'un champ photovoltaïques

2.3.2 Energie éolienne :

L'énergie éolienne est une ressource d'origine solaire, qui provient du déplacement des masses d'air qui est dû indirectement à l'ensoleillement de la terre. Par le réchauffement de certaines zones de la planète et le refroidissement d'autre, une différence de pression est créée et la masse d'air est en perpétuel déplacement. Environ 0,25% du rayonnement solaire total est converti en énergie éolienne [26].

Une éolienne est une machine qui transforme l'énergie cinétique du vent en énergie électrique ou mécanique, La configuration d'une éolienne à axe horizontal, face au vent, est représentée sur la(**Figure 2.9**) [27].

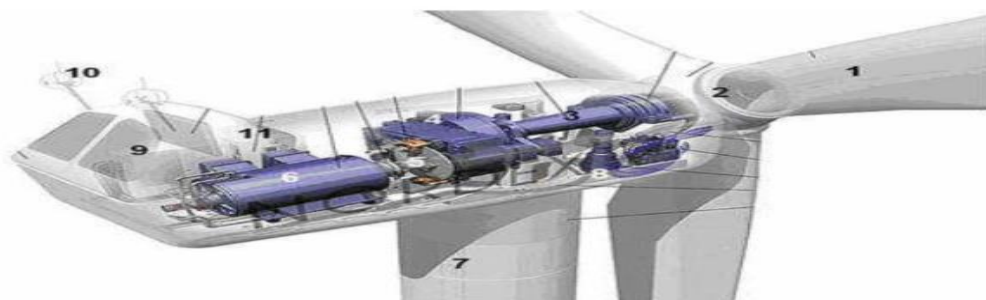


Figure 2.9 : Les composantes de l'aérogénérateur

2.3.2.1 Différents types d'éoliennes:

Il existe deux grandes familles d'éoliennes selon la disposition géométrique de l'arbre sur lequel est montée l'hélice [28].

- **Eoliennes à axe horizontal** : Nommées HAWT pour Horizontal Axis Wind Turbine, les éoliennes à axes horizontales sont les plus connues et communes
- **Eoliennes à axe vertical** : Il existe aussi des architectures d'éoliennes à axe vertical ou VAWT pour Vertical Axis Wind Turbine

Une classification des différentes éoliennes en deux familles, selon le type de fonctionnement

- Fonctionnement à vitesse fixe.
- Fonctionnement à vitesse variable.

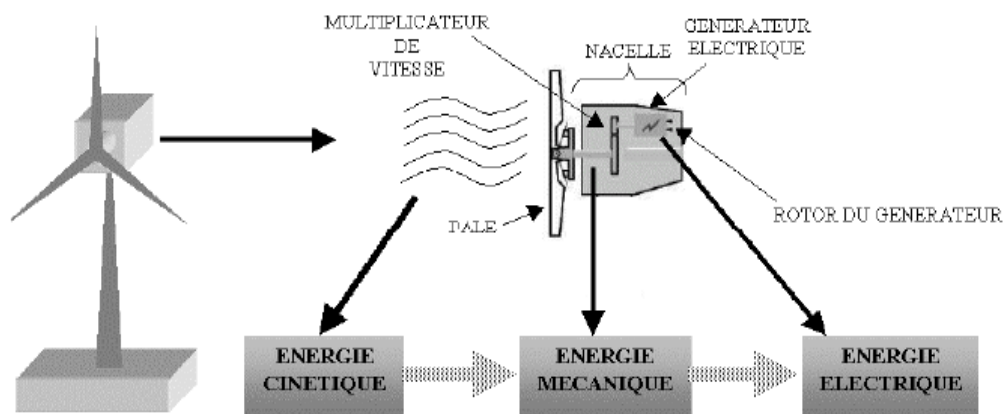


Figure 2.10 : conversion de l'énergie cinétique du vent

2.3.3 Classifications des systèmes d'énergies hybrides :

On peut distinguer plusieurs classifications des SEH. Cependant le choix du type des SEH dépend particulièrement des conditions d'installation et des objectifs d'utilisations. Nous représentons ci-après les classifications les plus répandues [29] :

2.3.3.1 Système d'énergie hybride autonome :

Autonome parce qu'ils génèrent de l'énergie sans connexion ou sans avoir besoin de l'assistance du réseau électrique. Souvent, utilisés pour répondre aux besoins des sites qui sont difficilement accessibles ou n'ont pas d'accès à un réseau électrique (par exemple : refuges de montagne, îles, villages isolés...).

2.3.3.2 Système d'énergie hybride connectés au réseau :

L'interface entre le SEH et le réseau électrique peut être constituée par le convertisseur statique l'onduleur" pour assurer la conversion de la puissance continue/alternative (DC/AC). L'énergie produite par le SEH est consommée immédiatement. En effet, le surplus d'énergie est injecté vers le réseau, qui agit comme un système de stockage d'énergie. Par conséquent pour ce type de système, il n'est pas exigé l'utilisation de système de stockage puisqu'en cas d'incapacité du SEH pour assurer la demande de la charge, le réseau intervient pour garantir l'énergie nécessaire.

2.3.4 Configurations de bus dans les systèmes hybrides :

Selon le bus électrique nous distinguons trois architectures ou configurations de bus dans les systèmes hybride :

2.3.4.1 Architecture à bus DC :

La **figure 2.11** représente la structure à bus DC d'un système hybride Dans cette architecture, l'énergie fournie par chaque source du système alimente un bus continu DC à travers des convertisseurs DC/DC ou AC/DC. Ce type d'assemblage est adapté pour les sites isolés, à charge continue ou alternative, reliée au bus DC via un onduleur. L'avantage de cette topologie est la simplicité de la commande par rapport aux autres configurations [30].

Nous retiendrons cette configuration dans le cadre de cette thèse.

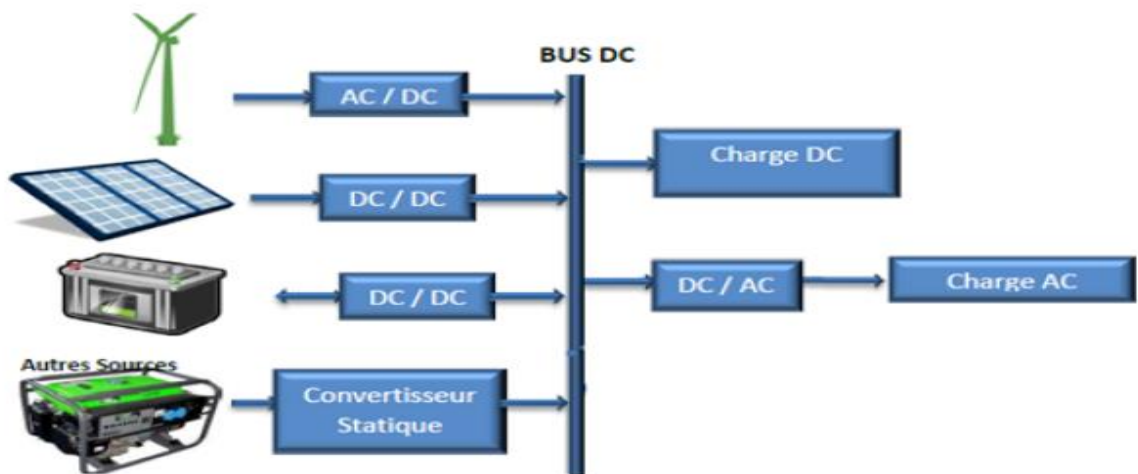


Figure 2.11 : Structure à bus DC d'un système hybride

2.3.4.2 Architecture à bus AC :

Dans la topologie à bus AC, toutes les sources de productions sont reliées au bus AC via des convertisseurs comme montrée dans (la **Figure 2.12**) Cette configuration offre des performances supérieures par rapport à la configuration précédente, puisque un découplage de différentes sources de production permettrait celles-ci d'agir de façon assez indépendante les unes des autres. Cependant, le rendement de l'ensemble du système est faible, parce qu'une certaine quantité d'énergie est perdue à cause de l'utilisation des convertisseurs statiques et ce type d'association complique le système de commande. L'architecture à bus AC est plus adaptée à une génération distribuée [31].

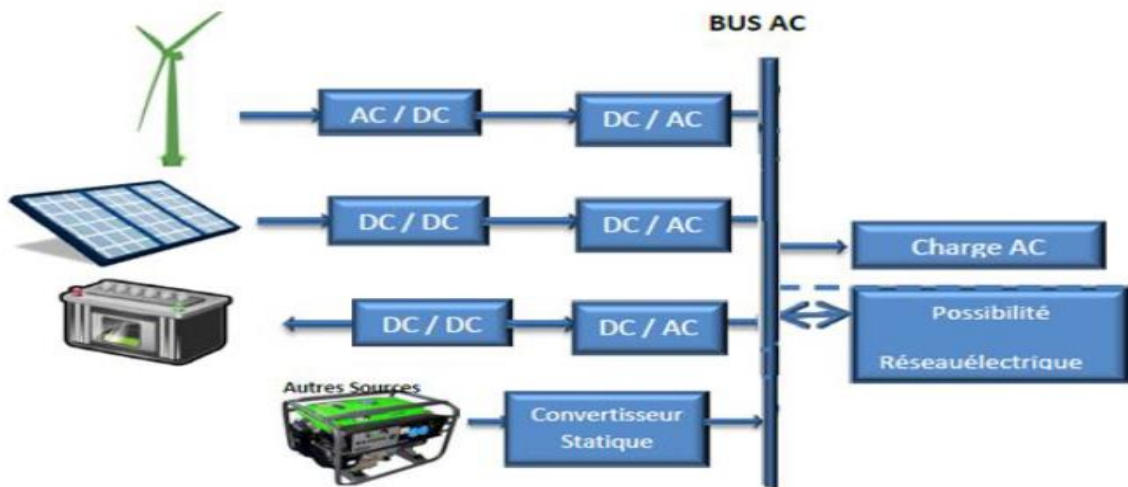


Figure 2.12 : Structure à bus AC d'un système hybride

2.3.4.3 Architecture mixte (DC&AC) :

La figure 2.13 représente la structure à bus mixte (DC&AC)d'un système hybride Dans cette configuration, les sources d'énergie peuvent alimenter une charge alternative AC ou une charge continue DC par un convertisseur bidirectionnel qui réalise la conversion continue-alternative et vice versa.

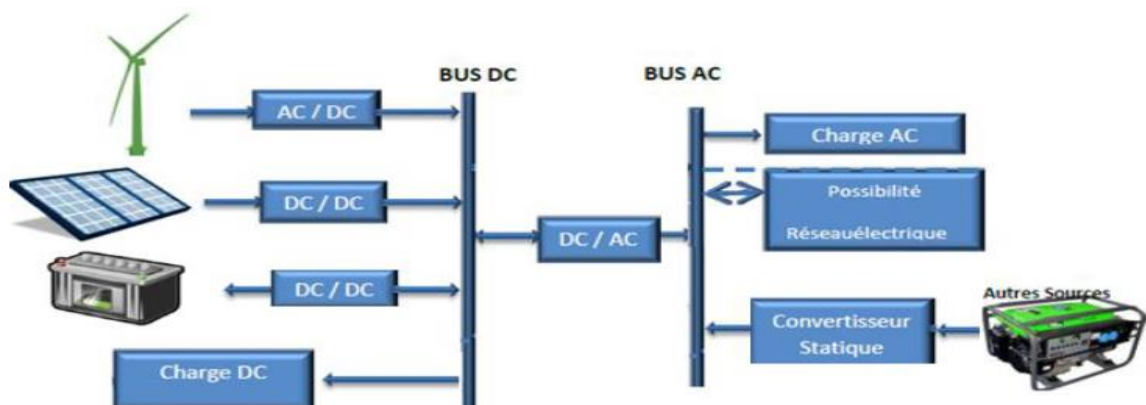


Figure 2. 13: Structure à bus mixte (DC& AC) d'un système hybride

2.3.5 Les convertisseurs statiques :

Les convertisseurs sont les appareils servant à transformer la tension continue fournie par les panneaux ou les batteries pour l'adapter à des récepteurs fonctionnant soit à une tension continue différente, soit à une tension alternative [32].

2.3.5.1 Convertisseur DC/DC (hacheur) :

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

2.3.5.2 Convertisseur DC/AC (onduleur) :

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

- Onduleur à modulation de largeur d'impulsion MLI (pulse-width modulation) ;
- Onduleur à onde sinusoïdale [33].

2.3.5.3 Convertisseur AC/DC (Redresseur) :

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

2.4 Modélisation du système hybride étudié (pile à combustible et batterie) :

La batterie peut être modélisée comme un circuit équivalent tel qu'une source de tension et une résistance interne. Parce que, la PàC et la batterie ont des avantages et des inconvénients qui leur sont propres, l'hybridation de ces deux sources présente un avantage en terme de complémentarité, une puissance constante fournie par le système PàC tandis que la batterie fournit les petites puissances de pointe rencontrées lors des accélérations rapides et du freinage, La batterie peut remplir deux fonctions principales dans un système hybride PàC/batterie: (i) la fonction "source d'énergie", puisque les batteries sont des accumulateurs électrochimiques, (ii) la

fonction "source de puissance", pour laquelle la batterie vient en complément de la source principale (PàC) (ou toute autre source limitée en puissance) Dans cette section, la sollicitation de la batterie pourra intervenir dans les phases transitoires et/ou dans les phases permanentes [10].

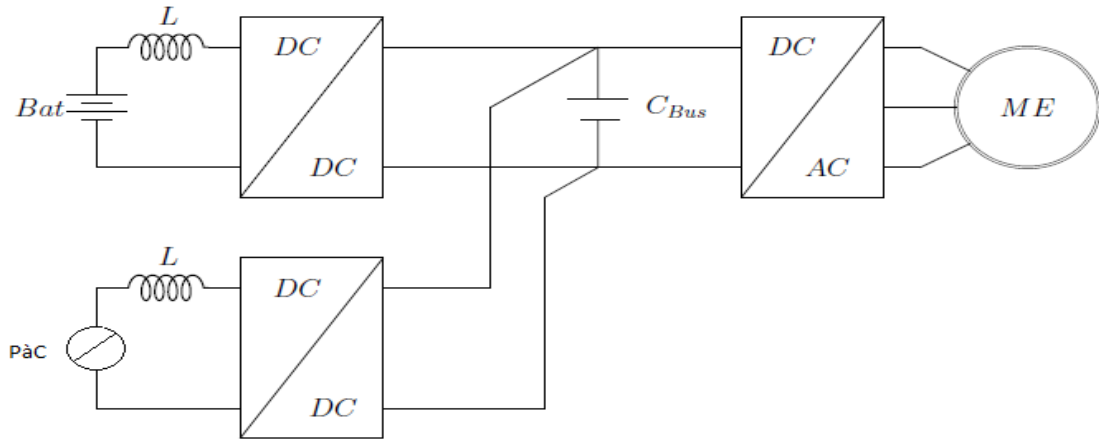


Figure 2.14: Schéma de principe de l'hybridation directe d'une PàC et d'une batterie

2.4.1 Architecture avec deux convertisseurs :

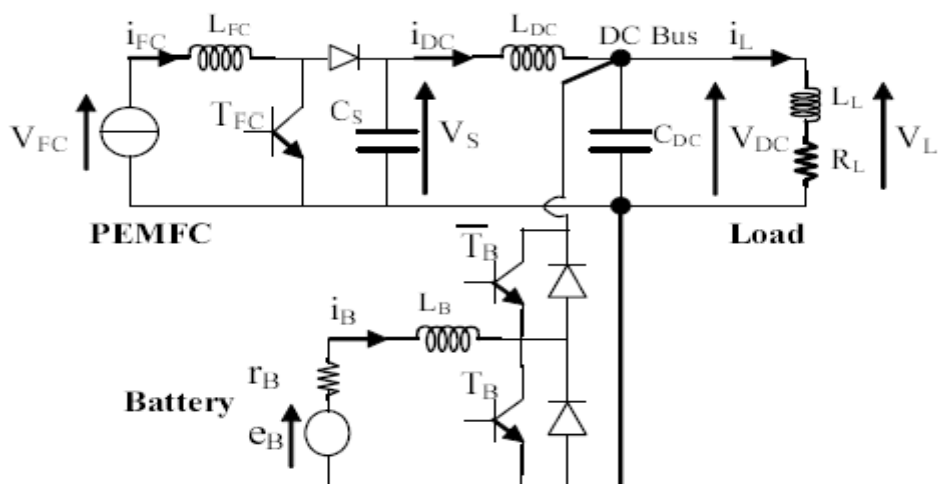


Figure 2.15: Architecture de la source hybride PàC/Batterie

Le circuit de la source hybride PàC/batterie montré dans (la **Figure 2.15**) est composé :

- D'un bus DC de nature capacitive qui permet d'alimenter la charge suivant la tension constante désignée par V_{DC} qui est à son tour une variable à contrôler.
- D'une PàC protégée par une diode anti retour du convertisseur Boost et connectée au bus continu via un convertisseur élévateur non réversible afin d'augmenter la tension de sortie de la PàC pour alimenter la charge.
- D'une batterie modélisée par une f.e.m en série avec une résistance interne. Elle est connectée au bus continu via un convertisseur élévateur/abaisseur bidirectionnel en courant.
- Des bobines de lissage pour chaque source. Ces bobines existent dans les convertisseurs et ne sont donc pas ajoutées.
- D'une charge qui est modélisée par une force électromotrice (F.E.M) en série avec une résistance interne et une inductance. Ce qui correspond au schéma électrique d'un M.C.C et qui autorise le freinage récupératif.

Pour le convertisseur de la PàC, deux états sont possibles selon l'interrupteur de la PàC $T_{PàC}$, ce qui est montré dans les schémas équivalents suivants : [34].

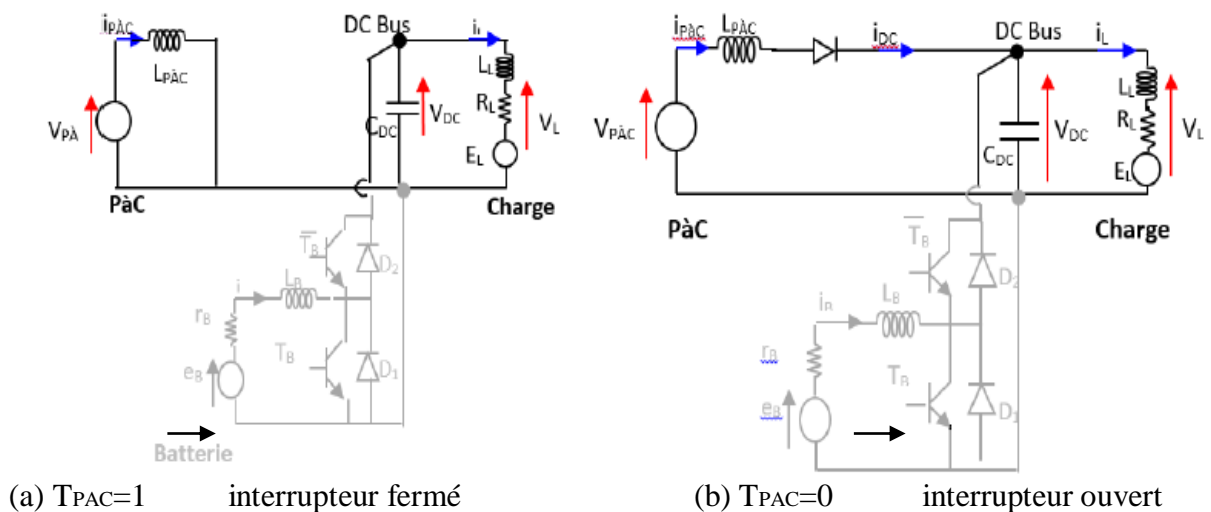


Figure 2.16 : Schémas équivalents du convertisseur de la PàC en mode de conduction continue [10]

Donc ce couplage peut être exprimé en puissance pour un système PàC/batterie avec la relation suivante :

$$P_{FC} + P_B = P_L \quad (2.1)$$

Comme la montre (**la Figure 2.16**), le système hybride PàC/batterie comprend un bus DC alimentée par une PàC et un convertisseur élévateur DC/DC non réversible, qui maintient la tension de bus à sa valeur de référence (V_d) et une batterie qui est reliée au bus continu par un convertisseur DC/DC abaisseur/élévateur réversible en courant. Le rôle de la PàC est de fournir la puissance moyenne à la charge. Tandis que la batterie peut en même temps compenser la puissance de la charge dans les phases permanentes et peut servir comme source de puissance pour alimenter la charge dans les phases transitoires.

L'association de la PàC avec la batterie avec deux convertisseurs selon la topologie parallèle présente l'avantage de fonctionner avec une seule source en cas de défaillance de l'autre, elle permet donc un fonctionnement en mode continu du système complet [27].

Les principaux objectifs de l'étude proposée, sont :

- Maintenir une énergie moyenne constante délivrée par la PàC, sans des pics de puissance significatifs.
- S'assurer que la puissance transitoire est fournie par le système de stockage (batterie).
- Maintenir constante la tension du bus continu à travers le contrôle des deux convertisseurs.
- Solliciter la batterie pour l'alimentation de la charge quand la PàC ne peut pas le faire seule.
- Après la modélisation, des points d'équilibre sont calculés afin d'assurer le comportement souhaité du système.

$$V_{FC} = E - A \cdot \log\left(\frac{i_{FC} + i_n}{i_o}\right) - R_m(i_{FC} + i_n) + B \cdot \log\left(1 - \frac{i_{FC} + i_n}{i_{Lim}}\right) \quad (2.1)$$

$V_{FC} = f(i_{FC})$, où E est le non réversible tension de perte du FC, E_0 est l'ouverture mesuré tension du circuit, i_{FC} est le courant délivré, i_n est le courant d'échange, A est la pente du Tafel ligne, i_{Lim} est le courant limite, B est la constante dans le transfert de masse, i_n est le courant interne et R_m est les résistances de membrane et de contact [30].

➤ Modélisation de la pile à combustible avec son convertisseur Boost:

$$\frac{dV_s}{dt} = \frac{1}{C_s} [(1 - u_{FC})i_{FC} - i_{DC}] \quad (2.2)$$

$$\frac{di_{FC}}{dt} = \frac{1}{L_{FC}} [-(1 - u_{FC})V_s + V_{FC}] \quad (2.3)$$

Où si $u_{FC} = 1$, $T_{FC} = 1 \rightarrow T_{FC}$ est fermé

➤ Modélisation du bus continu :

$$\frac{dV_{DC}}{dt} = \frac{1}{C_{DC}} [i_{DC} - i_L + (1 - u_B)i_B] \quad (2.4)$$

$$\frac{di_{DC}}{dt} = \frac{1}{L_{DC}} [V_S - V_{DC}] \quad (2.5)$$

➤ Modélisation de la batterie avec son convertisseur Buck-Boost:

$$\frac{di_B}{dt} = \frac{1}{L_B} [-(1 - u_B)V_{DC} + V_B] \quad (2.6)$$

➤ Modélisation de la charge RL:

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{1}{L_L} [-R_L i_L + V_L] \quad V_L = V_{DC} \quad (2.7)$$

Le modèle global du système hybride peut être décrit dans un modèle d'espace d'état en choisissant le vecteur d'espace d'état suivant [30]:

$$\begin{aligned} x &= [x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6]^T \\ &= [V_S, i_{FC}, V_{DC}, i_{DC}, i_B, i_L]^T \end{aligned} \quad (2.8)$$

Le vecteur de contrôle est:

$$\mu = [\mu_1, \mu_2]^T = [(1 - u_{FC}), (1 - u_B)]^T \quad (2.9)$$

➤ Le modèle d'espace d'état global d'ordre 6 est alors :

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = \frac{1}{C_S} [\mu_1 x_2 - x_4] \\ \dot{x}_2 = \frac{1}{L_{FC}} [-\mu_1 x_1 + V_{FC}] \\ \dot{x}_3 = \frac{1}{C_{DC}} [x_4 - x_6 + \mu_2 x_5] \\ \dot{x}_4 = \frac{1}{L_{DC}} [x_1 - x_3] \\ \dot{x}_5 = \frac{1}{L_B} [e_B - r_B x_5 - \mu_2 x_3] \\ \dot{x}_6 = \frac{1}{L_L} [-R_L x_6 + x_3] \end{cases} \quad (2.10)$$

2.5 Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté les systèmes hybrides en générale : classification, structures et autonomie. L'importance des sources à énergies renouvelables dans les systèmes hybrides est présentée. Grâce à leur densité d'énergie importante par rapport aux batteries, les piles à combustibles sont fréquemment utilisées dans les systèmes multi-sources à énergies renouvelables. En effet, les batteries peuvent assurer les demandes transitoires en énergies des charges résidentielles lors de leurs démarrages. Une modélisation dynamique d'un système hybride (pile à combustible et une batterie) a été établit.

Dans le chapitre suivant, nous allons simuler le modèle mathématique de notre système hybride étudié.

Chapitre 3

Modélisation et simulation du système étudié

3.1 Introduction :

Dans le deuxième chapitre, nous avons présenté diverses structures des systèmes hybrides. Entre ces structures, nous choisissons pour notre système la configuration hybride parallèle. Cette configuration contient un bus continu (DC Link) alimenté par une pile à combustible à travers un hacheur élévateur qui maintient la tension du bus continu V_{bus} à sa référence, et un moyen de stockage basé sur des batteries qui est connecté au bus continu à travers d'un hacheur abaisseur-élévateur bidirectionnel en courant. Ce système hybride a l'avantage de la simplicité et de la robustesse.

On s'intéresse dans ce chapitre à la gestion de l'énergie entre les deux sources constituant notre système hybride, où nous allons présenter la modélisation des convertisseurs. D'autre part, on présentera dans ce chapitre, une commande basée sur la notion de platitude dans laquelle une boucle d'énergie est utilisée pour contrôler le flux d'énergie dissipé par les différentes sources installées (gestion de l'énergie), pareillement nous présenterons la boucle de courant associé au contrôleur plat, de type non linéaire, pour tous les convertisseurs liés au bus continu.

3.2 Modulation du système étudié :

La modélisation consiste à traduire en équation le comportement d'un système physique donné. afin de pouvoir comprendre son fonctionnement et faciliter son dimensionnement. L'architecture de système global est montrée sur (la **Figure 3.1**).

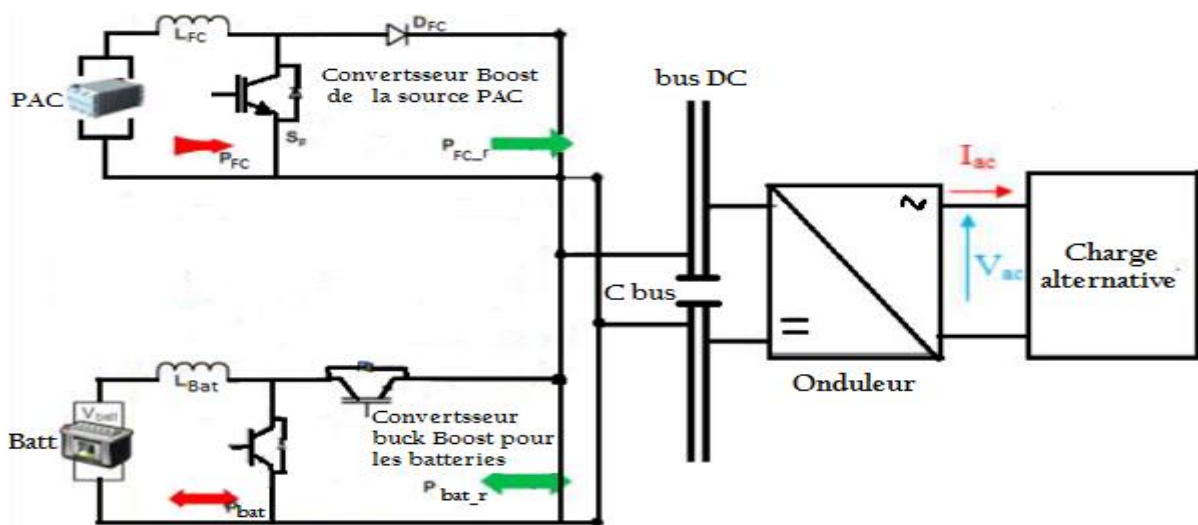


Figure 3.1: Architecture du système hybride étude

3.2.1 Les Convertisseur :

Ces convertisseurs sont fréquemment utilisés dans la pile à combustible pour générer les tensions et les courants souhaités. Ce type de convertisseurs n'est constitué que par des éléments réactifs (self, capacités) qui dans le cas idéal ne consomment aucune énergie, c'est pour cette raison qu'ils sont caractérisés par un grand rendement [36].

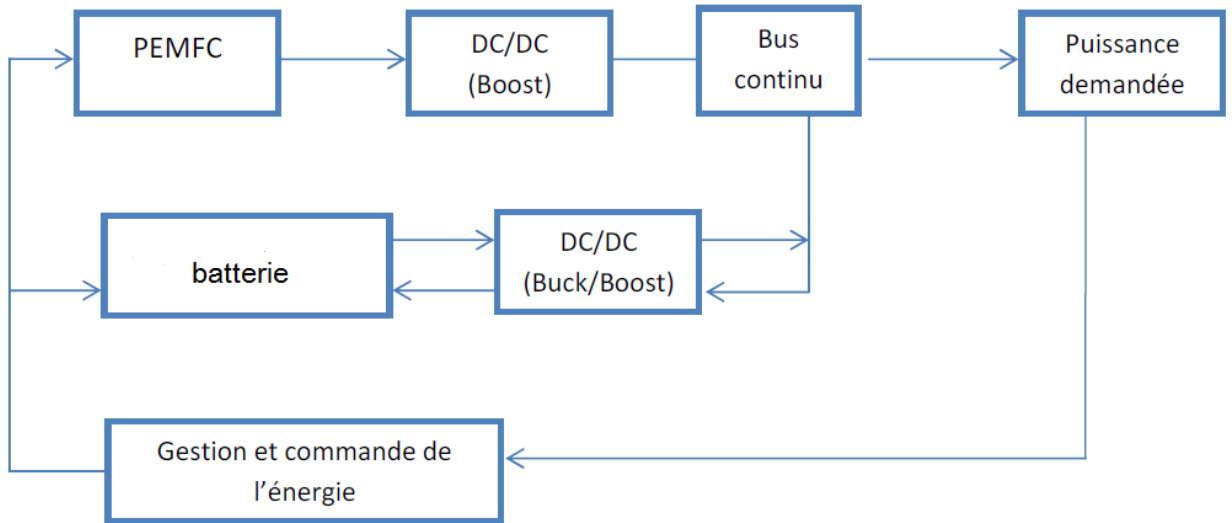


Figure 3.2 : Différents constituants du système hybride pile à combustible et batterie.

3.2.1.1 Convertisseur Boost :

La tension de la pile à combustible est inférieure à la tension de bus continu. Ainsi, nous utilisons un convertisseur Boost pour réguler la tension de sortie de la pile à combustible. Le circuit du convertisseur Boost (élevateur) est montré sur (la **Figure 3.3**) :

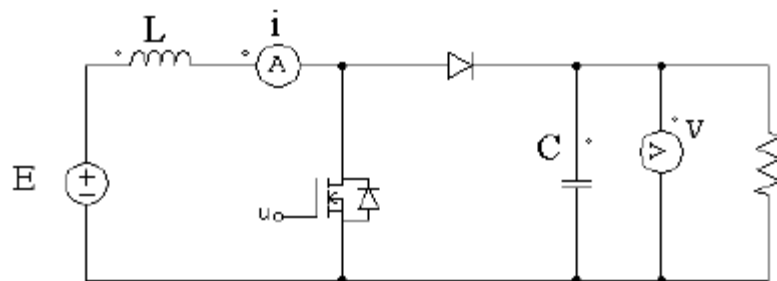


Figure 3.3 : Convertisseur Boost

• **Modèle du convertisseur**

Les équations différentielles du convertisseur sont obtenues en appliquant les lois de Kirchhoff à chacune des topologies possibles qui résulte d'une position donnée de l'interrupteur [37].

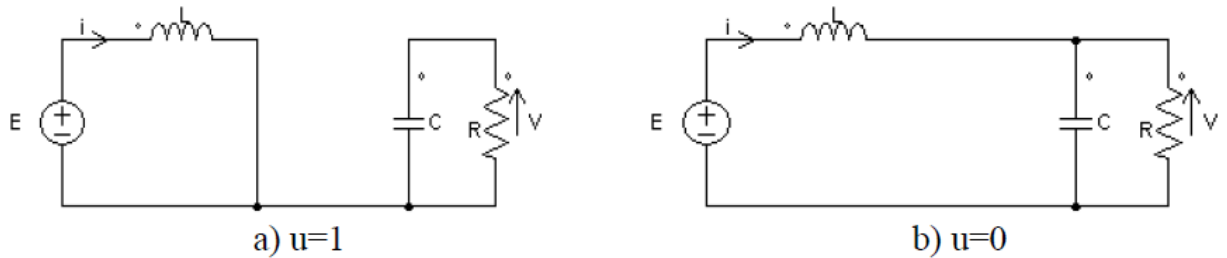


Figure 3.4: Topologies du Convertisseur Boost

Lorsque la fonction de commutation est $u=1$, et appliquant les lois de Kirchhoff au circuit qui en résulte (**Figure 3.4 (a)**). On obtient la dynamique suivante:

$$\begin{cases} L \frac{di}{dt} = E \\ C \frac{dv}{dt} = -\frac{V}{R} \end{cases} \quad (3.1)$$

Lorsque la diode est passante alors l'interrupteur est en position $u=0$ (**Figure 3.4 (b)**), ce nous donne :

$$\begin{cases} L \frac{di}{dt} = E - V \\ C \frac{dv}{dt} = i - \frac{V}{R} \end{cases} \quad (3.2)$$

Alors la dynamique du convertisseur est décrite par le système bilinéaire suivant:

$$\begin{cases} L \frac{di}{dt} = E - V(1 - u) \\ C \frac{dv}{dt} = -\frac{V}{R} + i(1 - u) \end{cases} \quad (3.3)$$

Alors lorsque $u=1$ ou $u=0$ on retrouve le modèle (3.1) ou le modèle(3.2) .Le modèle (3.3) est souvent appelé modèle commuté avec la fonction binaire de commutation $u \in \{1, \infty\}$.

- **Modèle moyen :**

Le modèle moyen du convertisseur est exactement le même que (3.3) avec la variable de contrôle u remplacée par une variable continue u_{av} qui prend ses valeurs dans l'intervalle $\{1, \infty\}$

Le modèle moyen du convertisseur Boost est décrit par :

$$\left\{ \begin{array}{l} L \frac{di}{dt} = E - V(1 - u_{av}) \\ C \frac{dv}{dt} = -\frac{V}{R} + i(1 - u_{av}) \end{array} \right. \quad (3.4)$$

- **Point d'équilibre :**

En utilisant la représentation (3.5) et On notant les valeurs moyennes équilibrées du courant et de la tension comme \bar{x}_1 et \bar{x}_2 on obtient en équilibre :

$$\begin{bmatrix} 0 & \frac{(1-U)}{L} \\ \frac{(1-U)}{C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{x}_1 \\ \bar{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{E}{L} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

3.2.1.2 Convertisseur Buck-Boost :

Le circuit du convertisseur Buck-Boost (abaisseur-élevateur) est montre sur (la **Figure 3.5**)

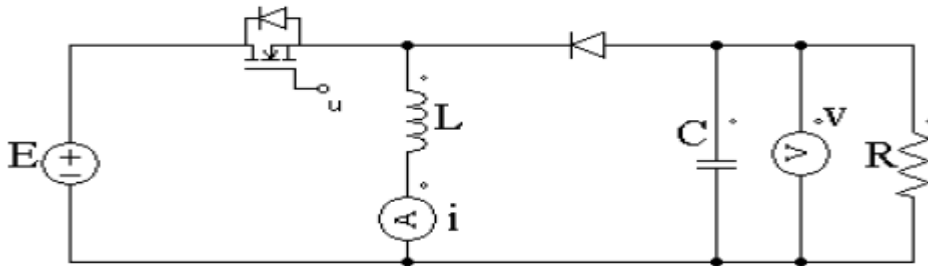


Figure 3.5 : Convertisseur Buck-Boost

- **Modèle du convertisseur :**

Pour obtenir les équations différentielles qui représentent le convertisseur Buck-Boost, on utilise la topologie réelle de (la **Figure 3.4**) . Les équations différentielles du convertisseur sont obtenues en appliquant les lois de Kirchhoff à chacune des topologies possibles qui réalise d'une position donnée de l'interrupteur [37].

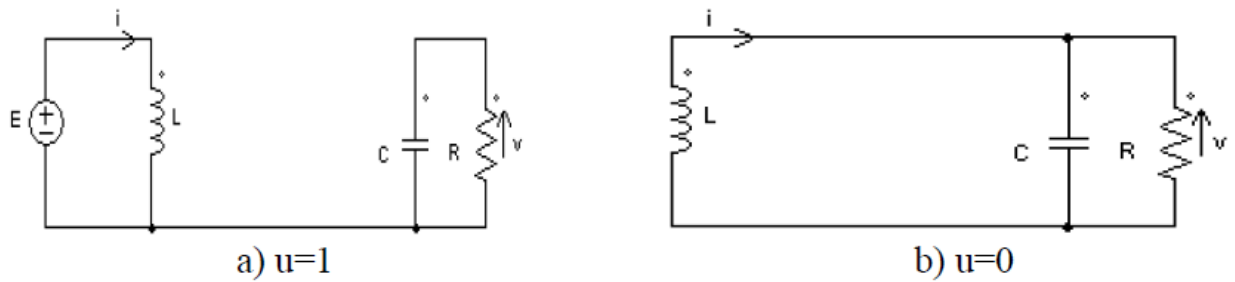


Figure 3.6 : Topologies du Convertisseur Buck-Boost

Lorsque la fonction de commutation est $u=1$, et appliquant les lois de Kirchhoff au circuit qui en résulte (**Figure 3.6 . (a)**). On obtient la dynamique suivante:

$$\left\{ \begin{array}{l} L \frac{di}{dt} = E \\ C \frac{dv}{dt} = -\frac{V}{R} \end{array} \right. \quad (3.6)$$

Lorsque la diode est passante alors l'interrupteur est en position $u=0$ (**Figure 3.6 (b)**), ce nous donne :

$$\left\{ \begin{array}{l} L \frac{di}{dt} = V \\ C \frac{dv}{dt} = -i - \frac{V}{R} \end{array} \right. \quad (3.7)$$

Alors la dynamique du convertisseur est décrite par le système bilinéaire suivant:

$$\left\{ \begin{array}{l} L \frac{di}{dt} = Eu + V(1 - u) \\ C \frac{dv}{dt} = -\frac{V}{R} - i(1 - u) \end{array} \right. \quad (3.8)$$

Alors lorsque $u=1$ ou $u=0$ on retrouve le modèle (3.6) ou le modèle (3.7) .Le modèle (3.8) est souvent appelé modèle commuté.

- **Modèle moyen :**

Le modèle moyen du convertisseur est exactement le même que (3.8) avec la variable de contrôle u remplacée par une variable continue u_{av} .

Le modèle moyen du convertisseur Buck-Boost est décrit par :

$$\begin{cases} L \frac{di}{dt} = Eu_{av} + V(1 - u_{av}) \\ C \frac{dv}{dt} = -\frac{V}{R} - i(1 - u_{av}) \end{cases} \quad (3.9)$$

• **Point d'équilibre :**

En équilibre, les dérivées des états moyens sont nulles et la commande moyenne u_{av} est égale à une valeur constante u . Comme résultat, on obtient un système linéaire d'équations pour les valeurs en régime permanent des états moyens non normalisés.

En utilisant la représentation (3.10) et On notant les valeurs moyennes équilibrées du courant et de la tension comme \bar{x}_1 et \bar{x}_2 , on obtient en équilibre :

$$\begin{bmatrix} 0 & \frac{(1-U)}{L} \\ \frac{-(1-U)}{C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{x}_1 \\ \bar{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{EU}{L} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

En résolvant le système d'équations (3.11), on obtient les états équilibre du système :

$$\begin{cases} \bar{x}_2 = -\frac{EU}{1-U} \\ \bar{x}_1 = \frac{EU}{(1-U)^2} \end{cases} \quad (3.11)$$

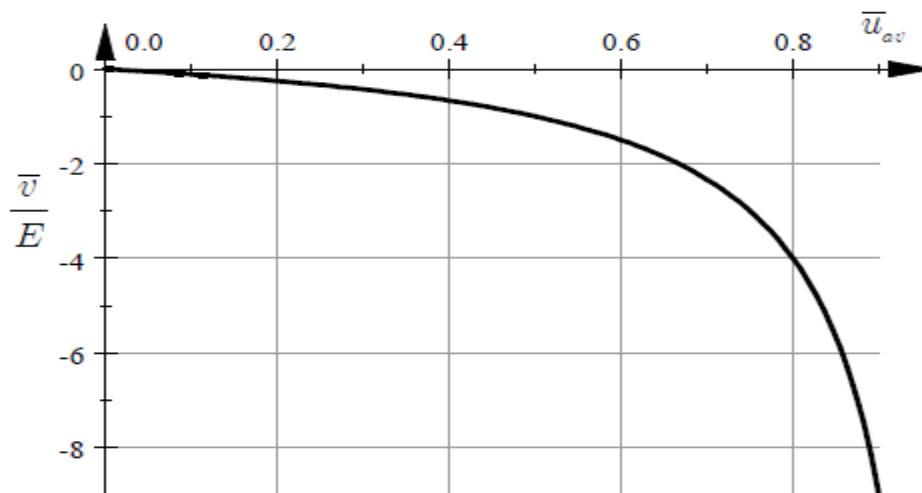


Figure 3.7 : Fonction de transfert statique du convertisseur Buck-Boost

3.2.2 Définition d'un système platitude :

Le concept de planéité du système a été conçu et affiné par M. Fliess, J. Lévine, P. Martin et P. Rouchon en 1992, et c'est un concept relativement nouveau en automatisation. La propriété de planéité ouvre la voie à la paramétrisation du comportement dynamique des systèmes physiques ou des processus. En conséquence, il est construit sur la description et la mise en évidence d'un ensemble de variables fondamentales qui représentent les sorties plates du système. La production d'une trajectoire souhaitée appropriée au modèle du système sera l'une des premières étapes du contrôle par planéité ; ensuite, dans un deuxième temps, la commande par planéité nécessitera de construire une commande par bouclage acquiesçant à la poursuite de cette trajectoire. D'autre part, elle sert fondamentalement à compenser les erreurs intrinsèques à toute modélisation par le principe de base de la boucle de rétroaction [38].

De façon succincte, un système représenté par un vecteur d'état x de dimension n et comportant m entrées représentées par un vecteur u et dont le comportement est régi par une équation d'état $\dot{X} = f(x, u)$ est dit plat, si l'on peut définir une sortie plate y de dimension m , fonction du vecteur x et des dérivées du vecteur d'entrée [9] :

$$y = \Phi(x, u, \dot{u}, \dots, u^{(s)}) \quad (3.12)$$

Où s est entier, et à partir de laquelle on peut exprimer les vecteurs d'état et d'entrée :

$$\begin{cases} x = \varphi(y, \dot{y}, \dots, y^{(r)}) \\ u = \Psi(y, \dot{y}, \dots, y^{(r+1)}) \end{cases} \quad (3.13)$$

Avec:

r : étant un entier.

x : le vecteur d'état

y : le vecteur de sortie plat

u : le vecteur de contrôle

➤ Il n'ya pas d'équation différentielle sous la forme :

$$0 = \zeta(y, \dot{y}, \dots, y^{(k)}) \quad (3.14)$$

Avec : k est le nombre fini de dérivées.

3.2.3 Modèle mathématique du système hybride :

Le modèle mathématique des convertisseurs Boost et Buck-Boost associés au pile à combustible, et les systèmes de stockage, ainsi que le modèle du bus continu sont donnés dans l'équation suivante: Les équations modélisant le convertisseur Boost associé à la source é et la pile à combustible par le modèle moyen: [40].

$$\begin{cases} L_{FC} \frac{dI_{FC}}{dt} = V_{FC} - (1 - U_{FC})V_{bus} - r_{FC}I_{FC} \\ I_{FC} = I_{LFC} \end{cases} \quad (3.15)$$

Les équations modélisant le convertisseur Buck-Boost associé à la batterie :

$$\begin{cases} L_{Bat} \frac{dI_{bat}}{dt} = V_{Bat} - (1 - U_{Bat})V_{bus} - r_{Bat}I_{Bat} \\ V_{Bat} = E_0 - R_{Bat}I_{L-Bat} \end{cases} \quad (3.16)$$

$E_0 \rightarrow$ la force électromotrice de la batterie

Le bus continu est modélisé par l'équation suivante:

$$C_{bus} \frac{dV_{bus}}{dt} = -I_{Load} + (1 - U_{Bat})I_{Bat} + (1 - U_{FC})I_{LFC} \quad (3.17)$$

Où U_{Bat} , U_{FC} sont les signaux de contrôle de la batterie, le convertisseur de la pile à combustible. I_{Bat} , I_{LFC} sont successivement les courants de la batterie, et la pile à combustible. C_{bus} est le condensateur du bus continu.

3.2.4 Régulation de l'énergie du système hybride et planification de la trajectoire de référence :

L'un des principaux avantages du contrôle avec la théorie de la planéité est la possibilité de planifier toutes les trajectoires de la sortie plate ; ainsi, si le système est correctement modélisé, la représentation de ses trajectoires permet de connaître à tout moment les variables d'état et les variables de commande du système, sans qu'il soit nécessaire d'intégrer d'équations différentielles [40].

Pour le système hybride renouvelable proposé (FC-Bat), il est supposé que les courants des FC, batterie suivent leurs signaux de référence impeccablement. Par conséquent, le courant de référence peut être donné par les équations suivante :

$$I_{FCref} = \frac{P_{FC}}{V_{FC}} = \frac{P_{FCref}}{V_{FC}} \quad (3.18)$$

$$I_{\text{Batref}} = \frac{P_{\text{Bat}}}{V_{\text{Bat}}} = \frac{P_{\text{Batref}}}{V_{\text{Bat}}} \quad (3.19)$$

Où P_{fc} , P_{Batt} sont les puissances générées par le système hybride FC- batterie. (r_{fc} , r_{Bat}) représentent les seules pertes statiques dans les convertisseurs FC ainsi que le batteries respectivement.

V_{fc} , V_{Bat} , le I_{fc} , I_{Bat} sont les tensions et les courants de la source pile à combustible et le batterie de stockage. L'énergie Y_{bus} stockée dans le bus continu peut être donnée comme suit:

$$Y_{\text{bus}} = \frac{1}{2} C_{\text{bus}} V_{\text{bus}}^2 \quad (3.20)$$

En outre l'énergie stockée dans les batteries peut être donnée par l'équation suivante :

$$Y_{\text{bat}} = \frac{1}{2} C_{\text{bat}} V_{\text{bat}}^2 \quad (3.21)$$

Par conséquent, l'énergie totale Y_{tot} électrostatique emmagasinée dans la batterie de bus continue C_{bus} et dans le batterie C_{Bat} peut être écrite comme:

$$Y_{\text{tot}} = \frac{1}{2} C_{\text{bus}} V_{\text{bus}}^2 + \frac{1}{2} C_{\text{bat}} V_{\text{bat}}^2 \quad (3.22)$$

l'énergie capacitive de bus continue Y_{Bus} peut être décrite en utilisant P_{FC_r} , P_{Bat_r} , et P_{ch} par une équation différentielle.

$$\dot{Y}_{\text{bus}} = P_{\text{FC}_r} + P_{\text{Bat}_r} - P_{\text{ch}} \quad (3.23)$$

Tel que:

$$P_{\text{FC}_r} = P_{\text{FC}} - r_{\text{FC}} \times I_{\text{FC}}^2 = P_{\text{FC}} - r_{\text{FC}} \times \left(\frac{P_{\text{FC}}}{V_{\text{FC}}} \right)^2 \quad (3.24)$$

$$P_{\text{Bat}_r} = P_{\text{Bat}} - r_{\text{Bat}} \times I_{\text{Bat}}^2 = P_{\text{Bat}} - r_{\text{Bat}} \times \left(\frac{P_{\text{Bat}}}{V_{\text{Bat}}} \right)^2 \quad (3.25)$$

La puissance demandée par la charge peut être exprimée par l'équation suivante:

$$P_{\text{ch}} = V_{\text{bus}} I_{\text{ch}} = \sqrt{\frac{2Y_{\text{bus}}}{C_{\text{bus}}}} \cdot I_{\text{ch}} \quad (3.26)$$

De plus, la puissance délivrée à partir des batterie peut être donnée par l'équation :

$$P_{\text{Bat}} = \sqrt{\frac{2Y_{\text{Bat}}}{C_{\text{Bat}}}} \cdot I_{\text{Bat}} \quad (3.27)$$

3.2.5 Démonstration de la platitude du système hybride proposée :

Les sorties plat "Y", les variables d'entrée de commande "u" et les variables d'état "x" peuvent être données par les formule suivante :

$$\begin{aligned}
 Y &= \begin{bmatrix} Y_{bus} \\ Y_{tot} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \end{bmatrix} \\
 u &= \begin{bmatrix} P_{Bat} \\ P_{totdemd} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} \\
 X &= \begin{bmatrix} V_{bus} \\ V_{Bat} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{3.28}$$

Dans cette étude, la source pile à combustible et le batterie sont considérées comme étant la source d'alimentation principale pour le système hybride proposé, où $P_{totdemd}$ est la puissance totale demandée par l'algorithme de contrôle par platitude.

Nous adoptons que l'énergie électrostatique du bus continu Y_{bus} du système est constante et est déterminée comme sortie plat Y_1 . Nous pouvons donc écrire:

$$\dot{Y}_{bus} = 0 = P_{FC-r} + P_{Batt-r} - P_{ch} \tag{3.29}$$

D'un autre côté, le Y_{tot} qui est l'énergie électrostatique totale stockée dans le batterie du bus continu C_{BUS} et dans les batteries, est constante et est déterminée comme une sortie plate Y_2 . Nous pouvons écrire:

$$\dot{Y}_2 = 0 = P_{FC-r} - P_{ch} \tag{3.30}$$

La première variable d'état (tension du bus continu) $V_{bus} = x_1$ et la puissance du batteries (définie comme une variable de commande u_1) peuvent être données par les équations algébriques suivantes:

$$x_1 = V_{bus} = \sqrt{\frac{2Y_{bus}}{C_{bus}}} = \varphi(Y_1) \tag{3.31}$$

Le calcul des variables de contrôle peut être réalisé en fonctions des « mécanismes Y » de sortie du système et leurs dérivés. En ce qui suit les formules de calcul :

$$\dot{Y}_{bus} = P_{FC-r} + P_{Bat-r} - r_{Bat} \times \left(\frac{P_{Bat}}{V_{Bat}}\right)^2 - \sqrt{\frac{2Y_{bus}}{C_{bus}}} \cdot I_{ch} \tag{3.32}$$

$$P_{\text{Bat}_r} = Y_{\text{bus}} - P_{\text{FC}_r} + r_{\text{Bat}} \times \left(\frac{P_{\text{Bat}}}{V_{\text{Bat}}}\right)^2 + \sqrt{\frac{2Y_{\text{bus}}}{C_{\text{bus}}}} \cdot I_{\text{ch}} \quad (3.33)$$

On veut que:

$$u_1 = P_{\text{Bat}} = P_{\text{Bat}_r} \quad (3.34)$$

$$u_1 = Y_{\text{bus}} - P_{\text{FC}_r} + r_{\text{Bat}} \times \left(\frac{P_{\text{Bat}}}{V_{\text{Bat}}}\right)^2 + \sqrt{\frac{2Y_{\text{bus}}}{C_{\text{bus}}}} \cdot I_{\text{ch}} \quad (3.35)$$

$$u_1 - r_{\text{Batt}} \times \left(\frac{P_{\text{Bat}}}{V_{\text{Bat}}}\right)^2 = Y_{\text{bus}} - P_{\text{FC}_r} + \sqrt{\frac{2Y_{\text{bus}}}{C_{\text{bus}}}} \cdot I_{\text{ch}} \quad (3.36)$$

$$u_1 - \frac{u_1^2}{\frac{4V_{\text{Batt}}^2}{4r_{\text{Batt}}}} = Y_{\text{bus}} - P_{\text{FC}_r} + \sqrt{\frac{2Y_{\text{bus}}}{C_{\text{bus}}}} \cdot I_{\text{ch}} \quad (3.37)$$

Avec:

$$P_{\text{Bat}_r_{\text{max}}} = \frac{V_{\text{Bat}}^2}{4r_{\text{Bat}}} \quad (3.38)$$

$$u_1 - \frac{u_1^2}{4P_{\text{Bat}_r_{\text{max}}}} = Y_{\text{bus}} - P_{\text{FC}_r} + \sqrt{\frac{2Y_{\text{bus}}}{C_{\text{bus}}}} \cdot I_{\text{ch}} \quad (3.39)$$

$$\frac{u_1}{P_{\text{Bat}_{\text{max}}}} - \frac{u_1^2}{4 \cdot P_{\text{Bat}_{\text{max}}}^2} = \frac{Y_{\text{bus}} - P_{\text{FC}_r} + \sqrt{\frac{2Y_{\text{bus}}}{C_{\text{bus}}}} \cdot I_{\text{ch}}}{P_{\text{Bat}_{\text{max}}}} \quad (3.40)$$

$$-\frac{u_1}{P_{\text{Bat}_{\text{max}}}} + \left(\frac{u_1}{4P_{\text{Bat}_{\text{max}}}}\right)^2 = -\frac{Y_{\text{bus}} - P_{\text{FC}_r} + \sqrt{\frac{2Y_{\text{bus}}}{C_{\text{bus}}}} \cdot I_{\text{ch}}}{P_{\text{Bat}_{\text{max}}}} \quad (3.41)$$

$$-\frac{u_1}{P_{\text{Bat}_{\text{max}}}} + \left(\frac{u_1}{4P_{\text{Bat}_{\text{max}}}}\right)^2 + 1 - 1 = \frac{Y_{\text{bus}} - P_{\text{FC}_r} + \sqrt{\frac{2Y_{\text{bus}}}{C_{\text{bus}}}} \cdot I_{\text{ch}}}{P_{\text{Bat}_{\text{max}}}} \quad (3.42)$$

$$\left(1 - \left(\frac{u_1}{2P_{\text{Bat}_{\text{max}}}}\right)^2\right) - 1 = \frac{Y_{\text{bus}} - P_{\text{FC}_r} + \sqrt{\frac{2Y_{\text{bus}}}{C_{\text{bus}}}} \cdot I_{\text{ch}}}{P_{\text{Bat}_{\text{max}}}} \quad (3.43)$$

$$1 - \frac{u_1}{2 \cdot P_{\text{Bat}}} = \sqrt{1 - \left(\frac{Y_{\text{bus}} - P_{\text{FC}_r} + \sqrt{\frac{2Y_{\text{bus}}}{C_{\text{bus}}}} \cdot I_{\text{ch}}}{P_{\text{Bat}_{\text{max}}}}\right)} \quad (3.44)$$

$$u_1 = 2 \cdot P_{\text{Bat}_{\text{max}}} \cdot \left(1 - \sqrt{1 - \left(\frac{Y_{\text{bus}} - P_{\text{FC}_r} + \sqrt{\frac{2Y_{\text{bus}}}{C_{\text{bus}}}} \cdot I_{\text{ch}}}{P_{\text{Bat}_{\text{max}}}}\right)}\right) \quad (3.45)$$

D'après l'équation (2.44), le signal de commande u_1 est écrit en fonction de la première sortie plate et sa dérivée.

$$u_1 = \psi(Y_1, \dot{Y}_1) = P_{\text{Bat}_{\text{ref}}} \quad (3.46)$$

D'où $P_{\text{Bat}_{\text{lim}}}$ peut être définie par:

$$P_{\text{Bat}_{\text{lim}}} = \frac{V_{\text{Bat}}^2}{4r_{\text{Bat}}} \quad (3.47)$$

$P_{\text{Bat}_{\text{lim}}}$ est la puissance maximale limitée du convertisseur Buck-Boost, associé au batteries.

3.2.6 Contrôle des convertisseurs Asservissement des trajectoires à leur référence:

Les grandeurs d'entrée étant définies par des relations analytiques, on pourrait envisager de commander le système en boucle ouverte. Cependant, pour prendre en compte les erreurs de modélisations il est nécessaire d'asservir les différentes trajectoires à leur référence

Pour faire suivre la sortie plate Y à sa référence Y_{ref} , nous utilisons la loi de commande asymptotique suivante [41].

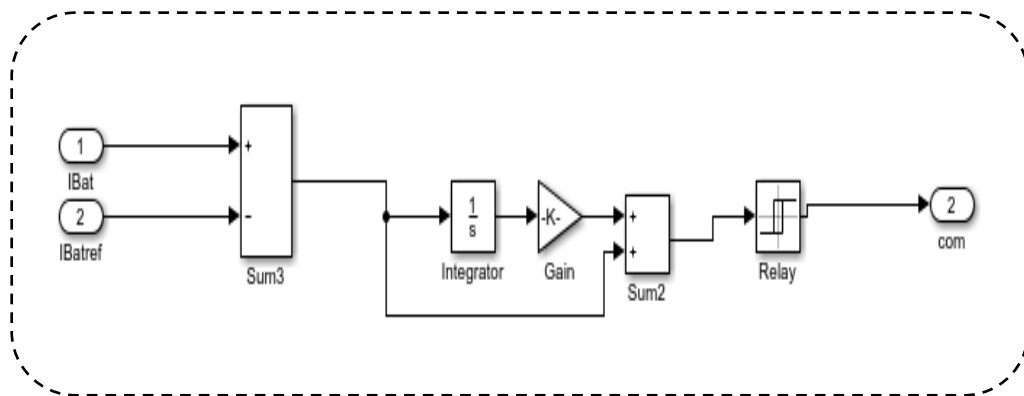


Figure 3.8 : commande du Buck-boost

On utilise une linéarisation entrée sortie pour établir la commande. Pour cela, on pose:

$$\dot{Y}_1 = U_1 \quad (3.48)$$

$$\dot{Y}_2 = U_2 \tag{3.49}$$

$$\left(\dot{Y}_{1ref} - \dot{Y}_1 \right) + k_1(Y_{1ref} - Y_1) + k_2 \int (Y_{1ref} - Y_1) = 0 \tag{3.50}$$

$$\dot{Y}_1 = \dot{Y}_{1ref} + k_1(Y_{1ref} - Y_1) + k_2 \int (Y_{1ref} - Y_1) \tag{3.51}$$

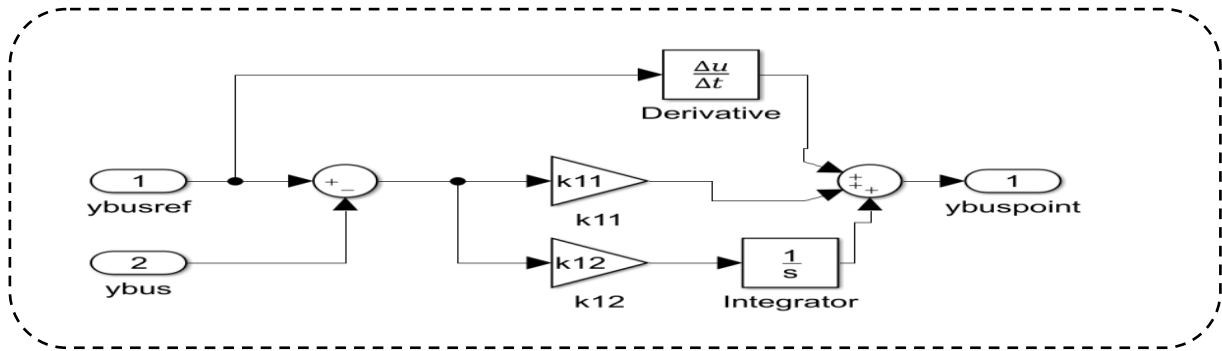


Figure 3.9 : Schéma bloc du asservissement de trajectoire

Pour traquer la deuxième sortie plate du système hybride, on utilise aussi la loi de contrôle suivante:

$$\dot{Y}_2 = \dot{Y}_{2ref} + k_{21}(Y_{2ref} - Y_2) \tag{3.52}$$

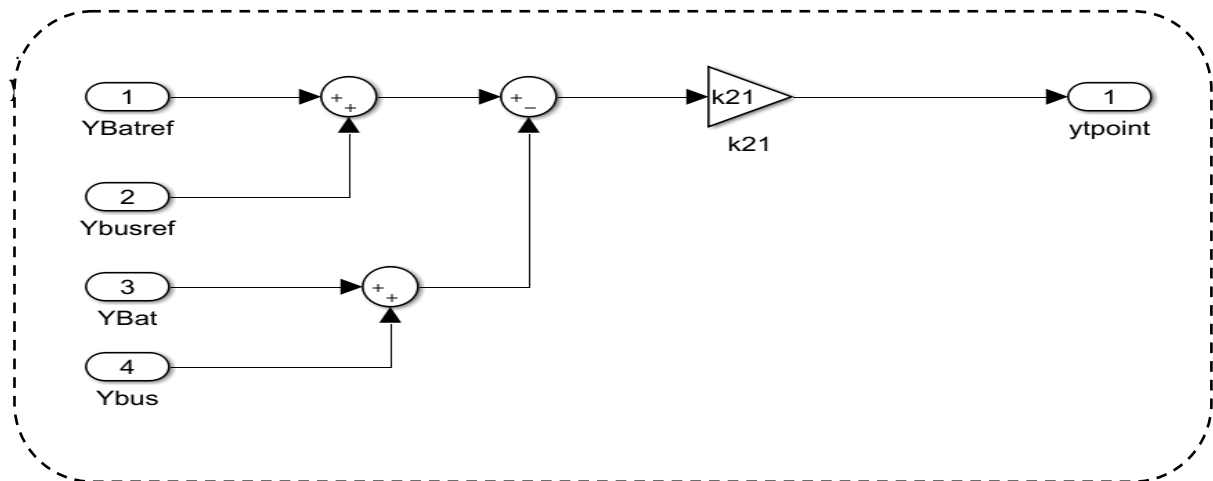


Figure 3.10 : Schéma bloc du asservissement de trajectoire2

En résolvant l'équation quadratique qui caractérise le comportement de la loi de contrôle, (4.49) pour déterminer les coefficients de régulation k_{11} et k_{12} , en engageant ses racines:

$$P^2 + K_{11}P + K_{12} = 0 \tag{3.53}$$

D'où la loi de contrôle de l'énergie du bus continu :

$$k_{1,21} = 2\zeta w_n \text{ et } K_2 = w_n^2 \tag{3.54}$$

ζ et w_n symbolisent l'amortissement et la pulsation naturelle désirés respectivement.

Les coefficients k_{11} , k_{12} sont positifs; ceci indique que les racines du système déterminent possèdent des parties réelles négatives, donc la stabilité de la commande de système est assurée.

Les signaux de commande (U_1 , U_2) ont été utilisés pour poursuivre la trajectoire désirée du système hybride proposé et faire en sorte que le système traque bien la trajectoire de référence.

3.3 Résultats et simulation le système étude :

À l'aide des modèles et des lois de commande élaborés dans les chapitres précédents pour les différents éléments composants le système étudié, nous allons discuter les résultats de simulation de la gestion d'énergie dans tout le système obtenus au cours de cette étude. Pour ce faire, nous avons conçu un algorithme implémenté sous *Matlab- Simulink* qui Traite des différentes situations possibles que nous appelons à faire face. Le but de ce chapitre est de valider la stratégie par simulation. Le schéma de (la **Figure 3.11**) représente la simulation par le logiciel Matlab de notre système hybride choisi.

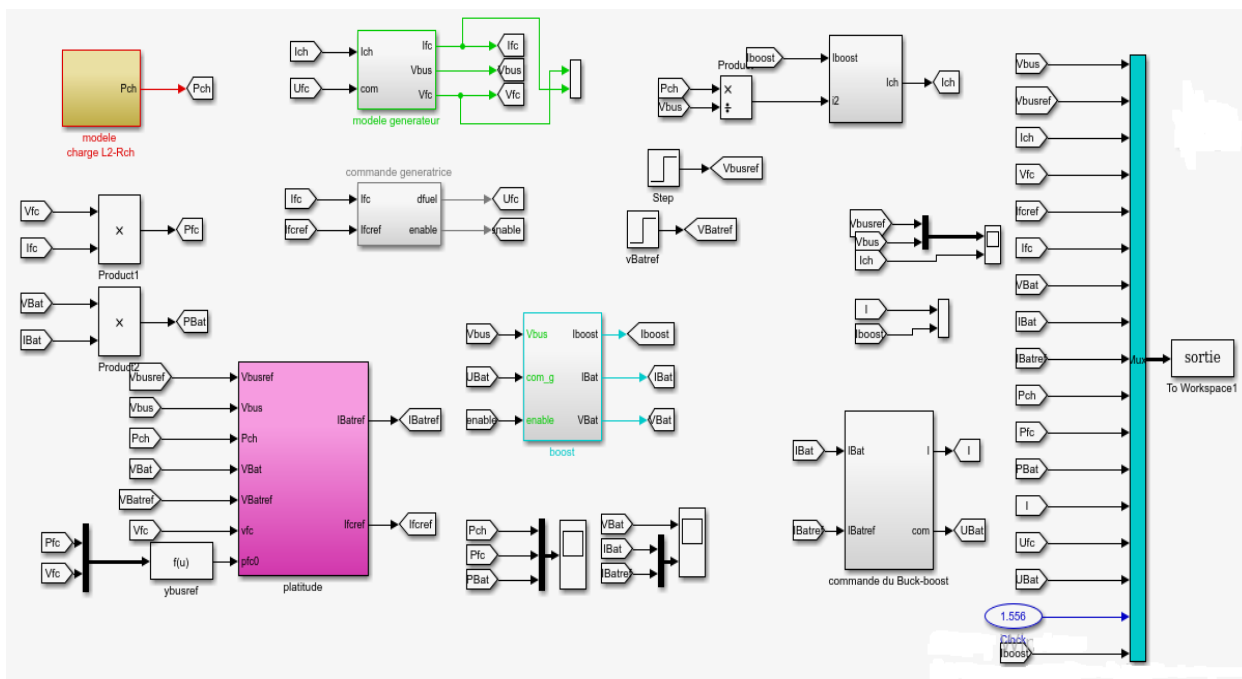


Figure 3.11 : Schéma de simulation du système études

Les différents paramètres de la simulation de cette source hybride sont donnés dans le tableau ,Nous utilisons la même base des règles donnée par le tableau :

La pile à combustible	Type	Tension nominale	Courant nominale	Puissance nominale générée
	PEM	24V	27A	400W

Tableau 3.1 : Paramètre de la pile à combustible

Batteries	Type	Tension nominale	Capacité	Résistance interne
		24V	100Ah	0.0012Ω

Tableau 3.2 : Paramètre de la batterie utilisée

- Les résultats de simulation obtenus sur Matlab-Simulink sont illustrés sur les figures suivantes:

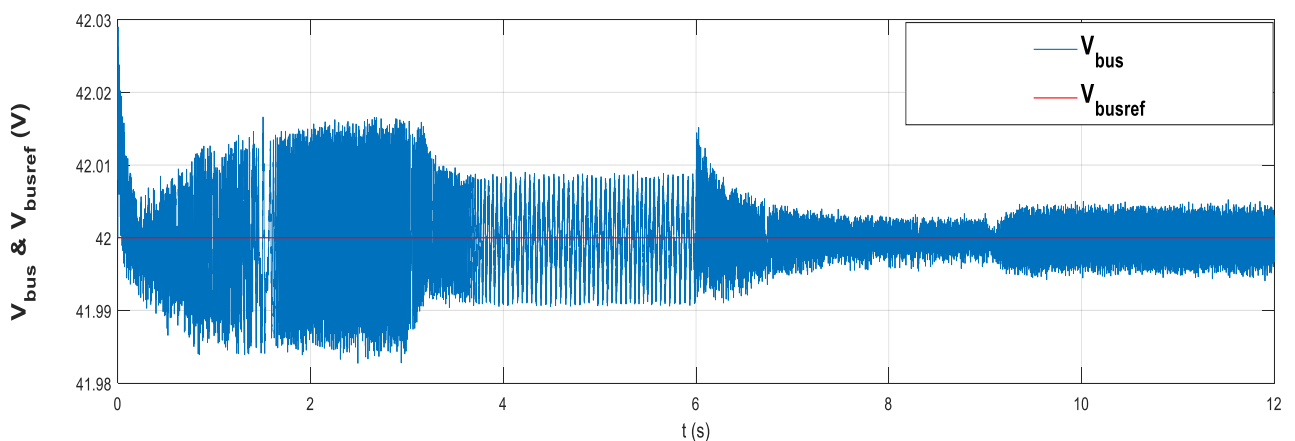


Figure 3.12 : Allure du V_{BUS} et sa référence

la tension du bus continu est fixée à un point constant comme illustré à (la Figure 3.12) .De sorte que le courant passe par la liaison bus pour partager la demande de charge avec la multi

source système (piles à combustible et batterie) selon la modification proposée approche de séparation de fréquence. La stratégie de contrôle de tension mise en œuvre maintient la tension du bus continu autour de la valeur de référence constante. Pour cette simulation, la référence V_{BUS} est fixée à 42 V. Selon le résultat de la simulation, le contrôle de tension est satisfait puisque la mesure est très proche du point de consigne avec des fluctuations mineures dues aux variations de la charge.

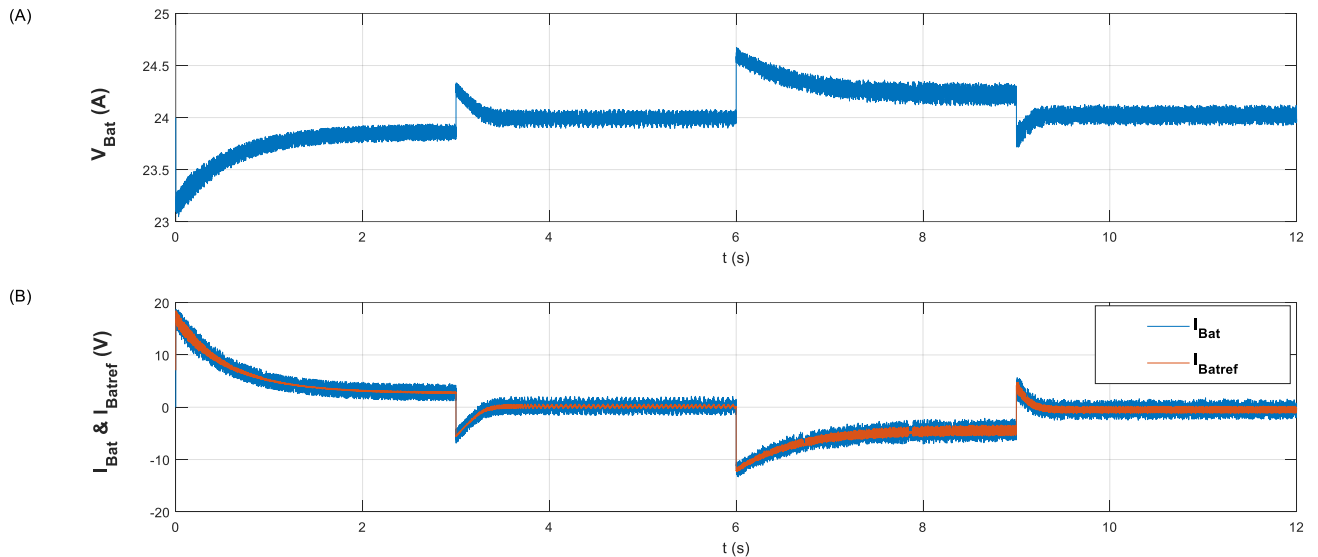


Figure 3.15 : (A) Allure de la tension de batterie

(B) Allure du courant de batterie et sa référence

La tension et le courant de la batterie sont présentés, respectivement, à (la Figure 3.15). La batterie assure la réponses rapide aux besoins en puissance de la charge. Ça peut être noté à partir de la figure ci-dessus que lorsqu'il y a une demande de charge considérable, cela entraînera un courant de décharge rapide de la batterie. D'autre part, lors de fortes chutes de puissances de la charge, la tension de la batterie augmente en raison du courant récupéré.

Lorsque I_{Bat_ref} est en état de charge (zones négatives), le dépassement de production de l'énergie est stockée dans les batteries. Sinon, dans l'état de décharge (zones positives), l'énergie stockée est utilisée pour assurer la compensation de celle de la charge.

L'amplitude du courant de batterie fluctue entre la partie positive et partie négative pour déterminer l'état buck- boost du convertisseur.

affiche la tension et le courant de la batterie Réponse V_{Bat} I_{Bat} en présence de la tension DC Bus variation. La batterie alimente la charge en régime transitoire et en régime permanent

pas d'énergie est extrait puisque le courant de la batterie est nul, le sens positif de la batterie courant I_{Bat} signifie que la batterie alimente charge (décharge) et le négatif correspond pour récupérer l'énergie du FC vers la batterie(charge).

Enfin, lorsque la charge la demande est stable sans sollicitations haute fréquence, la tension de la batterie est stable.

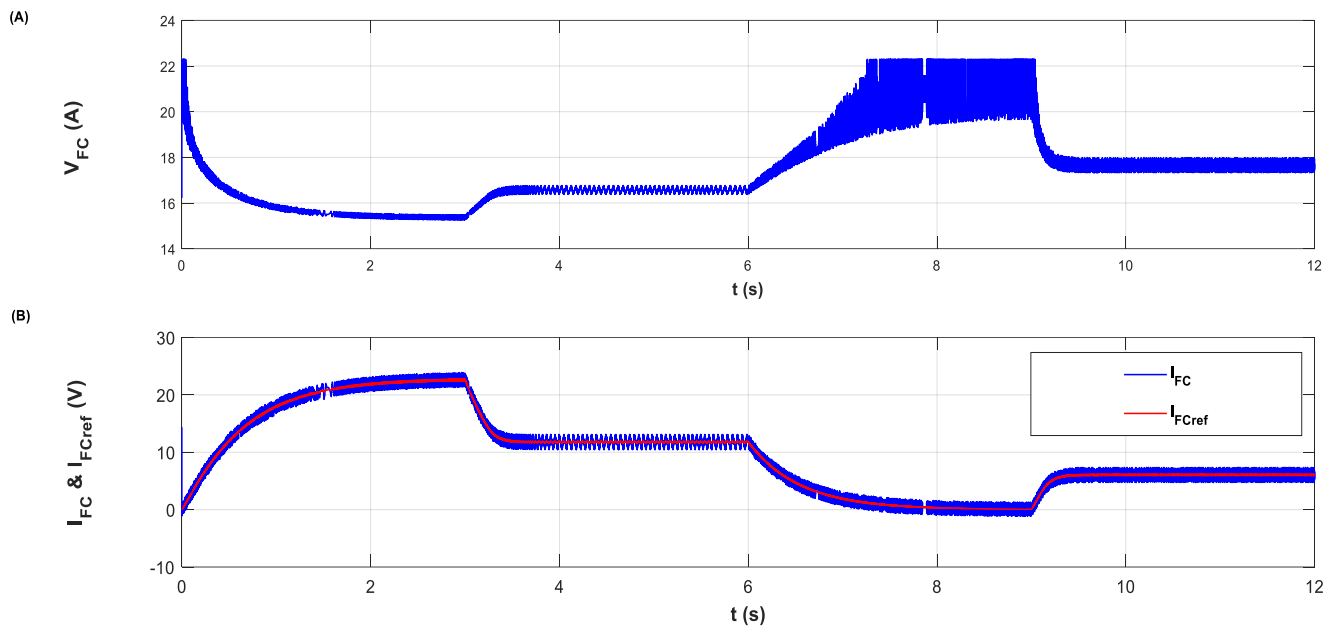


Figure 3.14 : (A) Allure de la tension de pile à combustible

(B) Allure du courant de pile à combustible et sa référence

La Figure 3.14 montre la tension et le courant de la pile à combustible respectivement. La contribution du courant de la pile à combustible, représente une réponse lente aux exigences de puissance de la charge par rapport celle de la batterie. et à celle de charge. Les variations du I_{FC} et I_{FCref} sont modérées. La tension aux bornes de la pile Fc est illustrée En ce qui concerne la réponse en tension, et à côté de la première chute de tension due à l'activation de la tension Fc, V_{FC} ne fluctue pas de manière significative par rapport à V_{FC} ; cela signifie que la pile Fc est pas demandé pendant les états de charge transitoires.

Un comportement régulier de la tension et le courant de pile à combustible V_{FC} et I_{FC} est observé face aux changements de la puissance demandée par la charge.

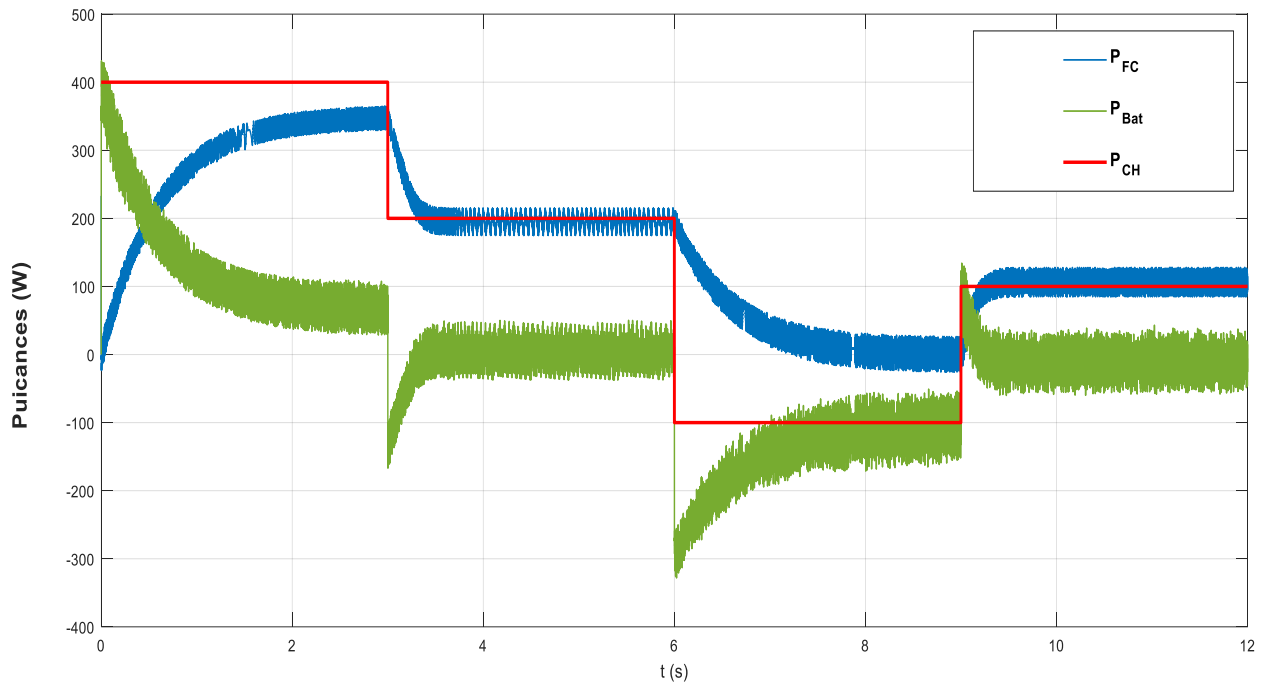


Figure 3.15 : Allure du transfert de puissances de $P_{CH} / P_{Bat} / P_{FC}$

La Figure 3.15 montre le transfert des puissance entre les sources et la charge. Nous pouvons remarquer que la somme des puissances des sources égale à la puissance de la charge. La pile à combustible a tendance de suivre les variation de la demande de charge, ce qui explique l'importance de la pile dans notre système. Dans le cas où il ya un excès provenant d'autres source, la pile diminue sa puissance de sortie, de telle sorte la charge est toujours satisfaite la tension du bus continu et la puissance demandée.

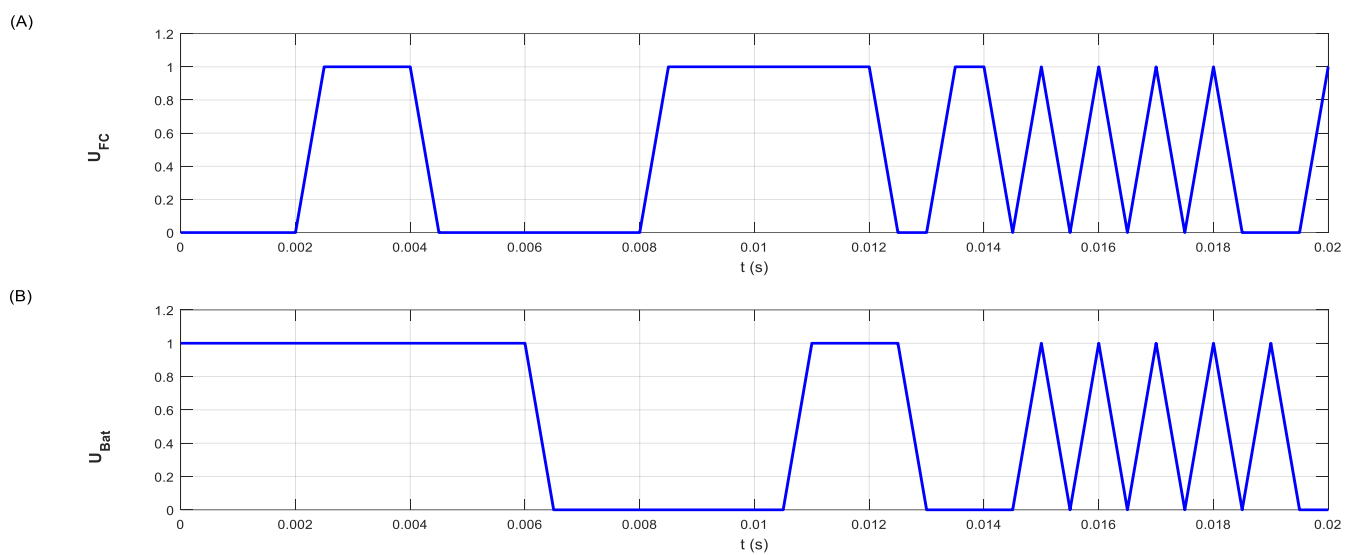


Figure 3.16 : (A) Commande du convertisseur Boost du pile à combustible

(B) Commande du convertisseur Buck-Boost du batterie

La **Figure 3.16** présente les signaux commande U_{FC} du convertisseur Boost du FC et U_{Bat} du convertisseur Buck-Boost du Bat .

3.4 Conclusion :

Ce chapitre présente un travail théorique et expérimental sur la gestion d'énergie pour les systèmes hybrides, à savoir PàC/Batterie. La complexité et la non linéarité des systèmes étudiés d'une part et les limitations de chaque source d'autre part, rendent difficile de trouver le contrôle qui répartit de manière intelligente le flux de puissance avec les garanties de stabilité.

L'objectif attribué à notre contribution expérimentale est d'examiner puis vérifier le bon fonctionnement de la commande appliquée à notre système hybride proposé sous les contraintes techniques et les objectifs discutés précédemment. Réaliser une production d'énergie efficace du système proposé, la gestion de l'énergie était basée sur la maximisation de la part du pack de batteries et la minimisation de la contribution de la source FC. Étant donné que l'énergie produite par FC est lente au démarrage et a une charge rapide changements. Un de batterie était connecté à la liaison de bus DC via un convertisseur abaisseur-élevateur DC afin de compenser la fluctuations du courant haute fréquence des sources FC. La constante de temps de la fréquence approche a été choisie pour un système de gestion efficace basé sur l'état de santé des les batteries et le profil de charge.

Les résultats de simulation ont été présentés à l'aide du logiciel de simulation numérique Matlab-Simulink pour les deux architectures de puissance étudiées. La mise à l'échelle des paramètres de contrôle qui permettent au prix de tenir compte des limitations inhérentes à l'utilisation de la pompe à chaleur comme principale source d'énergie a été mise en place et validée par des résultats de simulation. étant donné que la mole de combustible utilisait une alimentation en courant continu programmée pour reproduire le comportement statique de la pompe à chaleur. Cette structure de contrôle nous a permis d'obtenir de bonnes performances dynamiques de notre système hybride.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Conclusion générale

Ce travail s'est concentré sur une nouvelle stratégie de contrôle pour les sources d'énergie électrique hybrides pour une application avec une attention particulière aux systèmes où la source d'énergie est une pile à combustible et un système de stockage (batterie).

Tout d'abord, des généralités ont été introduites sur les systèmes d'alimentation hybrides. Ensuite, nous avons donné une classification des différentes stratégies de gestion de l'énergie afin de choisir une technologie appropriée pour gérer l'énergie produite par les différentes parties de notre système hybride dont le cas a déplacé l'énergie de commutation vers les différentes parties dans le chapitre deux. Tout ce qui a été discuté dans les chapitres 1 et 2 nous a guidés dans le choix de la conception de pilote appropriée pour notre système hybride.

Nous avons expliqué la conception du système hybride proposé, son modèle mathématique et le contrôle de planéité appliqué, où la définition et les limites de ce dernier sont mentionnées. Les équations mathématiques décrivant le panneau de commande sont présentées en traçant ses propres équations de commande adaptées aux différents transformateurs qui lui sont associés. Pour piloter notre système, il s'agissait d'une méthode qui utilise les propriétés de planéité. En considérant l'énergie stockée dans les condensateurs comme des variables de sortie plates et les forces échangées entre la source principale et les autres sorties comme des variables de contrôle, il a été possible de permettre l'application du concept de planéité. Nous avons alors pu cheminer les sorties plates en tenant compte de différentes contraintes, à savoir, les différences de courant délivré par la pile à combustible et la puissance maximale qu'elle délivrerait en même temps la sortie lors du démarrage du système hybride et de ces différents onduleurs afin de passer à l'étape de simulation qui a été implémentée dans un environnement Matlab-Simulink. Les résultats obtenus à partir de notre contrôle montrent des résultats intéressants, soit au niveau de la régulation de tension dans le vecteur continu, soit en ce qui concerne la gestion de l'énergie produite par les différentes sources. Le scénario étudié pour gérer le flux d'énergie généré par le système hybride a été examiné et analysé. Sur le concept de planéité il s'avère très fort vis à vis des fortes charges ou des fortes variations paramétriques dynamiques qui permettent d'obtenir un système très stable

Bibliographie

- [1] BERNARD, J. « Véhicules hybrides à pile à combustible » Thèse de Doctorat, L'UNIVERSITÉ DE VALENCIENNES ET DU HAINAUT-CAMBRESIS (3 décembre 2007) .
- [2] Frajd Mohammed et MECHERI khair .« Etude et gestion d'un système hybride. » Mémoire de Magister, UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA (2019/07/07) .
- [3] P. Massonnat.. « Séminaire sur la pile a combustible (Pile a combustible a membrane échangeuse de proton) » Thèse de Doctorat, (15 janvier 2020) .
- [4] Alireza Payman. « contribution a la gestion de energie dans les systèmes hybride multi_source multi_charges » Thèse de Doctorat, université téhran iran (15juillet 2009) .
- [5] Idris Sadli « MODELISATION PAR IMPEDANCE D'UNE PILE ACOMBUSTIBLE PEM POUR UTILISATION ENELECTRONIQUE DE PUISSANCE » Thèse de Doctorat, Ingénieur de l'université de Béjaia, Algérie (7 décembre 2006) .
- [6] Chaima Mahjoubi « MODELISATION MULTI PHYSIQUE ET QESTION DENERGIE DE MICRO_RESEAU RESIDENTIEL AUTONOME » Thèse de Doctorat, UNIVERSITE DE NANTES (26 October 2019) .
- [7] Zandi Majid « CONTRIBUTION AU PILOTAGE DES SOURCES HYBRIDES D'ENERGIE ELECTRIQUE » Thèse de Doctorat, L'Institut National Polytechnique de Lorraine (12 novembre 2010) .
- [8] T hounthong Phatiphat « CONCEPTION D'UNE SOURCE HYBRIDE UTILISANT UNE PILE A COMBUSTIBLE ET DES SUPERCONDENSATEURS » Thèse de Doctorat, L'Institut National Polytechnique de Lorraine (09 décembre 2005) .
- [9] Moustafa Maafi « Etude, modélisation et commande par platitude d'une source hybride PAC, SCs et Batterie connecté via un transformateur multi enroulement pour une application embarquée » Mémoire de Master Université Mohamed Khider Biskra (4 juin 2014) .
- [10] Benmouna Amel « Gestion énergétique reconfigurable d'un véhicule électrique basée sur l'identification en ligne des sources embarquées » Thèse de Doctorat universite Bourgogne franch_comte (5 october 2019) .

- [11] Simon Patrice . « LE STOCKAGE ÉLECTROCHIMIQUE DE L'ÉNERGIE : PRINCIPES, APPLICATIONS ET FUTURS DÉFIS » Thèse de Doctorat, France (07 AVRIL 2015) .
- [12] site Web, https://fr.wikipedia.org/wiki/Accumulateur_électrique.
- [13] Dominique LARCHE , site Web, <https://www.universalis.fr/encyclopedie/stockage-de-l-energie-electrique/>.
- [14] L. Claude, « Analyse expérimentale et modélisation d ' éléments de batterie et de leurs assemblages : application aux véhicules électriques et hybrides » Thèse de Doctorat, 2015.
- [15] A. Barré, B. Deguilhem, S. Grolleau, M. Gérard, F. Suard, and D. Riu, « A review on lithium-ion battery ageing mechanisms and estimations for automotive applications » Article, J. Power Sources, vol. 241, pp. 680–689, 2013.
- [16] Blaise kamenan « Étude d'un système hybride de production d'énergie » Thèse de Doctorat, Afrique SCIENCE Abidjan 22, Côte d'Ivoire (2020) .
- [17] Paire Damian « Dimensionnement et gestion d'énergie de systèmes d'entraînements électriques hybrides : application à un ascenseur avec récupération d'énergie » Thèse de Doctorat, L'Université de Technologie de Belfort-Montbéliard (06 décembre 2010) .
- [18] Stoyanov Ludmil « Etude de différentes structures de systèmes hybrides à sources d'énergie renouvelables » Thèse de Doctorat, UNIVERSITE DE CORSE PASQUALE PAOLI (2011) .
- [19] Brahim Abdallah BRAHIM (2013) « Etude des différentes configuration de systèmes d'energie hybride pv / diesel et de leur impact sur le cout de production d'électricité » Thèse de Doctorat, CENTRE COMMUN DE RECHERCHE Energie et Habitat Durable
- [20] O. Erdinc and M. Uzunoglu « Recent trends in PEM fuel cell-powered hybrid systems: Investigation of application areas, design architectures and energy management approaches» Article, Renew. Sustain. Energy 2010.
- [21] Théophile HORDÉ « Étude de systèmes pile à combustible hybridés embarqués pour l'aéronautique » Thèse de Doctorat, l'École nationale supérieure des mines de Paris 30/11/2015
- [22] KEBAILI Salima « Modélisation d'un système énergétique hybride (Photovoltaïque + Batterie) » Thèse de Doctorat, UNIVERSITE LARBI BEN M'HIDI OUM-EL-BOUAGHI (2009/2010).

- [23] site Web, https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89nergie_solaire_photovolta%C3%AFque
- [24] BELHOUR Souad. « Elaboration d'une stratégie optimale pour l'exploitation combinée des énergies renouvelables » Thèse de Doctorat, Université des Frères Mentouri-Constantine 2016.
- [25] ABOUDA Salim. « Contribution a la commande des systèmes photovoltaïques: application aux systèmes de pompage » Thèse de Doctorat, Université de Reims Champagne-Ardenne et de l'Université de Sfax. 2015
- [26] site Web, www.energies-renouvelables.org
- [27] BOUKHEZZAR Boubekour. « Sur les stratégies de commande pour l'optimisation et la régulation de puissance des éoliennes a vitesse variable » Thèse de Doctorat, Automatique / Robotique. Université Paris Sud - Paris XI, 2006.
- [28] Duc Hoan Tran. « Conception Optimale Intégrée d'une chaîne éolienne passive: analyse de robustesse, validation expérimentale » Thèse de Doctorat, Energie électrique. Institut National Polytechnique de Toulouse - INPT, 2010.
- [29] L. Stoyanov, « Etude de différentes structures de systèmes hybrides à sources d'énergie renouvelables » Thèse de Doctorat, université technique de Sofia, 28 octobre 2011.
- [30] I. Vechiu « modélisation et analyse de l'intégration des énergies renouvelables dans un réseau autonome » Thèse Doctorat, Université du Havre, 2005.
- [31] L. Croci « Gestion de l'énergie dans un système multi-sources photovoltaïque et éolien avec stockage hybride batteries/super condensateurs » Thèse Doctorat, Université de Poitiers, 2013.
- [32] T.Azib « Contribution à l'étude d'électro-générateurs à pile à combustible conceptions d'architectures et de leurs commandes ». Thèse de doctorat, université de Paris XI, 2010
- [33] MEBARKI Azzeddine «Gestion d'énergie d'une station multi sources dédiée au chargement des véhicules hybrides» Thèse de Doctorat, Université A/Mira – Bejaia Faculté de Technologie Département de Génie Electrique ,2017-2018 .
- [34] M.Becherif (2006) « PASSIVITY-BASED CONTROL OF HYBRID SOURCES» Article, UTBM, Belfort FRANCE
- [35] Messaoud MOHAMMEDI « Gestion de l'énergie pour une chaîne multi-sources » Thèse de Doctorat, Université Mohamed Khider – Biskra '10 Juillet 2016'

- [36] BELLAKHDAR M. Cherif « Etude de l'association pile PEMFC / supercondensateur » Article, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran , 24/06 /2013
- [37] Labdani Meryem «Commande par mode glissant des convertisseurs de puissance » Mémoire de Master, Université Larbi Ben M'Hidi - Oum El Bouaghi 04 Juin 2016 .
- [38] Béatrice Laroche « EXTENSION DE LA NOTION DE PLATITUDE A DES SYSTEMES DECRITS PAR DES EQUATIONS AUX DERIVEES PARTIELLES LINEAIRES » Thèse de Doctorat, L'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris ,18 Décembre 2000.
- [39] Ilyes TEGANI « Optimisation et contrôle d'un micro smart grid utilisant une pile à combustible, des supercondensateurs, des batteries, une éolienne et une source photovoltaïque » Thèse de Doctorat, Université Mohamed Khider – Biskra 04/06/2016
- [40] M. Zandi, R. G. Ghoachani, M. Phattanasak, J.-P. Martin, B. Nahidmobarakeh, S. Pierfederici, B. Davat, and A. Payman, « Flatness based control of a non-ideal DC/DC boost converter » Article, in IECON 2011-37th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society, 2011, pp. 1360-1365.
- [41] A. Payman, S. Pierfederici, and F. Meibody-Tabar « Energy control of supercapacitor/fuel cell hybrid power source » Article, Energy Conversion and Management, vol. 49, pp. 1637-1644, 2008