

République Algérienne Démocratique et Populaire Ministère de l'Enseignement
Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université A.MIRA-BEJAIA



Faculté de Technologie
Département de Génie Electrique

Projet de Fin d'étude

Pour l'obtention du diplôme de Master En Electrotechnique

Thème

Gestion Robuste d'un système Hybride multi source pour une application électrique

Préparé par :

- AMGHAR LOUNIS
- MAZOUZI MOUSS

Encadré par: Mr Mebarki Nasser Eddine

Soutenu publiquement, le 24/06/2023, devant le jury composé de :

- Mm Mokrani Zahra Présidente
- Mr Taib Nabil Examineur

Année Universitaire : 2022/2023



Remerciements



Remerciements

Remerciements

Nos remerciements vont tout premièrement, à Dieu le tout puissant de nous avoir donné le courage pour réaliser ce travail.

Nous tenons tout d'abord à exprimer toute notre profonde gratitude à notre encadreur M^r. Mebarki Nasser Eddine, pour la confiance qu'il nous a prodigué pour la direction et tout l'aide qu'il nous a apporté durant toute la durée de ce travail. Aussi que les membres jury trouvent ici.

Nos vif remerciement vont aussi à nos parent qui nous ont donné la lumière et guidés et à tous les enseignants du département de génie électrique.

Nous adressons aussi nos remerciements à tous nos amis et collègues.

Enfin, nous tenons à remercier nos familles pour leurs encouragements et leur soutien inconditionnel et à toute personne ayant contribué pour la réalisation de ce projet.



Table Des Matières



Table des matières

Table des matières	
Introduction générale	1
Chapitre I : Généralités sur les systèmes hybrides	
I.1 Introduction	2
I.2 Définition des systèmes hybrides	2
I.3 Importance de l'utilisation des systèmes hybrides	3
I.4 Les différentes configurations des systèmes hybrides	3
I.4.1 Architecture bus courant continu CC	4
I.4.2 Architecture bus courant alternatif CA	4
I.4.3 Architecture mixte à bus CC/CA	5
I.5 Les différentes combinaisons des systèmes hybrides	6
I.5.1 Système hybride photovoltaïque –éolien	6
I.5.2 Système hybride photovoltaïque-batterie et pile à combustible	6
I.5.3 Système hybride photovoltaïque–éolien-diesel	7
I.6 Avantages et inconvénients d'un système hybride	7
I.6.1 Avantages	7
I.6.2 Inconvénients	7
I.7 Les batteries	8
I.8 Régulateur	8
I.9 Onduleur	8
I.10 Conclusion	8
Chapitre II : Modélisation des composants du système	
II.1 Introduction	9
II.2 Modélisation de la machine synchrone à aimant permanent commandé par un onduleur MLI	10
II.2.1 Modélisation de la machine synchrone à aimant permanent	10
II.2.1.1 Modélisation de la transformée de Park et Concordia	12
II.2.1.2 Transformée de Concordia	13
II.2.1.3 Transformée de Park	14

Table des matières

II.2.2 Modélisation de l'onduleur de tension :	16
II.2.3 Résultats de la simulation du MSAP	17
II.3 Modélisation de la pile à combustible	19
II.3.1 Polarisation d'activation	19
II.3.2 Polarisation ohmique	20
II.3.3 Polarisation de concentration	21
II.3.4 Les résultats de la simulation du modèle de la PEMFC	22
II.4 Modélisation de la batterie	24
II.4.1 Modélisation de la capacité	24
II.4.2 Equations de la tension de décharge	25
II.4.3 Equations de la tension de charge	25
II.5 Dimensionnement des éléments du système	26
II.5.1 Dimensionnement du stack pile à combustible	26
II.5.2 Dimensionnement du Batterie	27
II.6 Les convertisseurs DC/DC	28
II.6.1 Hacheur survolteur	28
II.6.2 Hacheur parallèle réversible en courant	29
II.7 Conclusion	30
 Chapitre III : Les Gestion Des Systèmes Hybride	
III.1 Introduction	31
III.2 stratégies de gestion	31
III.2.1 Stratégie à base des règles	31
III.2.1.1 Les règles floues	31
III.2.1.2 Les règles déterministes	33
III.2.1.2.1 La stratégie « TOUT ou RIEN »	33
III.2.1.2.2 La stratégie « Saturation de puissance »	33
III.2.1.2.3 La stratégie « Saturation de puissance adaptative »	34
III.2.1.2.4 La stratégie « Partage fréquentiel »	34
III.2.1.3 Les règles à base des réseaux neurones	35
III.2.2 Stratégie à base de méthodes d'optimisation déterministe	35

Table des matières

III.2.2.1	Stratégie d'optimisation hors ligne	35
III.2.2.2	Stratégie d'optimisation en ligne	35
III.2.2.3	Commande prédictive	36
III.2.2.4	Commande optimale	36
III.2.3	Stratégie à base de méthodes d'optimisation stochastique	36
III.3	Organigramme de gestion de puissance du véhicule électrique	37
III.4	Conclusion	39
Chapitre IV : Résultats et Simulation		
IV .1	Introduction	40
IV .2	Simulation générale de véhicule	40
IV .3	Résultats de simulation	40
IV .3 .1	Mode traction	41
IV .3 .2	Mode freinage	44
IV. 4	La combinaison des résultats	45
IV. 5	Etat de charge de la batterie	45
IV. 6	conclusions	46
	Conclusion général	47



Tables des figures



Tables des figures

Chapitre I : Généralités sur les systèmes hybrides

Figure I.1: Système hybride à énergies renouvelables [6].	2
Figure I.3: schéma d'une architecture CA [9].	5
Figure I.4: Schéma d'une architecture a bus mixte CC /CA	5
Figure I. 5: schéma d'un système hybride PV-éolienne.	6
Figure I.6: schéma d'un système hybride PV-Batterie-PAC.	6
Figure I.7 : Schéma d'un système hybride éolien – PV – DIEZEL [12].	7

Chapitre II : Modélisation des composants du système

Figure II.1: Le schéma physique du véhicule électrique hybride étudié .	2
Figure II.2: schéma du moteur synchrone à aimant permanent.	3
Figure II.3: Rotors des machines synchrones à aimant permanents.	4
Figure II.4: Représentation de MSAP dans le repère électrique (a, b, c).	4
Figure II.5: Représentation des différents repères.	6
Figure II.6: Schéma bloc d'une machine synchrone à aimant permanent commandé par un onduleur MLI.	10
Figure II.7: la courbe de variation de couple électromagnétique.	10
Figure II.8: courbe de variation de la vitesse de la MSAP.	11
Figure II.9: courbe de variation des courants statorique de la MSAP.	11
Figure II.10: schéma équivalent d'une PEMFC.	12
Figure II.11: Modèle de la PEMFC réalisé sous MATLAB Simulink.	15
Figure II.12: Evolution de la tension de la pile en fonction de la densité du courant.	16
Figure II.13: Evolution de la puissance de la pile en fonction de la densité courant.	16
Figure II.14: Schéma équivalent du Batterie.	17
Figure II.15: Schéma de principe d'un hacheur survolteur(Boost).	21
Figure II.16: Hacheur parallèle réversible en courant	22

Chapitre III: Gestion de puissance des systèmes hybride

Figure III.1: Fonctions et degrés d'appartenance de la logique floue.	31
Figure III.2: Principe de la stratégie de gestion «Tout ou Rien».	32
Figure III.3: Principe de la stratégie de gestion «saturation de puissance».	33
Figure III.4: Principe de la stratégie de gestion «partage fréquentiel ».	33
Figure III.5 : Organigramme de gestion de puissance	38
Figure III.6: Le fonctionnement des différents modes de la gestion de puissance.	39

Chapitre IV: Résultats et Simulation

Figure IV.1: Schéma globale de véhicule.	40
Figure IV.2: Vitesse de référence en Km/h.	41
Figure IV.3: Vitesse de moteur en Km/h.	41
Figure IV.4: Puissance demandée en w.	42
Figure IV.5: variation de la puissance délivrée par la pile à combustible.	43
Figure IV.6: variation de la puissance de la batterie en mode traction.	43
Figure IV.7: profile de variation de puissance durant le mode de traction.	44
Figure IV.8: profile de puissance de la batterie en mode freinage.	45
Figure IV.9: Profile de toutes les puissances.	45
Figure IV.10: Etat de charge de la batterie.	46

Nomenclature

VE : Véhicule Electrique

PAC : pile à combustible.

PEMFC : Les piles à membranes polymère échangeuse de protons.

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

$P_{H_2}^*$: Pressions partielles à l'interface de l'hydrogène (atm).

$P_{O_2}^*$: Pressions partielles à l'interface de l'oxygène (atm).

V_{ohm} : La surtension ohmique

V_{conc} : La surtension de concentration

V_{act} : La surtension d'activation

PEM : Proton Exchange membrane

V_{cel} : La tension d'une cellule à P à C

E : Tension à vide de la pile à combustible

ΔV_{act} : chute de tension due aux pertes d'activation [V].

ΔV_{con} : Chute de tension due aux pertes de concentration [V].

ΔV_{ohm} : Chute de tension due aux pertes ohmiques [V].

V_{batt} : La tension nominale du pack de batterie

E_{batt} : énergie journalière à stocker dans le pack [Wh/j].

I_{batt} : Courant de la batterie

f.e.m : force électromotrice

C_{batt} : La capacité nominale des batteries

PAC : pile à combustible.

SOC : State of charge (en français EDC : Etat de charge).



Introduction générale



Introduction générale

Introduction générale

Les véhicules conventionnels sont propulsés par des moteurs thermiques à combustion interne. Par la combustion du pétrole (essence ou diesel) ces moteurs produisent une grande énergie mécanique mais aussi dégagent une grande quantité de dioxyde de carbone, ce qui engendre la pollution de l'environnement qui touche la santé humaine. Par la révolution de l'industrie l'être humain a découvert les véhicules hybrides et les véhicules électriques.

Les véhicules électriques et les véhicules hybrides ont des émissions de CO₂ faibles ce qui est bon pour l'environnement et l'humanité.

Ces véhicules nécessitent un système de stockage d'énergie, la plupart des véhicules existants dans le marché utilisent principalement les batteries mais il existe d'autres moyens de stockage (les super condensateurs), cependant aucun de ces systèmes de stockage n'est excellent seul. Pour répondre à ce problème il faut combiner deux à trois systèmes de stockage d'une manière pour avoir les caractéristiques souhaitées, on appelle cette option le stockage hybride.

Notre travail consiste à étudier un véhicule électrique avec un système de stockage hybride (pile à combustible/batteries).

Les travaux présentés dans ce manuscrit sont autour de quatre chapitres.

On introduit notre travail par un chapitre qui définit l'importance de l'hybridation, ainsi que les différentes généralités sur le système hybride.

Dans le deuxième chapitre on va élaborer une modélisation des différents organes de traction de système servant à valider le modèle de véhicule qui comprend deux sources d'énergie de nature différentes (la pile à combustible et les batteries), la machine synchrone et les éléments d'électronique de puissance accompagnés par une simulation sous MATLAB-Simulink.

Dans le troisième chapitre on va exposer les différentes gestions d'énergie des systèmes hybrides, et de proposer une gestion de puissance pour notre système.

On va consacrer le dernier chapitre pour exposer les résultats de simulation du système global obtenus en utilisant l'environnement MATLAB_ Simulink.

On finira notre travail par une conclusion générale.



Chapitre I

Généralités sur les systèmes hybrides



I.1 Introduction

La production d'électricité à partir des sources d'énergies renouvelables décentralisées présente de nombreux avantages, notamment une meilleure fiabilité de l'approvisionnement pour les consommateurs et un moindre impact environnemental. Cependant, la variabilité de ces sources d'énergie nécessite l'établissement des règles pour optimiser le dimensionnement et l'utilisation de ces systèmes. Après avoir fait un bref état des lieux des ressources énergétiques disponibles, pour cela on va voir dans ce chapitre les différentes généralités sur les systèmes hybrides.

I.2 Définition des systèmes hybrides

Les systèmes hybrides de l'énergie dans sa vue la plus générale est celui qui combine et exploite plusieurs sources disponible et facilement mobilisable, il utilise deux ou plusieurs technologies de la génération de l'énergie complémentaire d'une manière à accroître la fourniture d'énergie par une meilleure disponibilité. Le système hybride d'énergie (SHE) associe deux ou plusieurs sources d'énergie renouvelables (PV-éolien), ou au moins une source d'énergie renouvelable et une ou plusieurs sources classiques (éolien-groupe Diesel) [1] [2].



Figure I.1: Système hybride à énergies renouvelables [6].

I.3 Importance de l'utilisation des systèmes hybrides

Le croisement de plusieurs sources d'énergies renouvelables, toléré d'optimiser les systèmes de productions d'électricité dans le point de vue technique aussi dans la vue économique, même si la complexité des générateur hybrides par rapport aux solutions mono source. Elle présente un intérêt très évident considérable par leur flexibilité incomparable, leur souplesse de fonctionnement et leur prix de revient attractif [1] [8].

Ces systèmes permet de :

Palier dans une durée limitée une indisponibilité partielle ou totale de la source d'énergie [1] [4].

En outre, ces solutions imposent un dimensionnement laborieux préalable basé sur des connaissances approfondies du gisement en énergie renouvelable [1] [4].

I.4 Les différentes configurations des systèmes hybrides

Il existe diverses sources d'énergie renouvelable disponibles sur notre planète, comme l'énergie solaire, éolienne, hydraulique, biomasse et géothermique, qui peuvent être converties en électricité ou en chaleur en fonction de nos besoins. Certaines sources d'énergie renouvelable comme la géothermie, la biomasse et l'énergie solaire, permettent également la cogénération d'électricité et de chaleur. Depuis les années 1990, l'utilisation d'énergies renouvelables a connu une croissance significative, avec des taux de croissance annuels d'environ 34% pour l'éolien et d'environ 30% pour le solaire dans l'Union Européenne [3] [5].

En raison de l'épuisement des énergies fossiles, les perspectives économiques des énergies renouvelables sont prometteuses. La mise en place de politiques de développement durable a encouragé l'essor des énergies renouvelables et favorisé une transition énergétique vers des sources plus durables et respectueuses de l'environnement [3] [5].

En outre, l'utilisation d'énergies renouvelables nécessite des équipements d'électronique de puissance et des systèmes de stockage. Il existe trois types d'architectures pour les systèmes de stockage d'énergie renouvelable hybride : l'architecture à bus CC, l'architecture à bus CA et l'architecture mixte à bus CC-CA [3].

I.4.1 Architecture bus courant continu CC

Le système hybride illustré dans le schéma centralise la puissance fournie par chaque source sur un bus continu. Les dispositifs de conversion d'énergie à courant alternatif (CA) fournissent leur puissance à un redresseur pour la convertir en courant continu (CC). Les générateurs sont connectés en série avec l'onduleur afin d'alimenter les charges alternatives. L'onduleur est responsable d'alimenter les charges alternatives à partir du bus continu [2] [4].

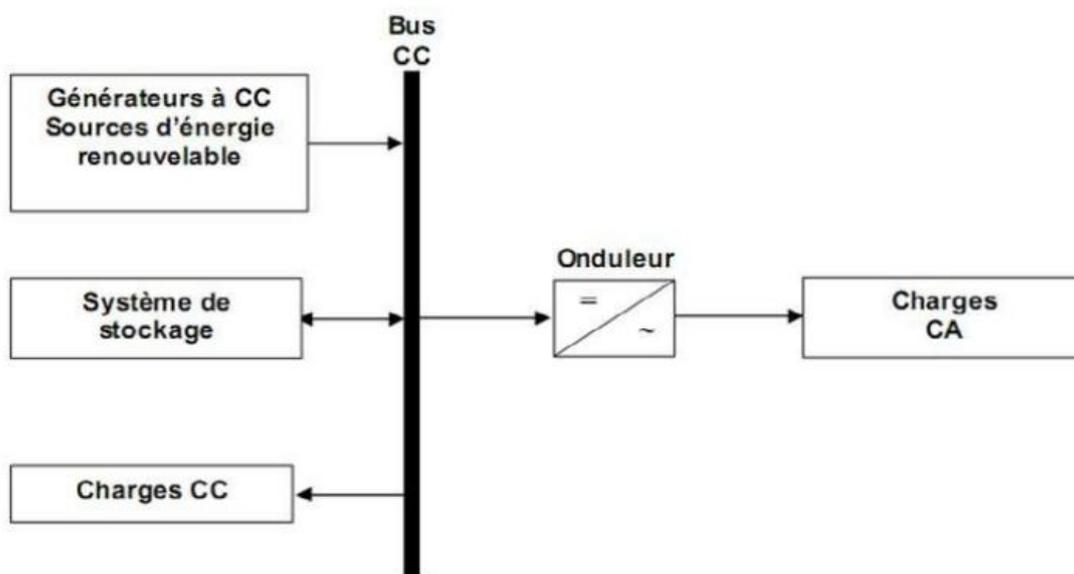


Figure I.2: Schéma d'une architecture à bus cc [9].

I.4.2 Architecture bus courant alternatif CA

La figure (1.2) montre une topologie où tous les composants du système hybride sont connectés à la charge alternative. Cette configuration offre des performances supérieures à la configuration précédente car chaque convertisseur peut être synchronisé avec son générateur pour alimenter la charge indépendamment et simultanément avec les autres convertisseurs. Cette flexibilité permet aux sources d'énergie de répondre à la demande de la charge. La mise en œuvre de ce système est relativement complexe en raison de son fonctionnement en parallèle, qui nécessite une synchronisation des tensions de sortie avec les tensions de charge [2] [4].

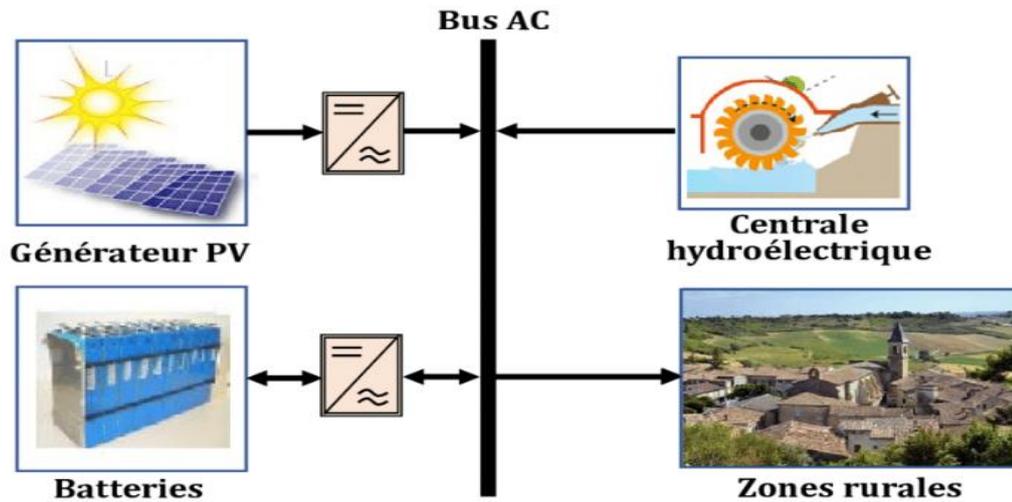


Figure I.2: schéma d'une architecture CA [9].

I.4.3 Architecture mixte à bus CC/CA

Le système hybride illustré dans le diagramme centralise la puissance provenant de chaque source sur un bus continu. Les systèmes de conversion d'énergie à courant alternatif (CA) transmettent leur puissance à un redresseur pour la convertir en courant continu (CC). Les générateurs sont connectés en série avec l'onduleur pour fournir de l'énergie aux charges alternatives. L'onduleur a pour fonction d'alimenter les charges alternatives en utilisant le bus continu comme source d'énergie [3].

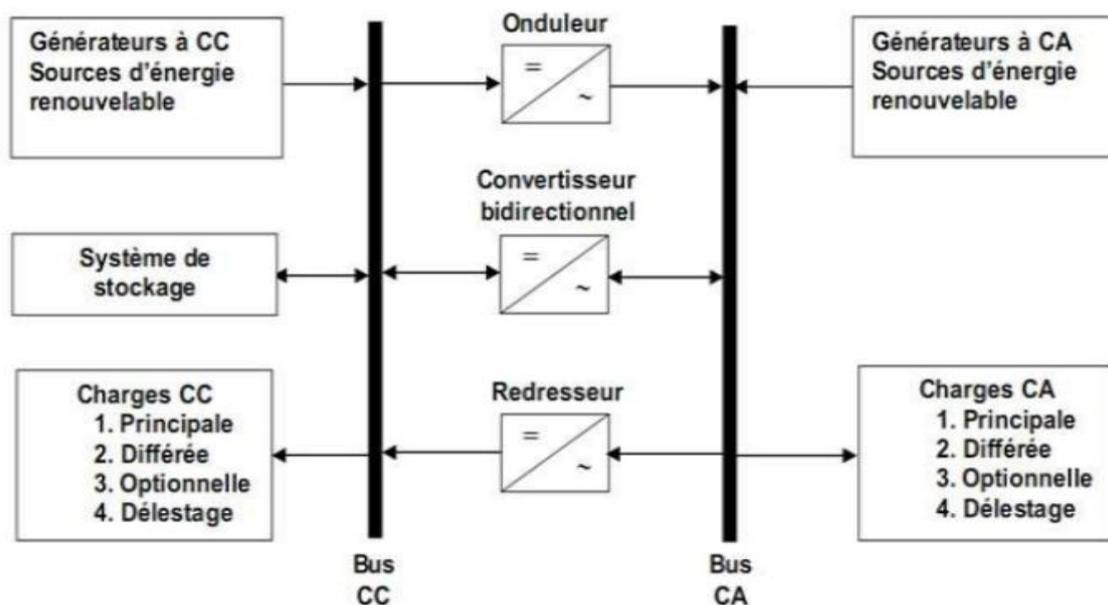


Figure I.3: Schema d'une architecture a bus mite CC /CA d'un système hybride [10].

I.5 Les différentes combinaisons des systèmes hybrides

Il existe plusieurs combinaisons des systèmes hybrides, parmi lesquelles on présente :

I.5.1 Système hybride photovoltaïque –éolien

L'optimisation de la production d'énergie éolienne et solaire avec stockage électrochimique est étroitement liée aux modèles économiques spécifiques de chaque système individuel. Ce système combine deux sources d'énergie complémentaires – le photovoltaïque et l'éolien – avec une batterie de stockage [3].

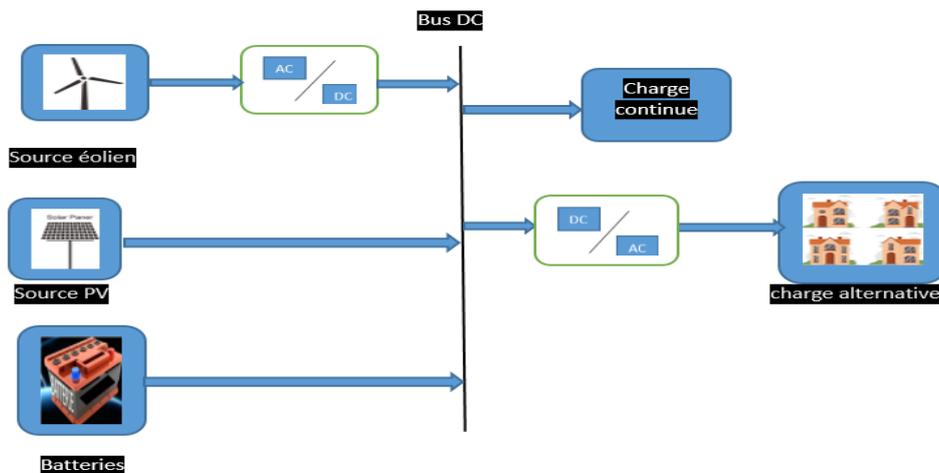


Figure I. 4: schéma d'un système hybride PV-éolienne.

I.5.2 Système hybride photovoltaïque-batterie et pile à combustible

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

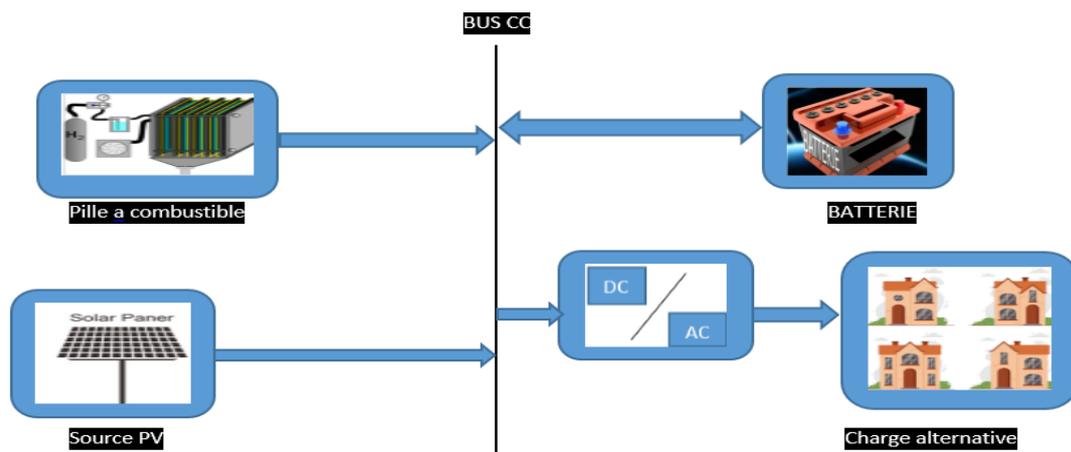


Figure I.5: schéma d'un système hybride PV-Batterie-PAC.

I.5.3 Système hybride photovoltaïque –éolien-diesel

Le système hybride combine l'énergie produite par des panneaux solaires et/ou des éoliennes avec celle provenant d'autres sources. En général, il est composé d'une éolienne et d'un groupe électrogène de secours fonctionnant au diesel, au propane ou à l'essence. Ce type de système peut être adapté pour alimenter une résidence ou un immeuble commercial qui n'est pas raccordé au réseau électrique central. La plupart des systèmes hybrides incluent une batterie de stockage d'énergie, comme indiqué sur la figure suivante.

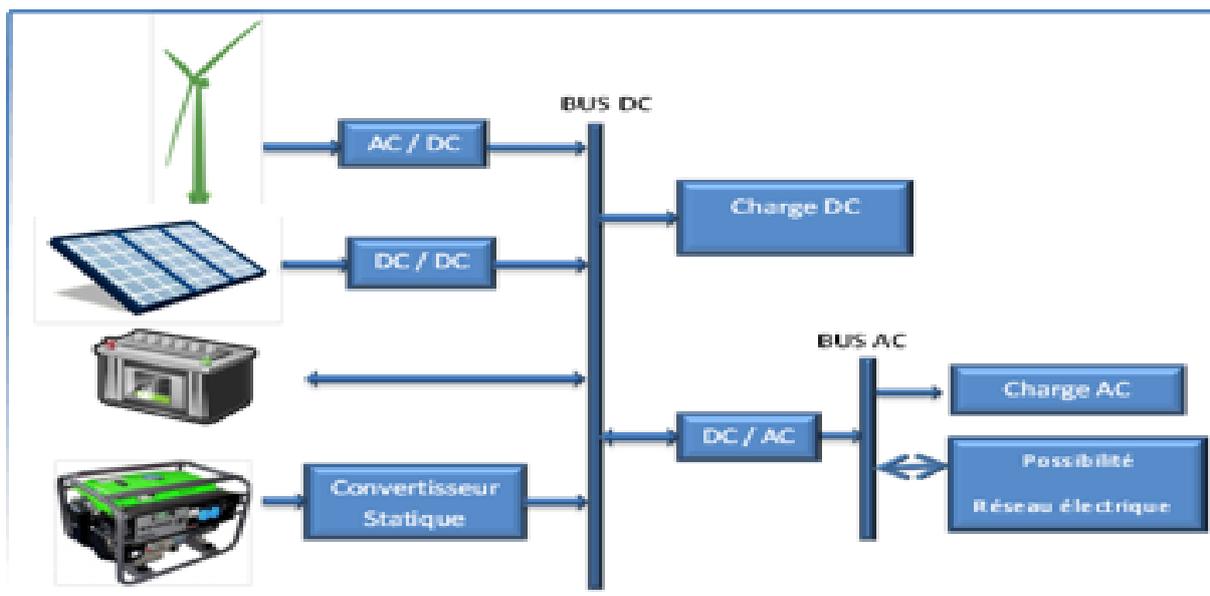


Figure I.6 : Schéma d'un système hybride éolien – PV – DIEZEL [12].

I.6 Avantages et inconvénients d'un système hybride

I.6.1 Avantages

- Ne repose pas sur une seule source d'énergie.
- Capable de répondre à la charge évolutive, Opération simple, réduisant l'entretien et la révision.
- Faibles coûts associés au cycle de vie de l'application [4].

I.6.2 Inconvénients

- La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert un coût élevé.
- Le rendement réel de conversion d'un module est faible [3].

I.7 Les batteries

Le stockage d'énergie est un facteur clé dans un système d'énergie hybride en site isolé étant donné le caractère aléatoire et variable dans le temps des énergies renouvelables [11].

I.8 Régulateur

Le rôle du régulateur est d'assurer et réguler la charge des batteries. Il optimise la puissance des panneaux et des éoliennes et empêche les décharges/surcharges profonde [11].

I.9 Onduleur

L'onduleur convertit le courant direct à faible tension produit par les panneaux Photovoltaïque ou les batteries en courant alternatif standard utilisable [11].

I.10 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une définition générale des systèmes hybrides, expliqué leur importance et décrit leurs différentes configurations. Nous avons également examiné quelques combinaisons des systèmes hybrides ainsi que leurs avantages et inconvénients.



Chapitre II

**Modélisation des composants du
système**



II.1 Introduction

Le secteur des transports routiers est un des plus consommateur d'énergie et pollueur en termes d'émissions de gaz à effets de serre. Cette prise de conscience collective a entraîné des réglementations toujours plus strictes sur les émissions polluantes et la consommation des véhicules, qui sont ainsi devenues deux critères primordiaux pour la conception de nouveaux véhicules dit les véhicules tout électriques. Ces derniers ont été présentés comme une solution prometteuse, grâce à leur indépendance vis-à-vis du pétrole. Mais leur faible autonomie ne leur permet pas aujourd'hui de remplacer définitivement les véhicules conventionnels ; d'où le développement d'un autre concept : les véhicules électriques hybrides.

A travers ce chapitre, nous présenterons la modélisation des éléments formant la chaîne de traction, à savoir : la source qui comprend la pile à combustible, et l'élément de stockage (batteries), les convertisseurs statiques adéquats, ainsi que l'ensemble convertisseur-machine constitué d'un onduleur triphasé et d'une machine synchrone à aimant permanent.

La modélisation et la simulation ont été effectuées sous le logiciel MATLAB/Simulink.

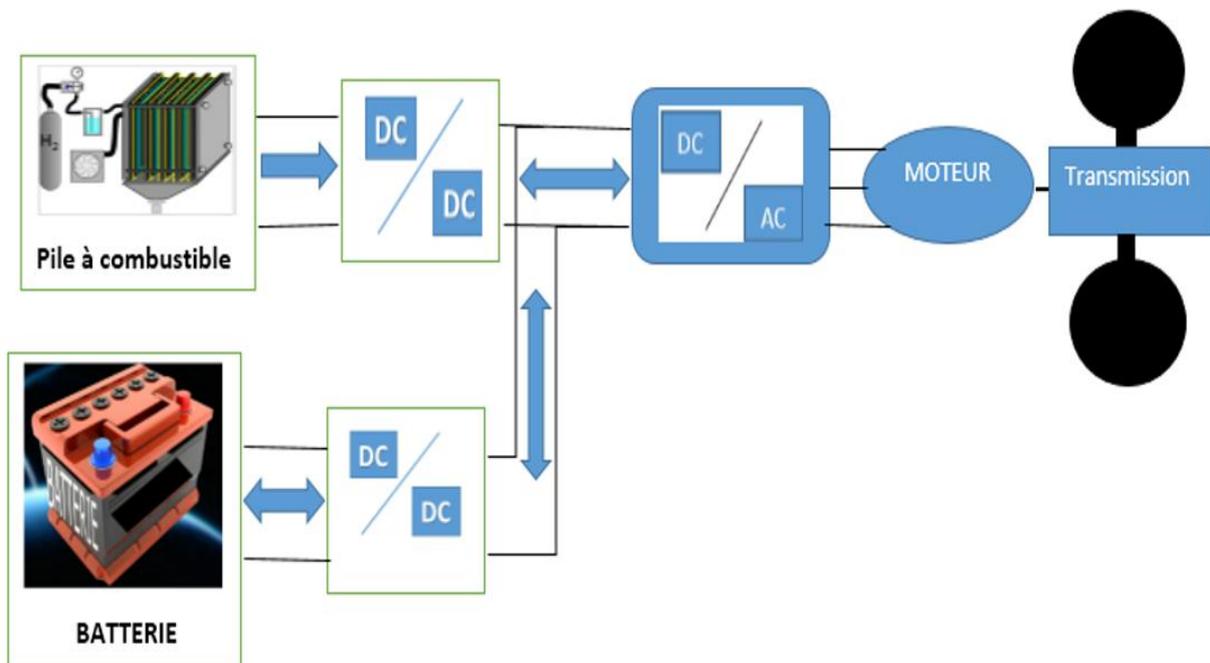


Figure II.7: Le schéma physique du véhicule électrique hybride étudié.

II.2 Modélisation de la machine synchrone à aimant permanent commandé par un onduleur MLI

Pour pouvoir étudier notre travail on doit faire la modélisation et la simulation des composantes du système.

II.2.1 Modélisation de la machine synchrone à aimant permanent

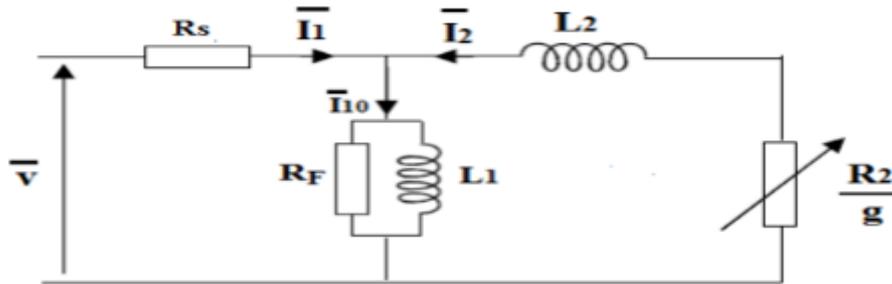


Figure II.8: schéma du moteur synchrone à aimant permanent [14].

La machine synchrone à aimant permanent (MSAP) est une machine tournante qui contient des aimants permanents au rotor qui assurent son excitation, en fonction de la manière dont ils sont placés on peut distinguer deux types de rotors.

Dans le premier type les aimants sont placés sur la surface du rotor offrant un entrefer homogène, dans ce cas le moteur est appelé à rotor lisse, ou les inductances ne dépendent pas de la position de rotor (figure II.3-a). Dans le deuxième type ils sont montés à l'intérieur de la masse rotorique, ce type de moteur est appelé moteur à rotor saillant. Dans ce cas l'entrefer sera variable à cause de l'effet du saillant et l'inductance dépend de la position du rotor (figure II.3-b).

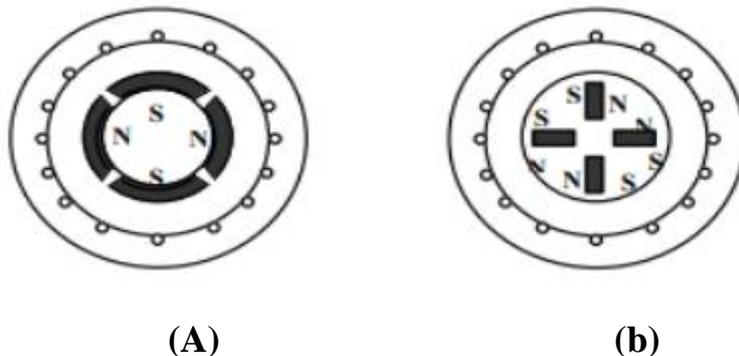


Figure II.9: Rotors des machines synchrones à aimant permanents [14].

La machine contient aussi un stator, où ce dernier comporte des enroulements triphasés décalés de 120° entre eux dans l'espace représentés par les trois axes (a, b, c) dans la figure II.4.

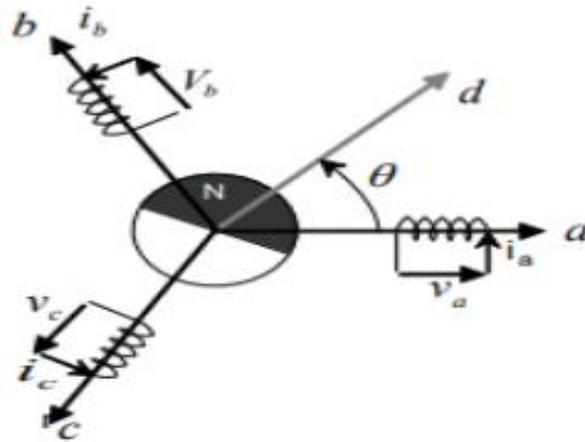


Figure II.10: Représentation de MSAP dans le repère électrique (a, b, c) [14].

➤ Hypothèses simplificatrices

Les phénomènes physiques inclus dans le fonctionnement d'un système peuvent être partiellement ou totalement pris en compte dans un modèle, pour ce l'a plus que y a un grand nombre d'hypothèses plus que le système sera bien étudié, dans ce but nous adoptons les suppositions suivantes :

La saturation est négligée, il en résulte que les inductances propres et mutuelles sont indépendantes des courants qui circulent dans les différents enroulements, ce qui permet d'avoir des relations linéaires entre les flux et les courants.

Les **f. m. m** sont réparties sinusoidalement dans l'entrefer de la machine, il y a une symétrie par rapport à l'axe magnétique des enroulements.

On ne tient pas compte de l'hystérésis et les pertes par courant de Foucault dans les parties magnétiques.

Les variations de résistances en fonction de la température est négligeable.

$$[V_{abc}] = [R_s][i_{abc}] + \frac{d}{dt} [\Phi_{abc}] \quad (\text{II.1})$$

Avec :

$$[V_{abc}] = \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix}, [i_{abc}] = \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}, [\Phi_{abc}] = \begin{bmatrix} \Phi_a \\ \Phi_b \\ \Phi_c \end{bmatrix}, [R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix}$$

$V_{abc}, I_{abc}, \Phi_{abc}$ Représentent respectivement les tensions de phases statoriques, les courants de phases statoriques et les flux totaux produits par les courants statoriques. R_s Indique la résistance d'une phase statoriques.

Les flux totaux sont exprimés par:

$$[\Phi_{abc}] = [L_s][i_{abc}] + [\Phi_f] \quad (II.2)$$

$$[L_s] = \begin{bmatrix} L_{ss} & M_s & M_s \\ M_s & L_{ss} & M_s \\ M_s & M_s & L_{ss} \end{bmatrix}; [\Phi_f] = \Phi_f \begin{bmatrix} \cos \theta \\ \cos \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) \\ \cos \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) \end{bmatrix}$$

Avec L_{ss} et M_s représentent l'inductance propre et l'inductance mutuelle entre les enroulements statoriques.

La substitution de l'équation (II.2) dans l'équation (II.1) donne:

$$[V_{abc}] = [R_s][i_{abc}] + \frac{d}{dt} ([L_s][i_{abc}] + [\Phi_f]) \quad (II.3)$$

Le couple électromagnétique est exprimé par :

$$C_{em} = \frac{1}{\omega_m} ([e_{abc}]^T [i_{abc}]) \quad (II.4)$$

Ou : $[e_{abc}] = \frac{d}{dt} [\Phi_{abc}]$ représentent les FMMs produites dans les phases statoriques ω_m définit la vitesse de rotation du rotor en (rd/s).

II.2.1.1 Modélisation de la transformée de Park et Concordia

Pour étudier les machines synchrones à aimant permanent nous pouvant utiliser une représentation dans un repère diphasé, ce modèle permet de voir l'effet des champs tournants, modéliser sous forme vecteurs tournant, sur la création de couple. Ce modèle permet aussi de définir les vecteurs dans un repère quelconque, nous on le décrivant soit dans le repère (d, q) à l'aide de la transformé de PARK, ou dans le repère (α, β) d'après la transformée de Concordia, comme suite :

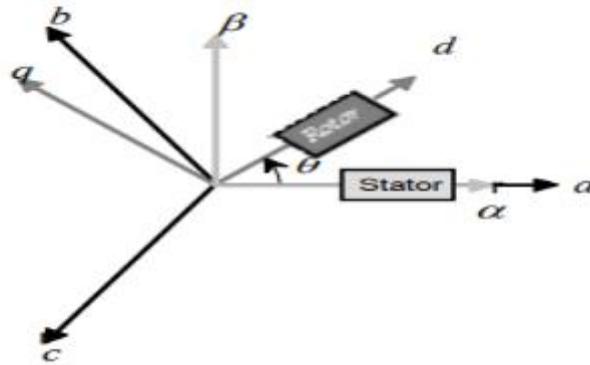


Figure II.11: Représentation des différents repères [14].

II.2.1.2 Transformée de Concordia

Pour faire le passage du système triphasé (a, b, c) aux systèmes fictif (α , β) on utilise la transformée de Concordia. Elle est définie comme suite :

$$[X_{\alpha\beta 0}] = [C][X_{abc}] \quad (\text{II.5})$$

Où X représente les grandeurs électrique (tension, courant, flux).

On donne la matrice de la transformée C :

$$[C] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.6})$$

Avec $[C]^{-1} = [C]^T$

En appliquant la transformée(II.6) au système (II.1), on aura :

Equation de tension :

$$\begin{cases} V_{\alpha} = R_s i_{\alpha} + L_s \frac{di_{\alpha}}{dt} - \omega_m \Phi_f \sin \theta \\ v_{\beta} = R_s i_{\beta} + L_s \frac{di_{\beta}}{dt} - \omega_m \Phi_f \cos \theta \end{cases} \quad (\text{II.7})$$

Equation de flux :

$$\begin{cases} \Phi_{s\alpha} = L_s i_{s\alpha} + \Phi_f \cos \theta \\ \Phi_{s\beta} = R_s i_{s\beta} + L_s \frac{di_{s\beta}}{dt} \end{cases} \quad (\text{II.8})$$

Equation de Couple électromagnétique :

$$C_{em} = \frac{3}{2} P(\Phi_{\alpha} i_{\beta} - \Phi_{\beta} i_{\alpha}) \quad (\text{II.9})$$

II.2.1.3 Transformée de Park

La transformation de Park est une transformation du repère triphasé fixe (abc) au un repère biphasé (dq). Cette transformation permet de réduire la complexité du système. La transformée de Park est définie comme suit :

$$[X_{dq0}] = [P][X_{abc}] \quad (\text{II.10})$$

Où X représente les grandeurs électriques (tension, courant ou flux)

La matrice de transformée P est donnée par :

$$[P] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin \theta & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.11})$$

Dont la matrice inverse à pour forme :

$$[P^{-1}] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.12})$$

Et à l'aide de l'équation (II.10), on peut déduire les équations de Park sous une forme vectorielle comme suit :

$$[V_{dq}] = [R_s][i_{dq}] + \frac{d}{dt}[\Phi_{dq}] + Pw_m[\Phi_{dq}] \quad (\text{II.13})$$

Où :

$$[V_{dq}] = \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix}, [i_{dq}] = \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix}, [\Phi_{dq}] = \begin{bmatrix} \Phi_d \\ \Phi_q \end{bmatrix}, [\Phi_{dq}] = \begin{bmatrix} \Phi_d \\ -\Phi_q \end{bmatrix}, [R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 \\ 0 & R_s \end{bmatrix}$$

Et la transformée (II.11) appliquée à (II.2) donne :

$$\begin{bmatrix} \Phi_d \\ \Phi_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_d & 0 \\ 0 & L_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Phi_f \\ 0 \end{bmatrix} \quad (\text{II.14})$$

Le couple électromagnétique est produit par l'interaction entre les pôles formés par les aimants au rotor et les pôles engendrés par les FMMs dans l'entrefer généré par les courants statoriques, il est exprimé par :

$$C_{em} = \frac{3}{2} P (\Phi_d i_q - \Phi_q i_d) = \frac{3}{2} P [(L_d - L_q) i_d i_q + \Phi_f i_q] \quad (\text{II.15})$$

L'équation électromécanique est exprimée par :

$$J \frac{d\Omega}{dt} + f_\Omega = C_{em} - C_r \quad (\text{II.16})$$

$$\omega_m = p\Omega \quad (\text{II.17})$$

➤ **Model d'état**

La représentation d'un modèle d'état nécessite une représentation de vecteur d'état x , un vecteur d'entrée u et un vecteur de sortie y .

Le vecteur d'entrée est composé de tension statorique, le vecteur d'état est constitué des grandeurs électrique (courant) et grandeur mécanique (vitesse et/ou position).

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x) + g(x) \\ y = h(x) \end{cases}$$

On réalise un modèle d'état dans le repère tournant (d, q).

Dans le cas d'une régulation de couple ou de vitesse angulaire. Le modèle non linéaire d'état dans le repère tournant (d, q) est décrit par le système:

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_d \\ \dot{i}_q \\ \dot{\Omega} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{Ri_d}{L_d} + p \frac{L_q}{L_d} i_q \Omega \\ -\frac{Ri_q}{L_q} - p \frac{L_d}{L_q} i_d \Omega - p \frac{\Phi_f}{L_q} \Omega \\ p \frac{\Phi_f}{J} i_q - p \frac{(L_q - L_d)}{J} i_d i_q - \frac{f}{J} \Omega \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_d} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_q} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{J} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \\ C_r \end{bmatrix} \quad (\text{II.18})$$

Dans le cas de d'une régulation de la position θ du rotor, il faut prendre celle-ci comme nouvelle variable d'état et donc le nouveau modèle d'état s'écrit :

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_d \\ \dot{i}_q \\ \dot{\Omega} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{Ri_d}{L_d} + p \frac{L_q}{L_d} i_q \Omega \\ -\frac{Ri_q}{L_q} - p \frac{L_d}{L_q} i_d \Omega - p \frac{\Phi_f}{L_q} \Omega \\ p \frac{\Phi_f}{J} i_q - p \frac{(L_q - L_d)}{J} i_d i_q - \frac{f}{J} \Omega \\ \Omega \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_d} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_q} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{J} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \\ C_r \end{bmatrix} \quad (\text{II.19})$$

II.2.2 Modélisation de l'onduleur de tension :

Sachant que dans un régime équilibré $v_{an}+v_{bn}+v_{cn}=0$ nous pouvons écrire :

$$\begin{cases} v_{an} = V_{ao} + v_{on} \\ v_{bn} = v_{bo} + v_{on} \\ v_{cn} = v_{co} + v_{on} \end{cases} \tag{II.20}$$

En faisant la somme des équations du système (II.23), on aura :

$$v_{an} + v_{bn} + v_{cn} = v_{co} + v_{bo} + v_{co} + 3v_{on} = 0 \tag{II.21}$$

$$v_{ao} + v_{bo} + v_{co} = -3v_{on} \tag{II.22}$$

$$v_{no} = \frac{1}{3}(v_{ao} + v_{bo} + v_{co}) \tag{II.23}$$

En substituant l'équation (II.26) dans le système (II.23) on aura :

$$\begin{bmatrix} v_{an} \\ v_{bn} \\ v_{cn} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{ao} \\ v_{bo} \\ v_{co} \end{bmatrix} \tag{II.24}$$

Les deux interrupteurs de chaque branche de l'onduleur sont commandés de manière complémentaire en appliquant une modélisation de largeur d'impulsion

$$v_i = v_0 \begin{cases} +\frac{E}{2} & \text{si } k_i : \textit{fermé} \\ -\frac{E}{2} & \text{si } k_i : \textit{ouvert} \end{cases} \quad \text{Avec } i = a, b, c \tag{II.25}$$

Les tensions aux bornes de la machine sont données par :

$$\begin{bmatrix} v_{an} \\ v_{bn} \\ v_{cn} \end{bmatrix} = \frac{E}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \tag{II.26}$$

Avec S_i est l'état de l'interrupteur K_i , supposé parfait tel que pour le $i^{\text{ème}}$ bras de l'onduleur ($i=a, b, c$) :

$S_i=1$ si l'interrupteur en haut est fermé et l'interrupteur en bas est ouvert

$S_i=0$ si l'interrupteur en bas est fermé et l'interrupteur en haut est ouvert

Le schéma bloc de la machine synchrone à aimant permanent commandé par un onduleur à commande vectoriel est représenté dans la figure II.6.

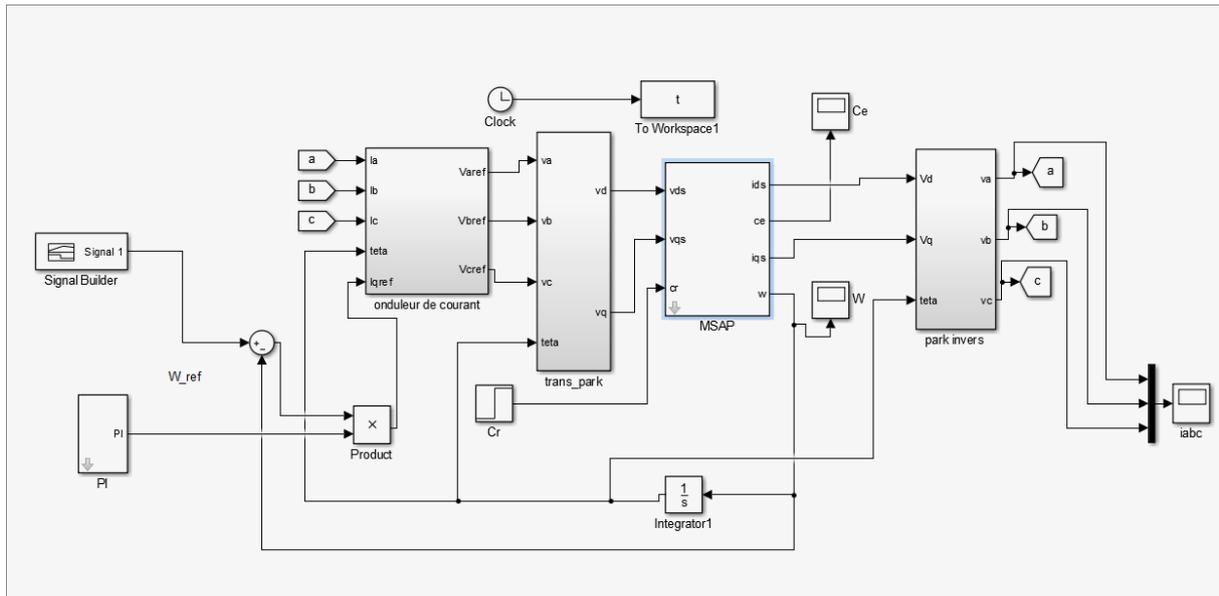


Figure II.12: Schéma bloc d'une machine synchrone à aimant permanent commandé par un onduleur MLI.

II.2.3 Résultats de la simulation du MSAP

Après avoir effectué la modélisation de l'ensemble composé d'une machine synchrone à aimant permanent (MSAP) et d'un onduleur de tension, ainsi que la réalisation d'un schéma bloc du système, nous avons introduit un couple résistant de 290N.m. Les résultats obtenus sont les suivants :

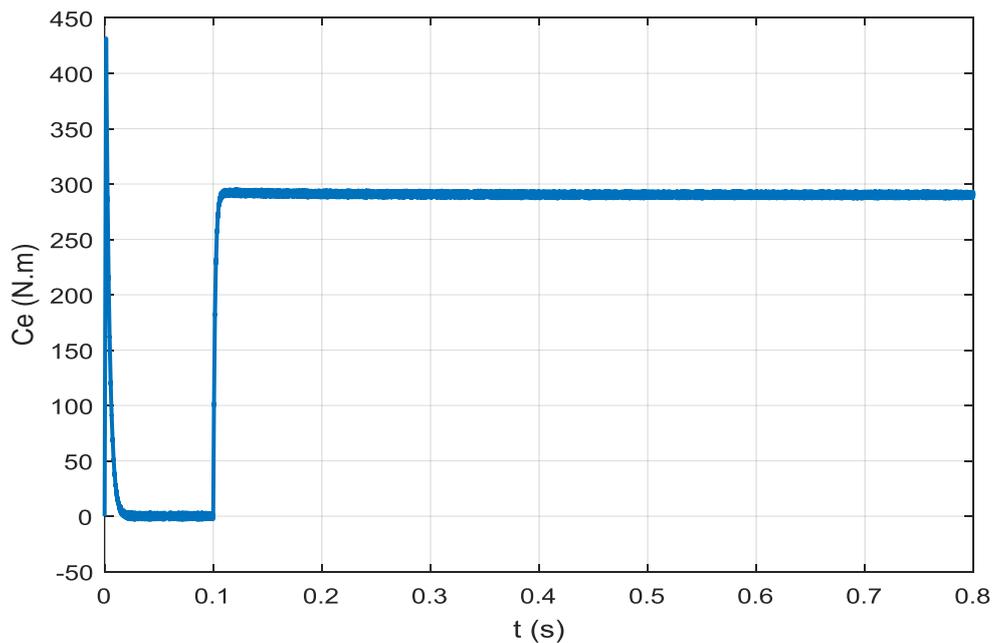


Figure II.13: la courbe de variation de couple électromagnétique.

Au démarrage, le moteur a fourni un couple de 200 N.m (à vide). Après 0.2 seconde, lorsque nous avons appliqué un couple de charge de 290 N.m, le moteur a augmenté son couple pour atteindre 350 N.m. Ensuite, il a diminué pour se stabiliser à 290 N.m.

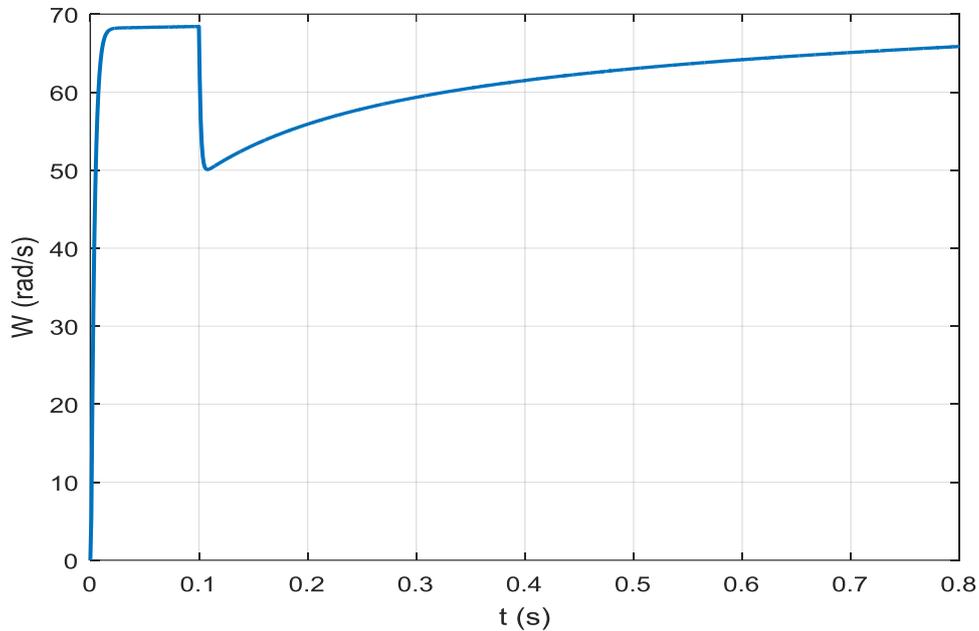


Figure II.14: courbe de variation de la vitesse de la MSAP.

La figure II.8 montre le comportement de la variation de la vitesse de la machine synchrone à aimant permanent à vide et lorsque l'application de couple de charge.

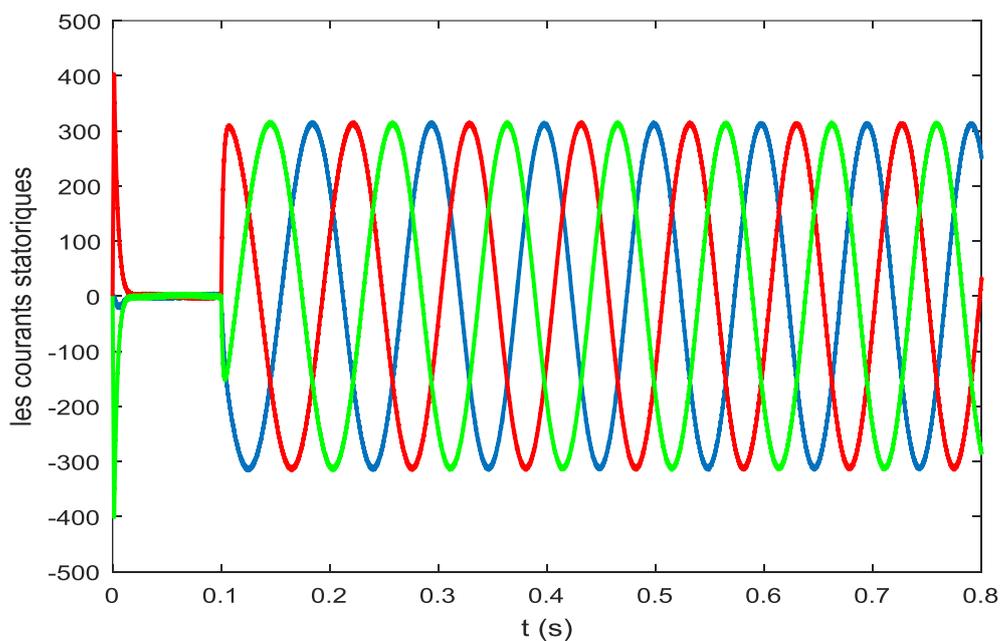


Figure II.15: courbe de variation des courants statoriques de la MSAP.

Cette figure montre les variations du courant avant et après l'application de couple de charge.

II.3 Modélisation de la pile à combustible

La pile à combustible dans les conditions normales de ($T=25^{\circ}\text{C}$ et $P=1\text{atm}$) a une potentielle thermodynamique de 1.23 V, mais en réalité le potentiel de la pile à combustible (EPAC) s'affaiblit par rapport à cette valeur quand le courant débite, cette dérivation à la valeur du potentiel de Nernst et elle dépend des pertes nommées polarisations qui sont : la polarisation d'activation, la polarisation ohmique et la polarisation de concentration. Le schéma équivalent de la pile à combustible considéré est présenté dans la figure II.10.

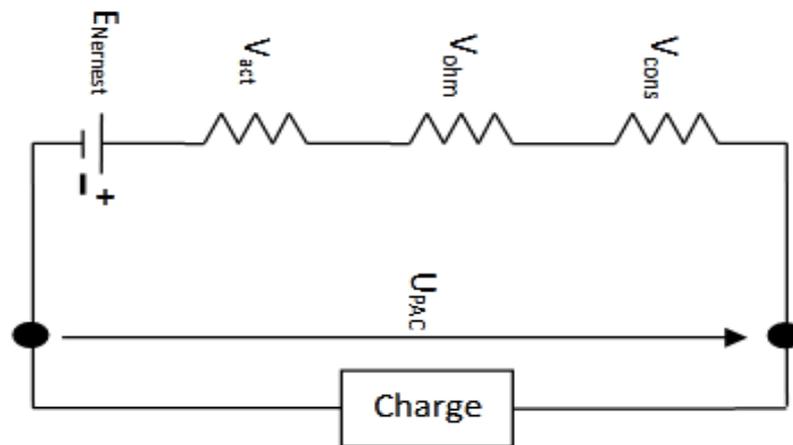


Figure II.16: schéma équivalent d'une PEMFC.

D'ici on peut exprimer la tension d'une cellule PEMFC comme suit (équation II.27) :

$$E_{pac} = E_{Nernst} - V_{act} - V_{ohm} - V_{conc} \quad (II.28)$$

Alors que l'expression de E_{Nernst} est donnée par l'équation suivante (équation II.29) :

$$E_{Nernst} = 1.229 - 0.85 \times 10^{-3} \times (T - 298.15) + 4.3085 \times 10^{-5} + T \left[\ln(P_{H_2}^*) \frac{1}{2} \ln(P_{O_2}^*) \right]$$

II.29

Il reste à définir les polarisations citées dans l'équation (II.28).

II.3.1 Polarisation d'activation

Ces pertes sont résultantes des faibles densités du courant, la décroissance logarithmique du potentiel est déterminée principalement par la somme des surtensions à l'anode et à la cathode correspondant aux équations de Butler-Vollmer et par la cinétique lente de transfert de

charge dans les zones actives. Cette polarisation est exprimée par l'équation suivante (équation II.30) :

$$V_{act} = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 \times T + \varepsilon_3 \times T \ln(C_{o_2}^*) + \varepsilon_4 \times T \times \ln(I_{pac}) \quad (II.30)$$

I_{pac} Le courant de fonctionnement de la pile en ampère (A).

Les coefficients $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ et ε_4 sont des constantes adimensionnelles paramétriques appropriés à chaque modèle physique de la pile à combustible PEMFC. (Présentés dans l'annexe A)

Tandis que C_{o_2} représente les concentrations de l'oxygène (mol/cm³) décomposé dans un film d'eau à l'interface de la membrane gaz/liquide sur la surface catalytique de la cathode, elle est exprimée en fonction de sa pression par la loi de Henry est exprimé par l'équation suivante (équation II.31)

$$P_{o_2}^* = P_{cath} \times (1 - X_{H_2O}^{sat}) \quad (II.31)$$

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

$X_{H_2O}^{sat}$: La fraction molaire de saturation de l'eau dans le gaz humidifié et supposée \approx à 50 %, l'équation dans ce cas devienne (équation II.32) :

$$P_{o_2}^* = P_{cath} \times \frac{1}{2} \quad (II.32)$$

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

$$P_{H_2}^* = P_{anode} \times (1 - \frac{1}{2} \cdot X_{H_2O}^{sat}) \quad (II.33)$$

$$P_{H_2}^* = P_{anode} \times \frac{3}{4} \quad (II.34)$$

II.3.2 Polarisation ohmique

Ces pertes sont liées aux résistances électroniques dans les plaques bipolaires, électrodes et connexions en série de l'assemblage et liée aussi aux résistances ioniques internes, diminuant la tension entre électrodes, elles sont exprimées par l'utilisation de la loi d'Ohm :

$$V_{Ohm} = I_{pac} \times (R_M + R_C) \quad (II.35)$$

$$R_M = \frac{l \times r_M}{A} \quad (II.36)$$

r_M : représente la résistance spécifique de la membrane, obtenue par la relation suivante (équation III.39) :

$$r_M = \frac{181.6 \times \left[1 + 0.03 \times \left(\frac{I_{pac}}{A} \right) + 0.062 \times \left(\frac{T}{303} \right)^2 \times \left(\frac{I_{pac}}{A} \right)^{2.5} \right]}{\left[\delta_{H_2O/SO_3} - 0.634 - 3 \times \left(\frac{I_{pac}}{A} \right) \right] \exp \left[4.18 \times \left(\frac{T-303}{T} \right) \right]} \quad (II.37)$$

Le terme $\left(\frac{181.6}{\delta_{H_2O/SO_3} - 0.634} \right)$ représente la résistance spécifique de la membrane ($\Omega \cdot \text{cm}$) à $I_{pac} = 0$ et à une température de 30°C ($T=303\text{K}$). Le terme exponentiel au dénominateur est le facteur de correction de la température si cette dernière n'est pas à 30°C .

δ_{H_2O/SO_3} - Est la teneur en eau dans la membrane, admettant une valeur minimale et maximale respectivement de 0 et de 22.

En remplaçons les relations dans l'équation (II.37) on aura l'équation suivante (équation II.38) :

$$V_{ohm} = \frac{I_{pac}}{A} \left[\frac{181.6 \times \left[1 + 0.03 \times \left(\frac{I_{pac}}{A} \right) + 0.062 \times \left(\frac{T}{303} \right)^2 \times \left(\frac{I_{pac}}{A} \right)^{2.5} \right]}{\left[\delta_{H_2O/SO_3} - 0.634 - 3 \times \left(\frac{I_{pac}}{A} \right) \right] \exp \left[4.18 \times \left(\frac{T-303}{T} \right) \right]} \times l \times A \times R_c \right] \quad (II.38)$$

II.3.3 Polarisation de concentration

A des densités de courant élevés la cinétique de diffusion des gaz à travers les électrodes devienne le facteur limitant due aux gradients de concentration des réactifs, et puisque à partir d'une certaine quantité de courant demandée, l'alimentation en molécules d'oxygène ne peut plus suivre, et la tension chute rapidement, cette chute de tension est nommé polarisation de concentration et elle est donné par la relation suivante (équation II.39).

$$V_{conc} = -B \left(1 - \frac{J}{J_{max}} \right) \quad (II.39)$$

Par conséquent la tension E_S de (n) piles unitaires reliées entre elle en série formant un assemblage est donné par la relation suivante (équation II.40).

$$E_S = n \times E_{PAC} \quad (II.40)$$

Le modèle de la PEMFC modélisé sous MATLAB Simulink, est le suivant (figure II.11) :

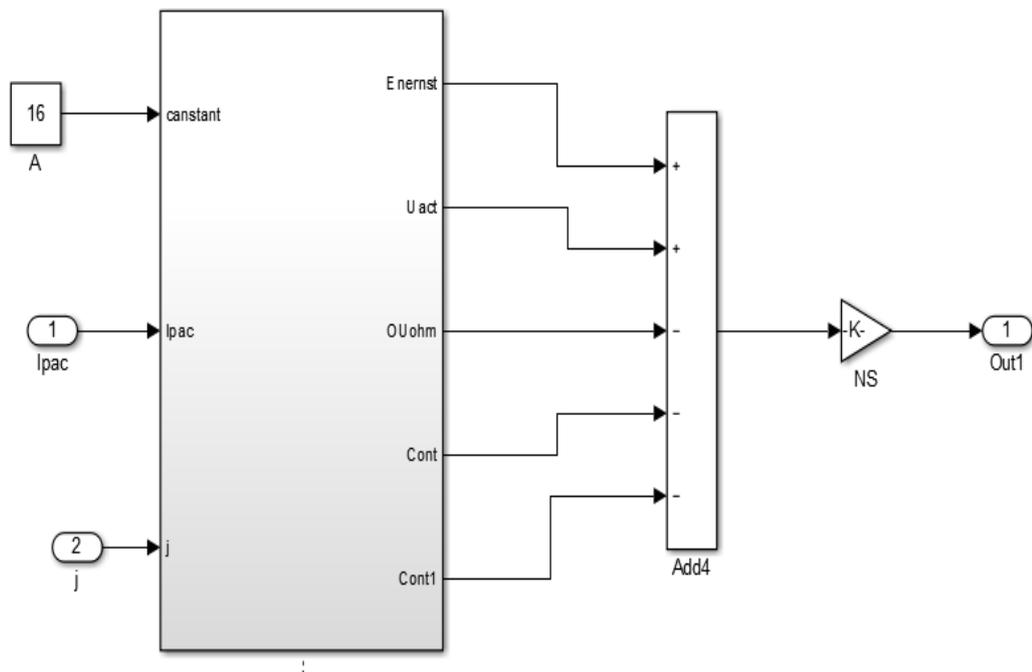


Figure II.17:Modèle de la PEMFC réalisé sous MATLAB Simulink.

Avant la simulation on ajoute les valeurs des constantes présenter dans le modèle comme des entrées ces paramètres sont présentés dans l’annexe A.

II.3.4 Les résultats de la simulation du modèle de la PEMFC

➤ La courbe tension courant

Après la simulation du modèle de la PEMFC réalisé sous MATLAB-Simulink on a obtenus les figures suivantes, la figure II.12 représente l’évolution de la tension de la pile en fonction de son courant

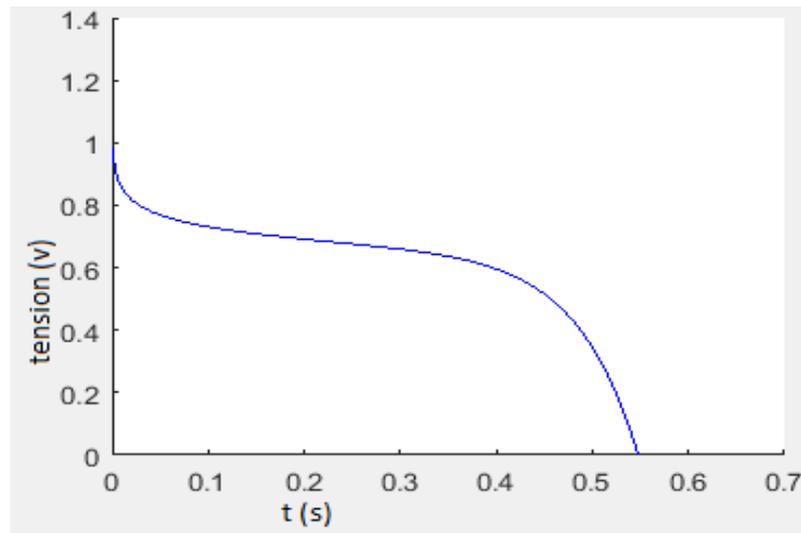


Figure II.18: Evolution de la tension de la pile en fonction de la densité du courant.

➤ **La courbe puissance courant**

Après la simulation du modèle de la PEMFC réalisé sous MATLAB-Simulink on a obtenus les figures suivantes, la figure II.13 représente l'évolution de la puissance de la pile en fonction de son courant.

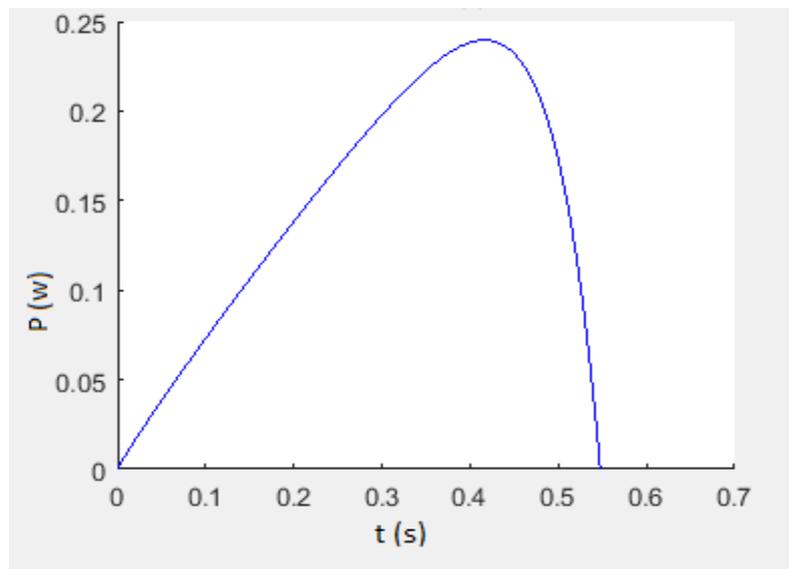


Figure II.19: Evolution de la puissance de la pile en fonction de la densité courant.

La figure 12 montre le comportement de la tension de la PEMFC, on remarque que la tension maximale de la PEMFC est de l'ordre de 1.8 V, en remarque aussi les différentes chutes de tension et leurs influences sur la tension de la pile. La figure 13 montre le comportement de la

puissance de la PEMFC, on remarque que la pile PEMFC atteint sa puissance maximale à $i=0,56A$.

II.4 Modélisation de la batterie

Il existe plusieurs modèles de batterie au plomb et leur mise en œuvre n'est pas aisée du fait de la prise en compte de plusieurs paramètres. Suivant les applications et les contraintes auxquelles elles sont soumises, les batteries réagissent différemment, et donc on ne trouve pas de modèle unique qui soit exact dans toutes les circonstances, notre modèle est basé sur le schéma suivant (Fig. II.14) où la batterie est décrite par seulement deux éléments, une source de tension et une résistance interne, dont les valeurs dépendent d'un certain nombre de paramètres.

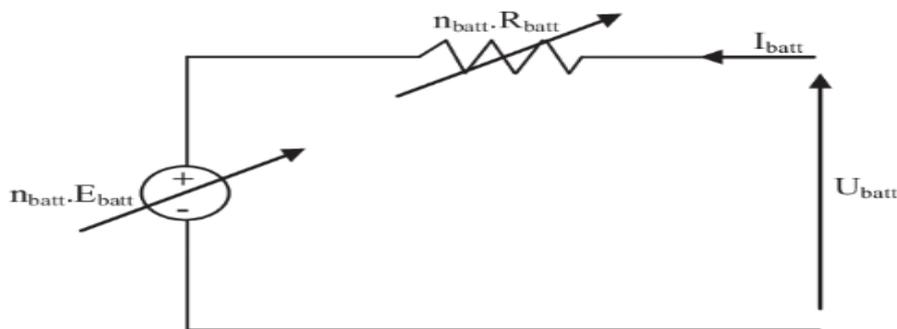


Figure II.20:Schéma équivalent du Batterie.

Dans ce modèle, pour nb cellules en série, la tension aux bornes de la batterie est donnée ci-dessous:

$$U_{batt} = n_{batt} \cdot E_{batt} \pm c$$

Ou U_{batt} et I_{batt} sont la tension et le courant de la batterie, E_{batt} est la f.e.m. (force électromotrice) d'une cellule de la batterie et R_{batt} sa résistance interne.

II.4.1 Modélisation de la capacité

Le modèle de la capacité C_{bat} donne la quantité d'énergie que peut restituer la batterie en Fonction du courant moyen de décharge $I_{bat, oy}$.

Cette capacité est donnée par :

$$c_{batt} = \frac{1,67C10}{1+0,67 \times \left(\frac{I_{batt,moy}}{I_{10}}\right)^{0,9}} (1 + 0,005\Delta T) \quad (II.41)$$

Avec :

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

C10 : Capacité nominale de la batterie (en Ah) en régime de décharge a courant constant

Durant 10 heures. Elle est donnée par le constructeur et elle est telle que :

$$C10 = 1 \times I10 \quad (II.42)$$

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

L'état de charge de la batterie EDC est fonction de la capacité C_{batt} et de la quantité de charge manquante à la batterie Q_m . L'évolution temporelle de cette dernière, dépend du mode de fonctionnement de la batterie, elle est définie par :

$$Q_m = I_{batt} \times T \quad (II.43)$$

Ou t est la durée de fonctionnement de la batterie avec un courant I_{batt} . L'expression de l'état de charge de la batterie EDC est donnée par

$$EDC = 1 - \frac{Q_m}{C_{batt}} \quad (II.44)$$

II.4.2 Equations de la tension de décharge

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

$$E_{batt-déch} = 1.965 + 0.12 EDC \quad (II.45)$$

$$R_{batt-déch} = R_{batt} + \frac{1}{C0} \left(\frac{4}{1+|I_{batt}|^{0.3}} + \frac{0.27}{EDC^{1.5}} \right) \quad (II.46)$$

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

$$V_{batt-déch} = n_{batt} \cdot E_{batt-déch} - n_{batt} \cdot R_{batt-déch} |I_{batt}| \quad (II.47)$$

$$V_{batt-déch} = n[1.965 + 0.12edc] - n \frac{|I_{batt}|}{C10} \left(\frac{4}{1+|I_{batt}|^{0.3}} + \frac{0.27}{EDC^{1.5}} + 0.02 \right) (1 - 0.007\Delta T) \quad (II.48)$$

II.4.3 Equations de la tension de charge

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

$$E_{batt-déch} = 2 + 0.16 EDC \quad (II.49)$$

$$R_{batt-déch} = Rb = \frac{1}{C10} \left(\frac{6}{1+(I_{batt})^{0.986}} + \frac{0.48}{(1-EDC)^{1.2}} + 0.036 \right) (1 - 0.025\Delta T) \quad (II.50)$$

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

$$V_{batt-char} = n_{bat} - char + n_{bat}R_{bat-char}I_{bat}$$

$$V_{b-char} = n[2 + 0.16EDC] + n \frac{I_{batt}}{I_{10}} \left(\frac{6}{1+(I_{batt})^{0.86}} + \frac{0.48}{(1-EDC)^{1.2}} + 0.036 \right) (1 - 0.025\Delta T) \quad (II.51)$$

II.5 Dimensionnement des éléments du système

II.5.1 Dimensionnement du stack pile à combustible

Le dimensionnement du stack consiste à déterminer le nombre et la surface des cellules qui composent un stack de piles à combustible. Ce dimensionnement doit tenir compte de la puissance nominale de la pile et de la densité de courant que nous souhaitons avoir en ajoutant 20% de la puissance qui va être consommée par les auxiliaires de la pile, donc :

$$P_{PAC} = P_d(1 + 0.2) \quad (II.52)$$

P_d : La puissance à l'entrée de l'onduleur.

$$P_{PAC} = 30(1 + 0.2) = 36kw \quad (II.53)$$

➤ Détermination du nombre de cellules :

La puissance électrique brute de l'empilement se calcule par la relation suivante

$$P_{PAC} = N_{PAC} \times E_{PAC} \times j \times S_{PAC} \quad (II.54)$$

Il est intéressant d'avoir la tension $U_{stach} = N_{PAC} \cdot E_{PAC}$ la plus élevée et donc le courant pour des raisons de rendement, il faut que la tension de pile soit au minimum de 390V. Ce qui donne un nombre de cellules de :

$$I_{stach} = j \cdot S_{PAC} \text{ Le plus faible possible car cela limite les pertes joule dans la cellule.}$$

La limite de la tension E_{PAC} d'une cellule d'une pile à combustible de type PEM est de 0.6v et

Une densité de courant nominale de 0,6 A/cm².

La pile à combustible est connectée à un convertisseur statique de type élévateur qui doit générer une tension de bus de 400V. Comme le gain de ce convertisseur est limité à deux

Pour des raisons de rendement, il faut que la tension de pile soit au minimum de 400V. Ce qui donne un nombre de cellules de :

$$N_{PAC} = \frac{U_{stach}}{E_{PAC}} = \frac{\frac{V_{bus}}{2}}{E_{PAC}} = ENT \left(\frac{200}{0.6} \right) + 1 = 334 \text{ cellules}$$

V_{dc} : Tension du bus continue soit 400V

U_{stack} : Tension du stack en pleine charge soit $U_{stack} = V_{dc}/2$

E_{PAC} : Tension de la cellule en pleine charge soit $E_{ch} = 0.6V$

➤ **Détermination de la surface des cellules**

Pour déterminer la surface de l'empilement on doit d'abord calculer le courant de PAC

$$I_{PAC} = \frac{P_{PAC}}{U_{stack}} = 180A$$

$$S_{PAC} = \frac{I_{PAC}}{U_{stack}} = 117cm^2$$

P_{PAC} : Puissance utile maximale soit 36 kW.

I_{PAC} : Courant maximal de la pile à combustible.

II.5.2 Dimensionnement du Batterie

Les caractéristiques de la batterie :

Tension nominale: 48V

Capacité nominale: 120Ah

Le courant de charge maximum: moins de 60A

Courant de décharge continu: moins de 150A Durée de vie: plus de 1000 cycles

Température de charge: 0 ~ 45 °C

Température de décharge: -20 ~ 60 °C

Température de stockage: -20 ~ 45 °C

Poids: 22K

Tension limite supérieure de charge: 54.6V

Tension limite inférieure de décharge: 10V

Puissance de la batterie: 5000W

Courant de travail normal: 100A

Plage de tension de fonctionnement: 54.6V-10V

Tension de protection contre les surcharges: 54.6V + 0.05V

Tension de protection contre les décharges excessives: 10V + 0.05V

Protection de la température de la batterie: 60 °C ± 5 °C

Sortie et paramètres: colonne de connexion positive/négative à courant élevé (électrode positive rouge, pôle négatif noir);

Durée de stockage de la batterie: 90% de puissance.

II.6 Les convertisseurs DC/DC

II.6.1 Hacheur survolteur

Connu aussi sous le nom de « Boost » ou hacheur parallèle ; son schéma de principe de base est celui de la figure II.15. Son application typique est de convertir sa tension d'entrée en une tension de sortie supérieure, où le rapport de conversion $D = \frac{V_0 - V_i}{V_0}$ change avec le rapport cyclique de commutateur.

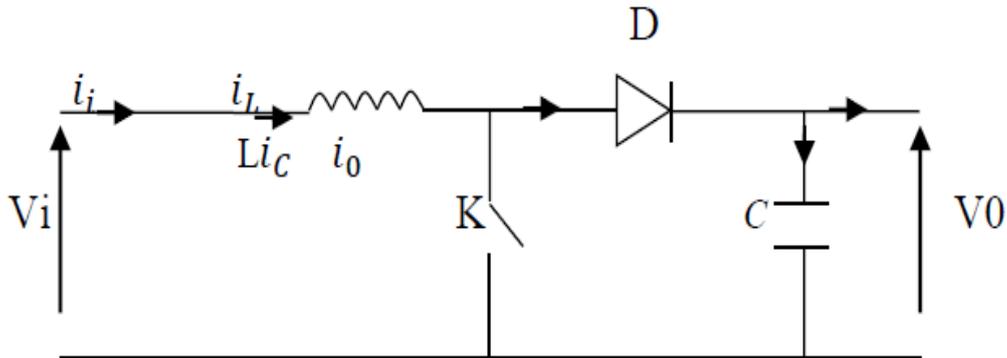


Figure II.21: Schéma de principe d'un hacheur survolteur(Boost) [21].

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

D'après la figure d'hacheur survolteur :

Lorsque l'interrupteur (K) est fermé :

$$V_i = L \frac{di_L}{dt} \quad (\text{II.55})$$

$$0 = C \frac{dv_{ch}}{dt} + I_{ch} \quad (\text{II.56})$$

Lorsque l'interrupteur (K) est ouvert :

$$V_i = L \frac{di_L}{dt} + V_{ch} \quad (\text{II.57})$$

$$I_L = C \frac{dv_{ch}}{dt} + I_{ch} \quad (\text{II.58})$$

En posant $u = 1$ lorsque l'interrupteur K est fermé et $u = 0$ pour K ouvert, nous pouvons représenter le convertisseur par un système d'équations unique. En valeurs moyennes, la tension de sortie est en fonction de la tension d'entrée et du rapport cyclique α . Son expression est

donnée par l'équation. La régulation de la tension de sortie se fait alors en contrôlant le rapport cyclique α .

$$V_0 = \frac{1}{1-\alpha} V_{pv} \quad (\text{II.59})$$

$$I_0 = (1 - \alpha) I_L \quad (\text{II.60})$$

II.6.2 Hacheur parallèle réversible en courant

Le convertisseur de puissance est nécessaire comme interface entre les sources secondaire d'énergie électrique et le bus continu. L'intérêt d'utiliser ce type d'interface est d'adapter les niveaux de tension des sources au bus continu. En outre, celui-ci contrôle l'énergie fournie ou absorbée par les sources en fonction de la stratégie de gestion d'énergie choisie. Le convertisseur doit être donc réversible en courant [20]

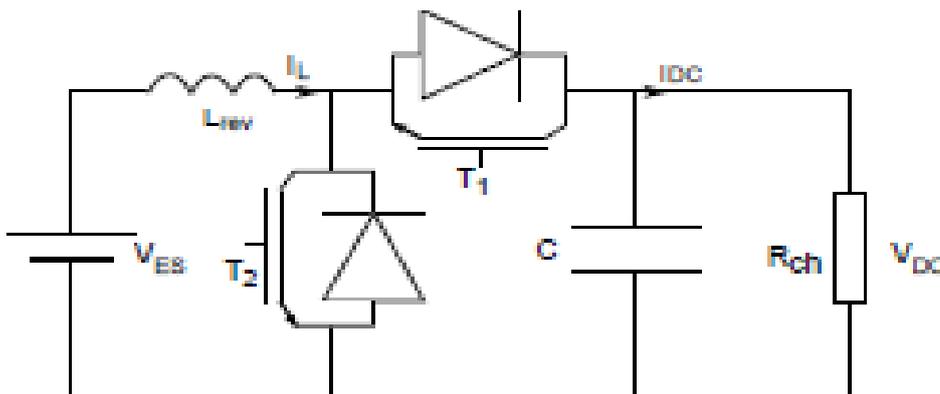


Figure II.22: Hacheur parallèle réversible en courant [20]

Le comportement du hacheur réversible en courant en régime permanent est décrit par les équations suivantes :

$$L_{rev} \frac{di_L}{dt} = V_{ES} - u_{rev} \cdot V_{DC} \quad (\text{II.61})$$

$$C \frac{dV_{DC}}{dt} = i_L \cdot u_{rev} - \frac{V_{DC}}{r} - i_{DC} \quad (\text{II.62})$$

Où : L_{rev} est l'inductance du hacheur réversible est, i_L et V_{EC} sont le courant et la tension de l'élément de stockage (la batterie). r une résistance connecte en parallèle au bus DC qui

représente des divers pertes. Notons aussi que la commutation des transistors est complémentaire : u_{rev} est l'ordre de commande du transistor T_1 $\overline{u_{rev}}$ celle du transistor T_2 .
On obtient le modèle moyen en substituant u_{rev} avec α_{rev} .

II.7 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons étudié les différents composants du véhicules, ou on a dimensionnée notre moteur et l'onduleur associée à ce dernier, Réussie a trouvé un modèle d'une pile à combustible et un autre pour la batterie, à la fin on a essayé de faire des simulations sur MATLAB Simulink pour les différents éléments.



Chapitre III

**Gestion de puissance des systèmes
hybride**



III. Introduction

Avec le développement de la technologie, la source d'énergie électrique occupe une place de plus en plus importante dans le monde industriel d'aujourd'hui. Les évolutions technologiques actuelles des batteries n'offrent qu'une autonomie très limitée aux systèmes qu'elles alimentent. De plus, soumettre les batteries à des états de forte fluctuation de puissance peut grandement nuire à leur fiabilité et à leur longévité. Ces inconvénients peuvent être réduits en branchant de nouvelles sources d'énergie fiables capables de fournir des pics de puissance au bon moment. La gestion de l'énergie dans les véhicules électriques est un domaine aujourd'hui de recherche de haut niveau.

III.2 stratégies de gestion

La gestion de l'énergie consiste à répartir les flux de puissance entre les différents éléments d'un système hybride. Plusieurs études ont contribué à déterminer la méthode optimale pour gérer l'énergie stockée afin d'exploiter au maximum les avantages complémentaires offerts par ces sources [11], [13].

On peut fonder ces stratégies sur trois notions différentes [12], [13]. Qui sont stratégie à base des règles, stratégie à base de méthodes d'optimisation déterministe, stratégie à base de méthodes d'optimisation stochastique (la machine à apprentissage).

III.2.1 Stratégie à base des règles

Pour les systèmes hybride on peut citer quelque règles de gestion : règles floues, règles déterministes, les réseaux de neurones.

III.2.1.1 Les règles floues

La logique floue est souvent utilisée dans la conception de stratégies de contrôle pour les véhicules électriques hybrides (VEH), principalement pour gérer le partage de puissance entre les moteurs en se basant sur l'état de charge et d'autres variables telles que le couple, la puissance et la vitesse. Elle peut également être utilisée pour choisir le mode de fonctionnement. Cette méthode a été formalisée par Lotfi Zadeh en 1965 et représente une alternative efficace pour le contrôle de systèmes complexes et non linéaires, car elle permet l'utilisation d'heuristiques intuitives pour obtenir un contrôle simple, fiable et robuste [12], [15].

Dans la logique floue, les variables sont caractérisées par des termes linguistiques flous, tels que « faible », « moyen » et « fort », et des fonctions d'appartenance sont attribuées à ces termes. Les degrés d'appartenance des variables peuvent prendre n'importe quelle valeur entre 0 et 1, ce qui permet d'éviter les situations binaires et de prendre en compte la nuance. Les règles de la logique floue entraînent des décisions distinctes qui sont pondérées en utilisant les degrés de satisfaction calculés pour chaque règle [15].

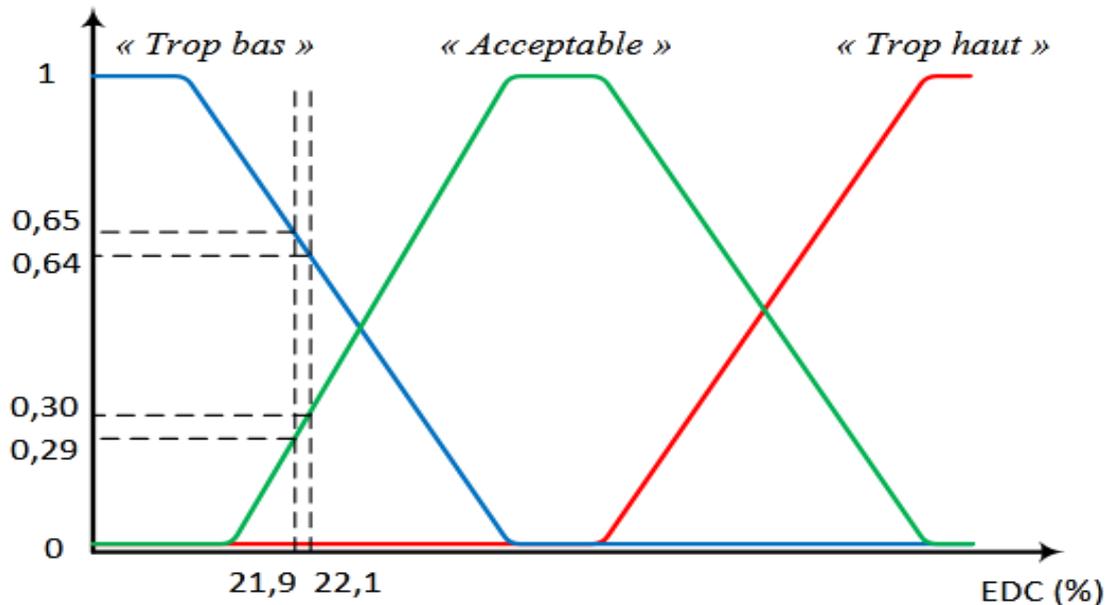


Figure III.23: Fonctions et degrés d'appartenance de la logique floue [15].

Les stratégies de contrôle basées sur la logique floue ont montré des performances supérieures aux méthodes déterministes en matière de consommation d'énergie et d'émissions. Les études comparatives ont montré des réductions significatives de la consommation d'énergie, allant jusqu'à 46%, selon le cycle de vitesse considéré. La logique floue est considérée comme un outil de contrôle robuste, adapté à une grande variété de cycles de vitesse et de conditions de trafic incertaines [15].

Cependant, l'implémentation des règles floues nécessite un certain niveau d'expertise de la part du concepteur, ce qui peut limiter son utilisation. Des hypothèses fortes doivent être faites en fonction des connaissances du concepteur sur le problème, ce qui peut être un inconvénient [12 [15].

III.2.1.2 Les règles déterministes

Sont couramment utilisées pour répartir la puissance entre les sources d'énergie d'un système hybride. Pour les VHE multi-source, il existe diverses méthodes de règles déterministes qui peuvent être utilisées, Dans ce cadre on va présenter ces techniques :

III.2.1.2.1 La stratégie « TOUT ou RIEN »

Est une méthode de type thermostat qui implique la répartition des flux de puissance entre deux sources de manière fractionnée, en utilisant l'état le plus performant de chaque source. Cette répartition de puissance s'effectue en commutation « tout ou rien » (on/off) [12].

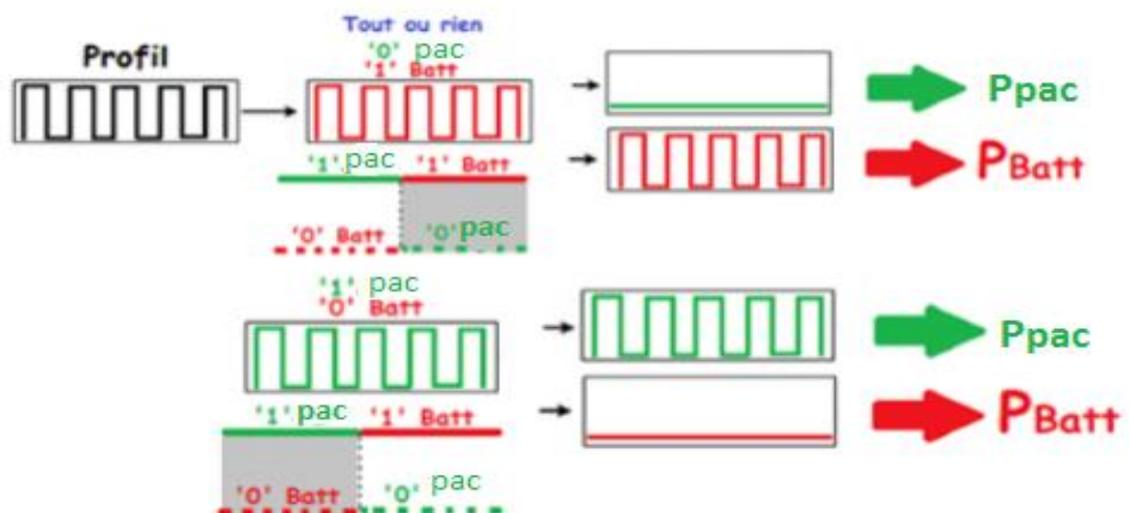


Figure III.2: Principe de la stratégie de gestion «Tout ou Rien»[12].

La **Figure III.2** représente le principe de la stratégie de gestion « tout ou rien » on utilise une batterie et une pile à combustible, elle indique que soit la batterie qui délivre la totalité de puissance demandée, soit la pile à combustible qui délivre la puissance aux profile demandée avec une commutation TOR entre les deux états.

III.2.1.2.2 La stratégie «Saturation de puissance»

Repose sur la limitation de la puissance de la batterie pour l'ensemble du profil de puissance requis. Une limite de puissance est préalablement définie pour la batterie. Ainsi, la pile à combustible prend en charge la différence entre la puissance requise et la limite préétablie [13], [16]. Cette méthode permet de réduire les variations de courant dans une plage

de puissance définie. Habituellement, le choix de la limite de puissance est basé sur les particularités et les caractéristiques des systèmes de stockage utilisés [12].

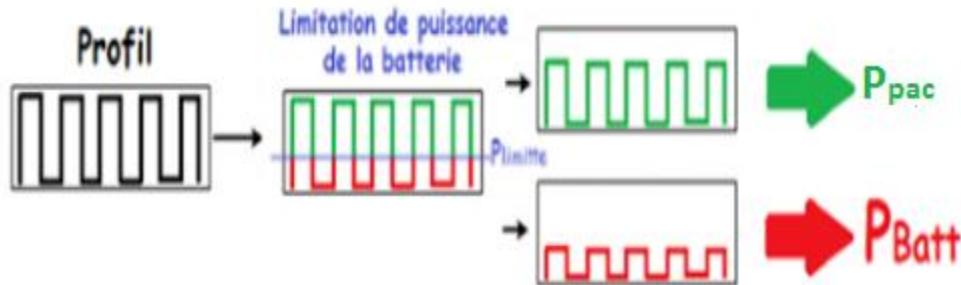


Figure III.3 : Principe de la stratégie de gestion «saturation de puissance» [12].

III.2.1.2.3 La stratégie «Saturation de puissance adaptative»

Est une version améliorée d'une stratégie présentée précédemment. Le concept de distribution des flux reste le même, mais elle est plus flexible car le seuil de puissance maximum côté batterie peut varier en fonction de la quantité d'énergie délivrée par la pile à combustible. Cette approche offre davantage de possibilités pour contrôler les flux de puissance, ce qui permet d'obtenir de meilleures performances [13][18].

III.2.1.2.4 La stratégie «Partage fréquentiel »

La stratégie de « Partage fréquentiel » consiste à diviser la puissance demandée en fréquences hautes et basses, en se basant sur le profil d'utilisation. Cette approche permet d'exploiter les caractéristiques spécifiques des sources de stockage utilisées. Elle exige que la pile à combustible gère les pics de puissance et que les composantes à basse fréquence soient gérées par les batteries, [17].

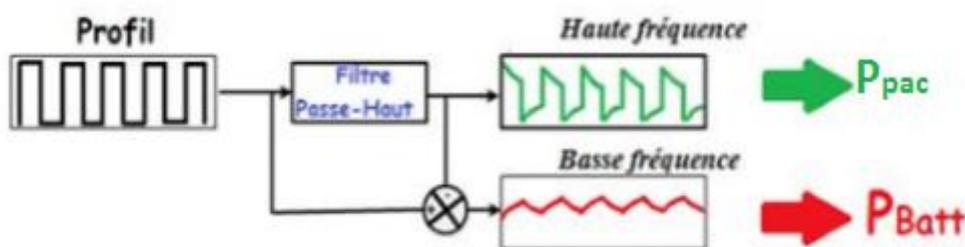


Figure III.24: Principe de la stratégie de gestion «partage fréquentiel » [12].

III.2.1.3 Les règles à base des réseaux neurones

Les modèles de réseaux neuronaux sont des outils informatiques conçus pour imiter les capacités cognitives humaines, telles que la mémorisation et le raisonnement. Des recherches ont été menées pour appliquer cette approche à la gestion de l'énergie, comme en témoignent certaines études de la littérature. Ates a élaboré un contrôleur de supervision basé sur un réseau neuronal, en utilisant la méthode de l'Adaptive Linear Neural Network (ADALINE) pour déterminer la puissance fournie par un système de pile à combustible dans un véhicule hybride. Askarzadeh et Prokhorov ont également combiné ce type de réseau neuronal avec de la logique floue pour augmenter les possibilités de la méthode. Cependant, cette approche a l'inconvénient de nécessiter une grande base de données expérimentale pour la formation du processus de connaissance, ainsi qu'un manque de preuves de stabilité, [12], [17].

III.2.2 Stratégie à base de méthodes d'optimisation déterministe

Les méthodes d'optimisation visent à déterminer le contrôle optimal des flux de puissance d'un système multi-source, classées en hors ligne et en ligne selon leur résolution

III.2.2.1 Stratégie d'optimisation hors ligne :

Les stratégies d'optimisation hors ligne nécessitent la connaissance préalable du cycle de conduite et sont implémentées avant utilisation, ce qui les rend inapplicables en temps réel. Cependant, elles sont utiles pour évaluer d'autres stratégies, aider à la conception de systèmes multi-sources et ajuster d'autres stratégies de gestion à base de règles. La programmation dynamique est une technique couramment utilisée pour résoudre des problèmes d'optimisation dans les systèmes hybrides de stockage, comme ceux associant une batterie et des supers condensateurs, avec un objectif de minimisation du courant efficace de la batterie [17] [17] [19].

III.2.2.2 Stratégie d'optimisation en ligne :

Les stratégies d'optimisation en ligne permettent de trouver la répartition optimale des flux de puissance en temps réel, sans avoir besoin de connaître le profil de conduite à l'avance. Cependant, leur réussite dépend de la limitation du temps de calcul et de la capacité à obtenir la solution optimale indépendamment des conditions de conduite. Des techniques telles que la commande prédictive et la commande optimale basée sur la minimisation de consommation

équivalente (ECMS) ont été appliquées pour résoudre ce problème dans les systèmes multi-source [12] [17] [19].

III.2.2.3 Commande prédictive

La commande prédictive de type MPC (« Model-Predictive Control ») utilise un modèle prédéfini du système pour estimer les conditions de conduite futures et obtenir une solution optimale. Cependant, une étude comparative a montré que cette approche est moins performante que les stratégies à base de règles en termes de temps de convergence et d'optimalité de la solution. La commande prédictive est plus adaptée aux systèmes comportant plusieurs entrées et sorties [12] [17] [19].

III.2.2.4 Commande optimale

La stratégie de commande optimale basée sur le « Principe du Maximum de Pontriaguine » (PMP) est une méthode de résolution hors ligne qui a été adaptée pour une utilisation en temps réel. Cette approche offre une répartition optimale instantanée des flux de puissance dans un système multi-source en utilisant des méthodes dérivées du PMP, comme la méthode de « l'Equivalent Consumption Minimisation », qui consiste à minimiser une somme pondérée de puissances. Cette méthode a été utilisée sur des véhicules multi-sources dans plusieurs travaux. La méthode du « λ -control » permet d'adapter le paramètre de résolution en intégrant une boucle d'asservissement [12] [17] [19].

III.2.3 Stratégie à base de méthodes d'optimisation stochastique (Machine Learning)

Le Machine Learning, qui est un sous-domaine de l'intelligence artificielle, est une discipline qui se concentre sur l'utilisation d'algorithmes informatiques pour permettre aux systèmes de réaliser des tâches intelligentes en s'adaptant à partir des observations de données et d'expériences antérieures. Cette méthode est largement utilisée dans des applications courantes telles que les recommandations de films sur Netflix et la reconnaissance optique des caractères. En outre, elle peut être utilisée dans des domaines spécifiques tels que la gestion de l'énergie pour prolonger la durée de vie de la batterie des téléphones portables et la réduction de la consommation de carburant pour les véhicules hybrides. Des stratégies de contrôle basées sur l'apprentissage automatique peuvent également être utilisées pour optimiser la distribution de flux de puissance dans les véhicules tout en offrant un compromis entre la simplicité de la mise en œuvre en temps réel, le temps de calcul et l'optimalité de la solution [12] [17].

III.3 Organigramme de gestion de puissance du véhicule électrique

La complexité des systèmes hybrides rend la prise de décision difficile. Toutefois, une stratégie de contrôle intelligente est nécessaire pour gérer le comportement et la répartition de la puissance du système hybride. Ces sources énergétiques doivent alimenter la charge suivant ses besoins en respectant les différentes contraintes liées au fonctionnement des sources. Cette gestion d'énergie s'effectue par l'intermédiaire de l'électronique de puissance qui assure la répartition des flux entre les sources, les éléments de stockage et la charge, par le biais des convertisseurs qui sont, dans ce travail, asservis en courant. Il suffit de leur donner une consigne de courant optimale pour maîtriser de façon efficace le transfert d'énergie de la source associée. Afin d'obtenir cette référence de courant nécessaire pour les convertisseurs, plusieurs stratégies de contrôle ont été développées pour optimiser le fonctionnement du système, dans notre étude nous intéresseront à la méthode déterministe.

Le système de gestion d'énergie présenté est faite par rapport à la dynamique de véhicule il utilise un algorithme simple basé sur une logique de seuil, son objectif est de développer selon la position de la pédale d'accélérateur et la vitesse du véhicule, la commande de l'ensemble motopropulseur dont le rôle est de choisir à chaque instant la meilleure répartition de puissance entre les différentes sources d'énergie d'une manière à minimiser la consommation du combustible et répondre aux besoin de la charge, Dans cette stratégie, nous distinguons les trois modes de fonctionnement possibles du véhicule, à savoir le mode arrêt, le mode traction et le mode freinage.

➤ Voici comment fonctionne l'organigramme de gestion d'énergie :

L'alimentation de la charge par la pile à combustible si cette dernière elle est inférieure à 35 KW, et la compensation de puissance de charge par les batteries dont le cas elle est supérieure à 35 KW, si le SOC_{bat} < 30% c'est le fonctionnement de la pile toute seule (Mode 1, 2 et 3) mode accélération.

Dans le mode de freinage ($P_{dem} < 0$) en récupère l'énergie pour charger les batteries si SOC_{bat} < 95 et dissiper cette puissance sur une charge à part c'est le SOC > 95% (mode 4 et 5).

Le mode d'arrêt qui représente (mode 6 et 7), chargement des batteries à 50% pour les utiliser comme un réserve, si non aucun flux énergétique.

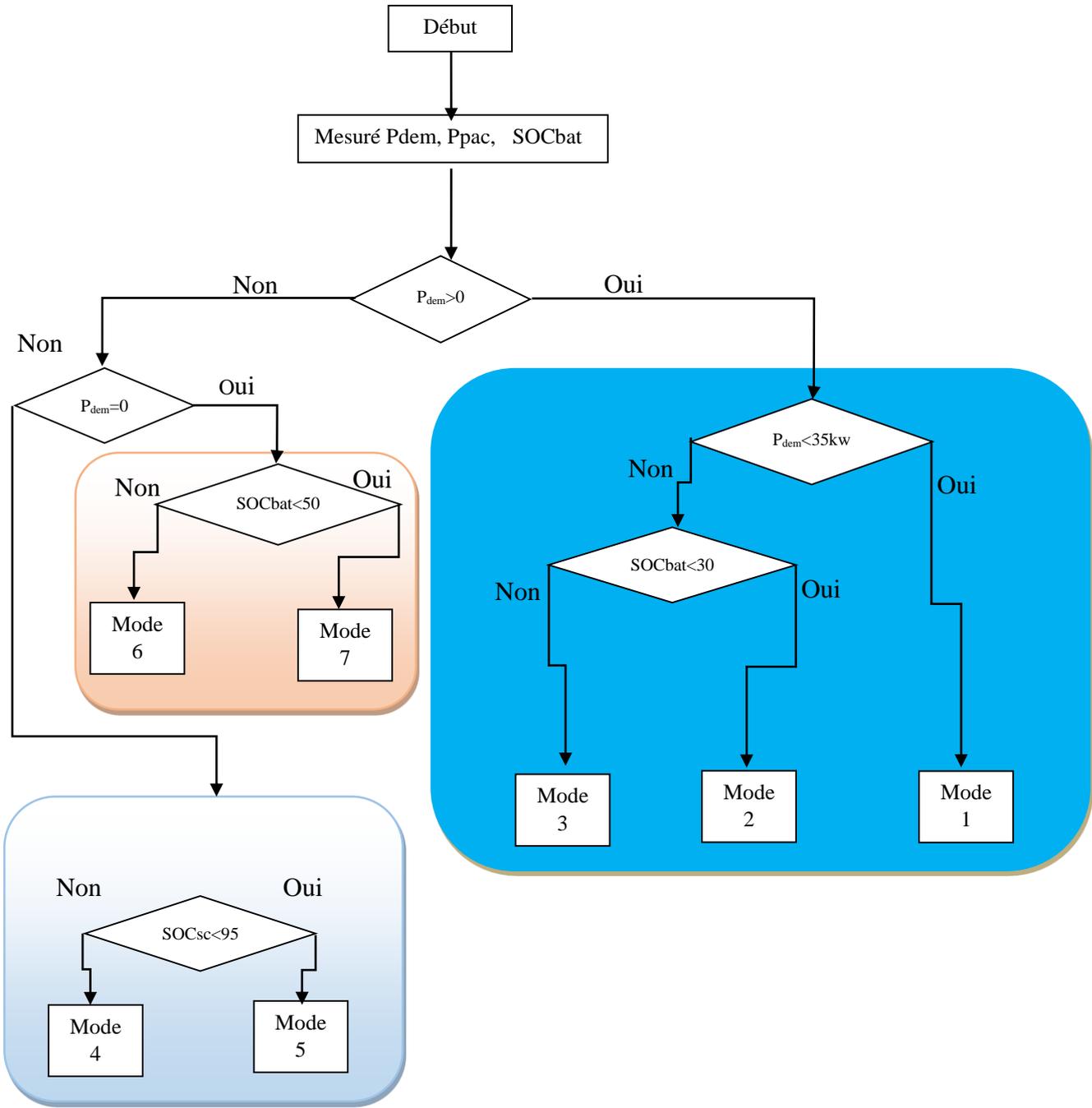


Figure III.5 : Organigramme de gestion de puissance

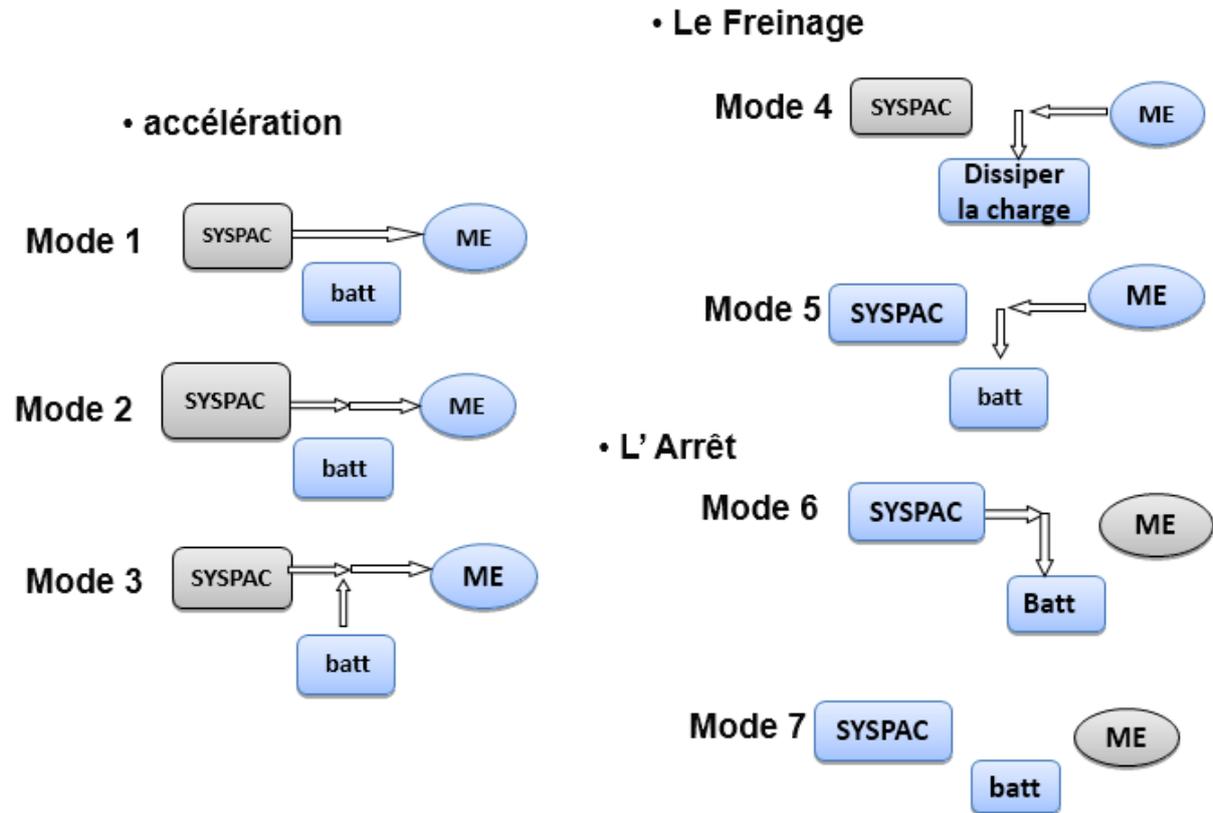


Figure III.6:Le fonctionnement des différents modes de la gestion de puissance.

III.4 Conclusion

La chaîne énergétique des véhicules hybrides électriques se différencie par le type d'architecture considérée et les différentes sources qu'elle contient. Chaque architecture présente des avantages et des points faibles liés à la stratégie de gestion de l'énergie électrique et au dimensionnement de ses sources énergétiques. Il est important de noter qu'un dimensionnement optimal de la chaîne énergétique combiné à une gestion d'énergie efficace permet de concevoir des systèmes hybrides intelligents et efficaces à moindre coût. Afin de parvenir à cette efficacité, plusieurs technologies et techniques de gestion et de dimensionnement ont été adoptées afin d'améliorer les performances des véhicules électriques en augmentant leur autonomie.



Chapitre IV

Résultats et Simulation



IV .1_ Introduction

Au cours de ce chapitre, nous allons évaluer les performances des lois et la gestion d'énergie présentées dans les deux chapitres précédents. D'où nous tracerons les résultats de simulation du véhicule afin de tester ses performances. Pendant ces tests, nous soumettrons le véhicule à un profil de conduite spécifique qui nous permettra de découvrir les différentes performances dynamiques du système dans les deux modes de fonctionnement.

IV .2_ Simulation générale de véhicule

La figure 1 représente le schéma global de véhicule électrique, où cette dernière contient tous les éléments de système [la pile à combustible, la batterie, le moteur électrique (MSAP), et les différents convertisseurs d'électronique de puissance].

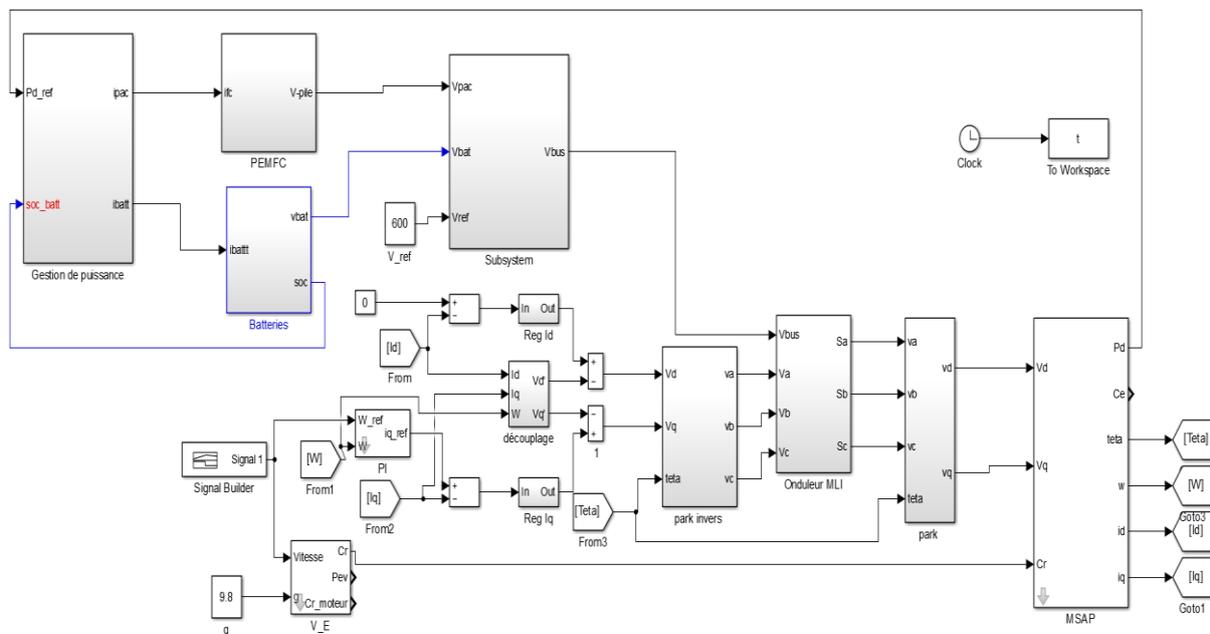


Figure IV.25: Schéma globale de véhicule.

IV .3_ Résultats de simulation

Nous avons simulé le système dans une période de 10 secondes qui est équivalent à 10 heures dans la réalité, pendant le fonctionnement la vitesse variée selon un profile. En utilisant le modèle dynamique développée du véhicule (figure IV.1) et la gestion proposée dans le chapitre 3 on a arrivé à simulé le système dans l'environnement MATLAB/Simulink, où on a obtenu les différents allures dans les deux modes [Mode accélération et Mode freinage] pour l'analyse.

IV .3 .1_ Mode traction :

A_ Vitesse de référence :

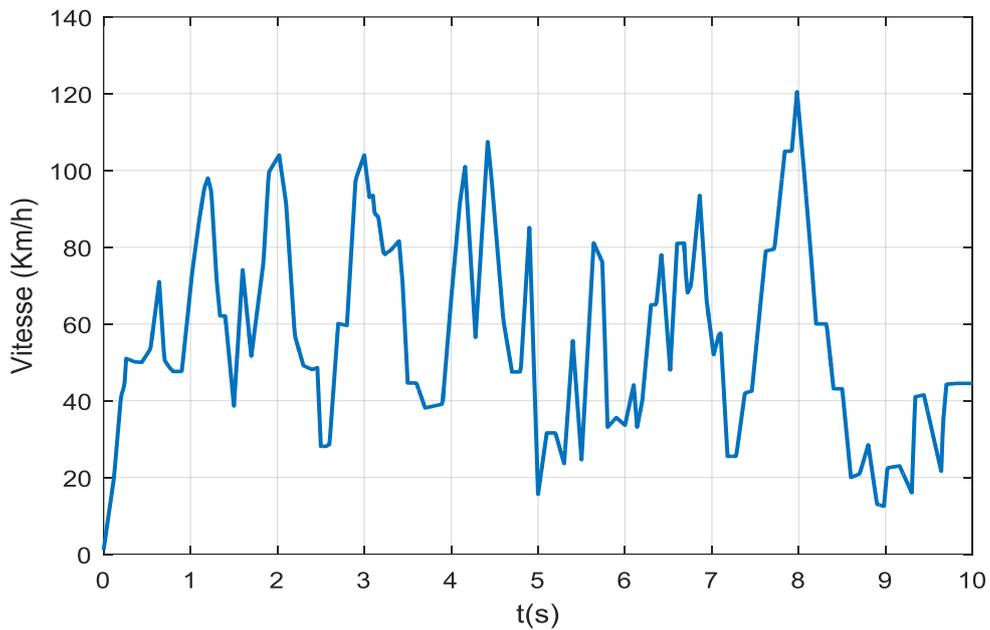


Figure IV.26: Vitesse de référence en Km/h.

La figure IV.2 montre l’allure de vitesse du véhicule en Km/h. on a choisi un profil de vitesse qui va nous permettre de découvrir le fonctionnement de différent modes [accélération et freinage]. Cette vitesse va imposer allure de vitesse du moteur car le modèle mécanique du véhicule est basé sur sa vitesse et sur l’accélération g.

B_ Vitesse de moteur (MSAP) :

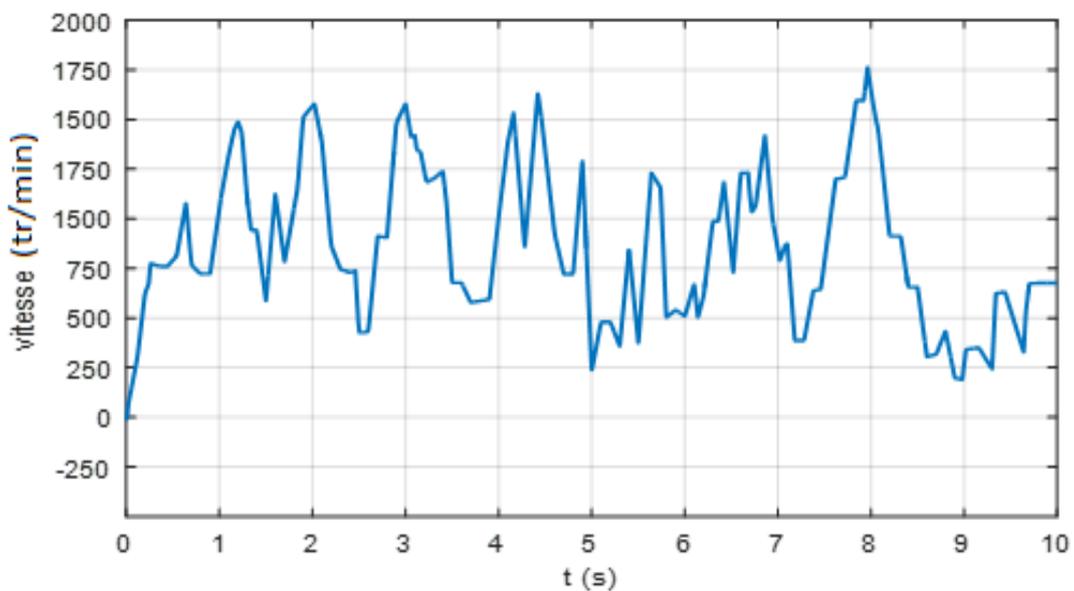


Figure IV.27: Vitesse de moteur en Km/h.

On comparant la figure IV.3 par la précédant en trouve que le moteur suit parfaitement la vitesse de référence imposé par la commande vectorielle la même que la vitesse de véhicule.

C_ Puissance demandée

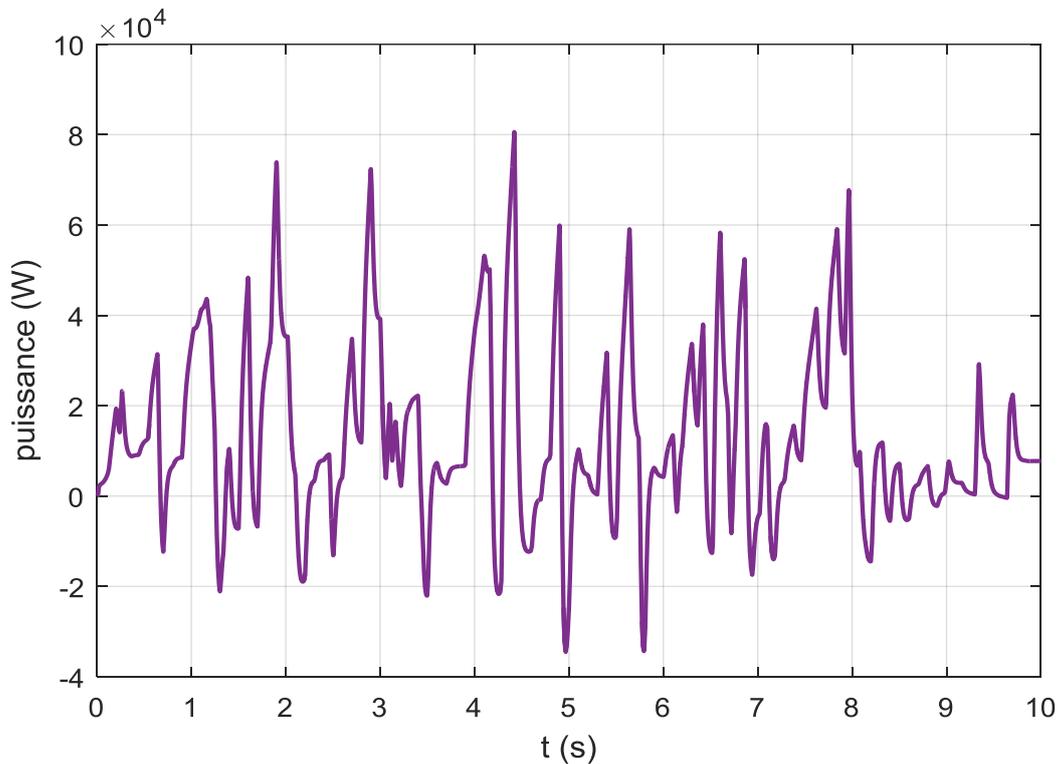


Figure 28: Puissance demandée en w.

La conduite des véhicules lors des différentes phases [montée, descente, la conduite dans la ville dans l'autoroutier] implique une demande de puissance correspondante, ce qui est très utile pour tester les performances de véhicule électrique dans ces phase.

La figure 4 montre la puissance demandée par le véhicule par rapport au cycle de vitesse proposé qui comporte le mode accélération et le mode freinage. Cette simulation permet de déterminer la puissance nécessaire pour rouler par une vitesse stable ou de calculée la force nécessaire pour avoir cette accélération.

D_ Puissance délivrée par la pile à combustible

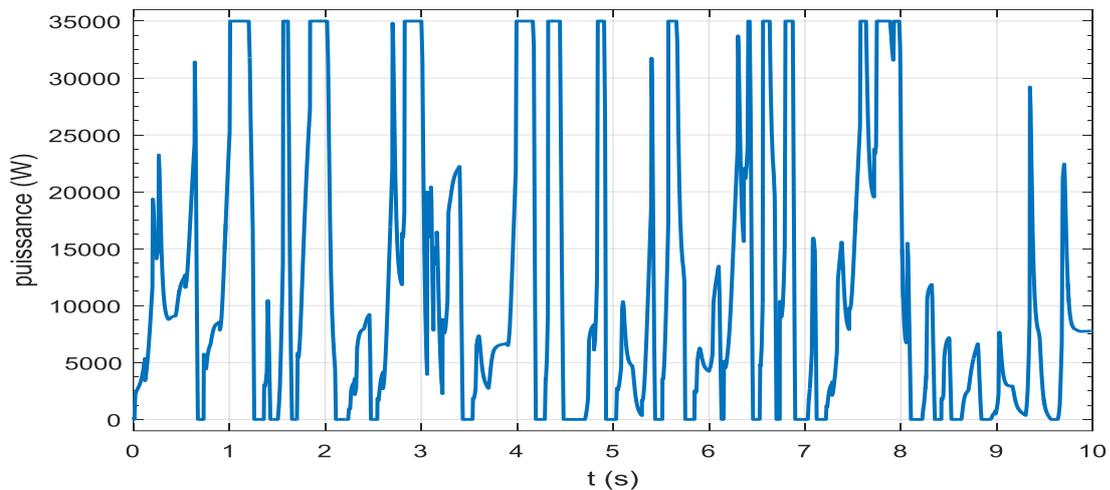


Figure IV.29: variation de la puissance délivrée par la pile à combustible.

Cette figure montre la variation de la puissance délivrée par la pile, on remarque que une forte puissance qui atteind le maximale [35kw] ce qui oblige L'intervention de la batterie pour la compensation pour atteindre la puissance demandée.

E_ La puissance délivrée par la batterie

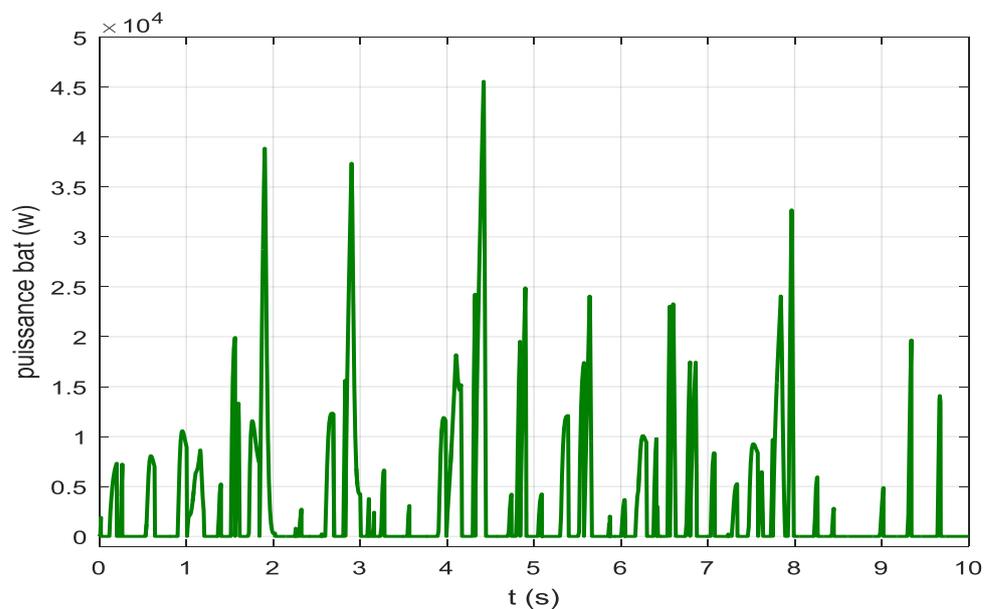


Figure IV.30: variation de la puissance de la batterie en mode traction.

Cette figure montre l'allure de la puissance délivrée par la batterie, en qu'elle peut atteindre 4.6 KW dans la forte demande en puissance.

F_ profile des puissances de mode traction

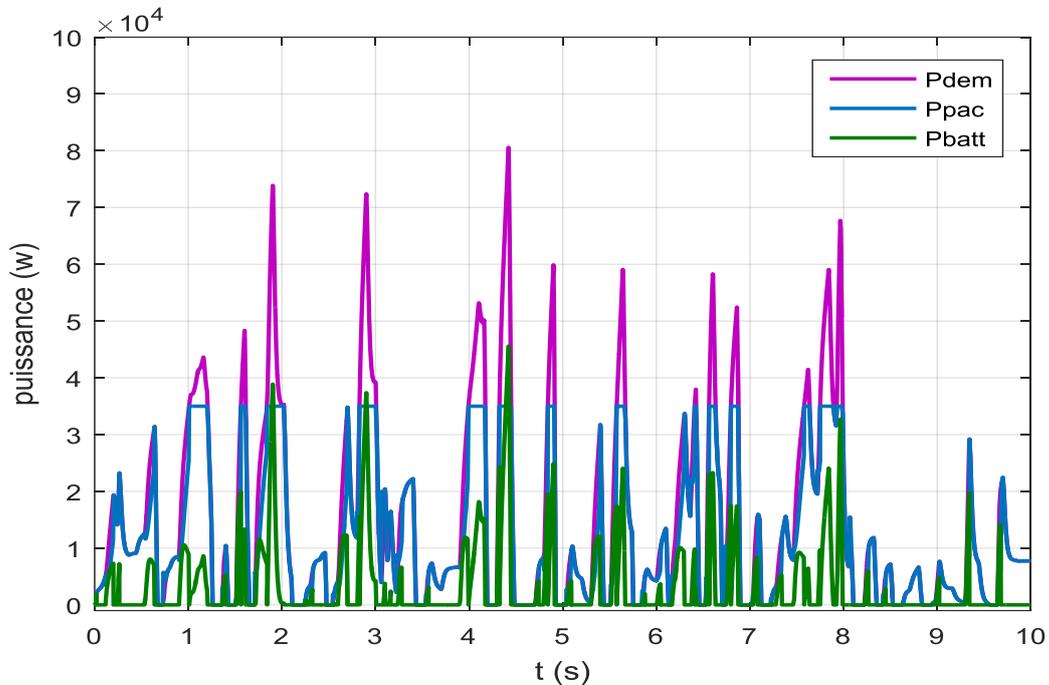


Figure IV.31: profil de variation de puissance durant le mode de traction.

La figure IV.7 montre l'ensemble des puissances de notre système en mode traction, on remarque que les sources d'énergie répondent bien pour le besoin de puissance durant la traction, d'où la pile tien en compte l'alimentation du véhicule dans les puissances égale ou inférieur à 35kw, pour une puissance supérieur la batterie intervient pour compenser le manque.

IV .3 .2_ Mode freinage

Profil de puissance de la batterie

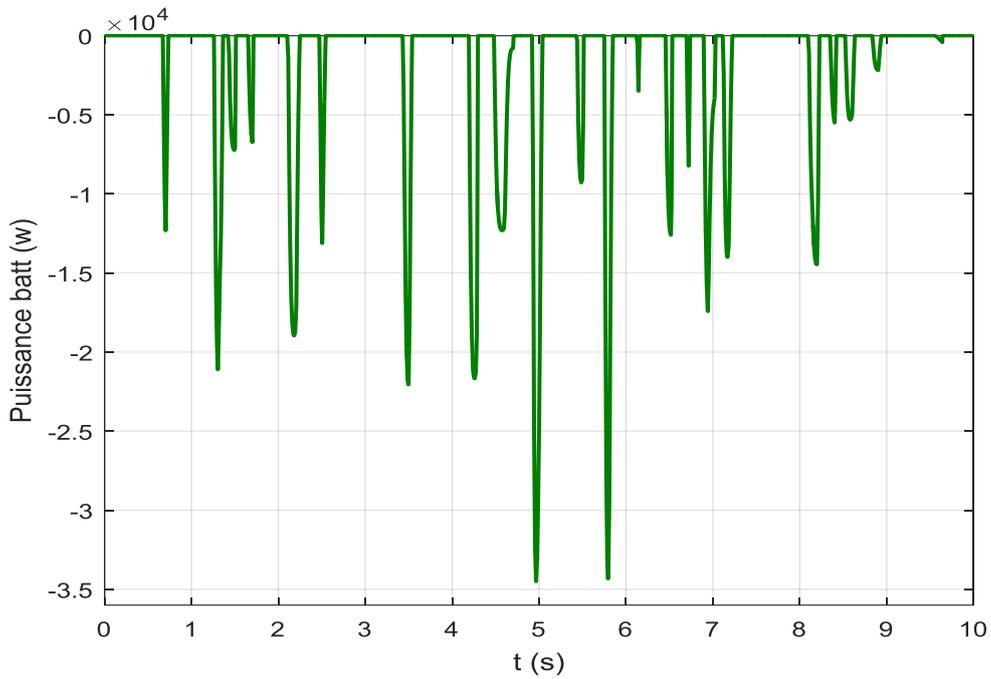


Figure IV.32: profil de puissance de la batterie en mode freinage.

D'après les résultats de cette figure on remarque que la batterie récupère dans le mode freinage l'énergie électrique délivrée par la MSAP pour la stockée, c'est-à-dire elle se recharge à chaque freinage.

IV.4_ La combinaison des résultats

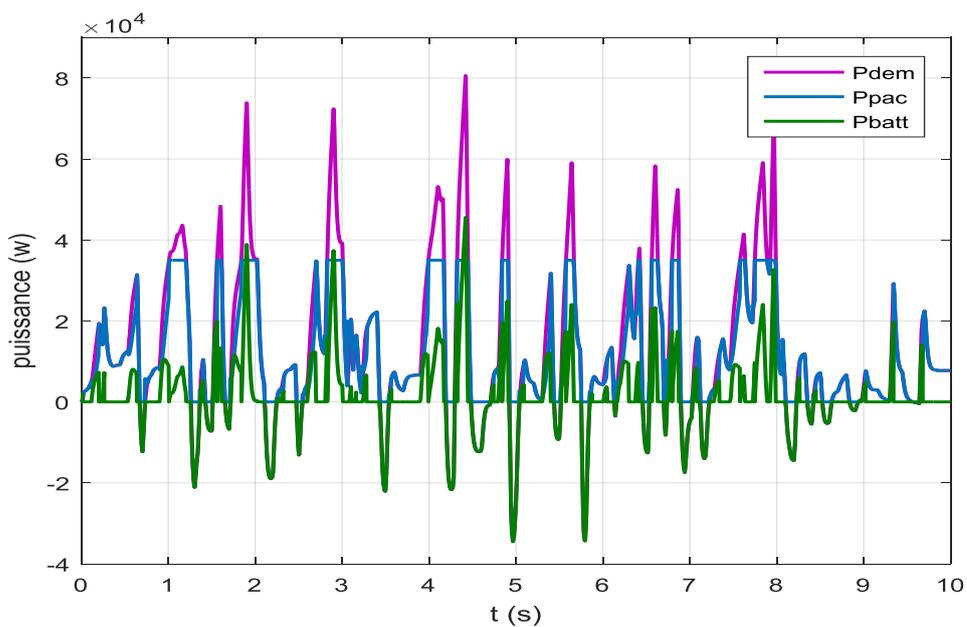


Figure IV.33: Profil de toutes les puissances.

Nous remarquons dans cette figure que la pile à combustible tient au compte l'alimentation de notre véhicule durant tout le parcours, mais durant la forte demande de puissance la batterie sollicite la pile, on remarque aussi que la batterie récupère l'énergie à chaque freinage. Dans le cadre de repense des sources on remarque que la batterie repense plus vite que la pile.

IV. 5_ Etat de charge de la batterie

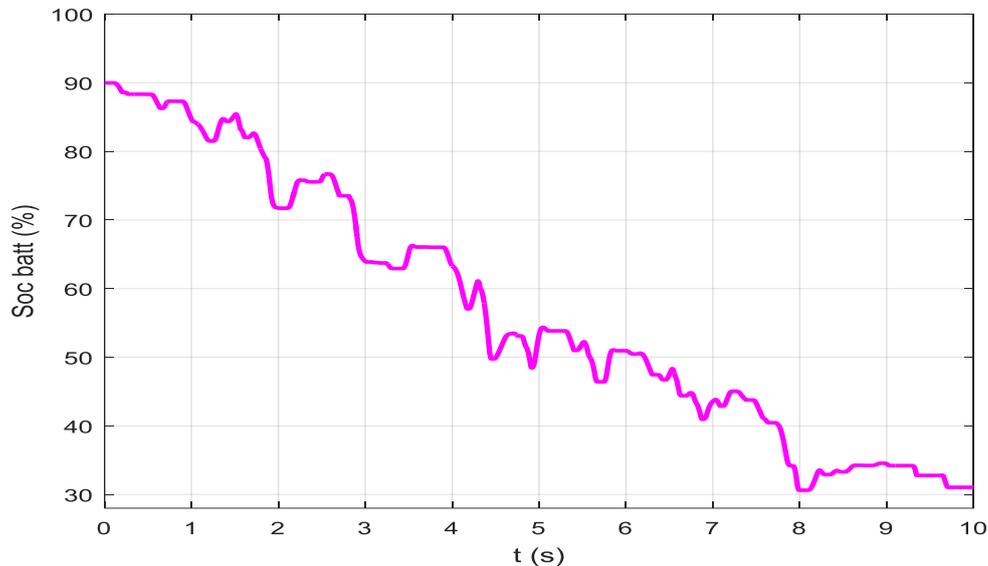


Figure IV.34: Etat de charge de la batterie.

La figure IV.10 montre l'état de charge de la batterie, elle intervient dans chaque forte demande de puissance, d'où elle se décharge jusqu'à l'arrivée au soc_min (30%) elle se met en charge, on remarque qu'elle récupère la totalité d'énergie à chaque freinage.

IV. 6_ conclusion

La gestion efficace des puissances à bord d'un véhicule électrique hybride à pile à combustible est cruciale pour répondre aux besoins de traction et de recharge. Ce type de véhicule utilise à la fois un système de pile à combustible et un système de batteries pour fournir l'énergie nécessaire au moteur. En surveillant attentivement les flux de puissance requis par le moteur et les batteries, il est possible d'optimiser leur utilisation, ce qui conduit à une meilleure recyclabilité et à une amélioration de leur durée de vie. Ainsi, une gestion adéquate des puissances à bord contribue à maximiser l'efficacité et la durabilité de ce type de véhicule.



Conclusion

GENERALE



Conclusion générale

Le principe objectif de ce travail était de proposer une gestion robuste pour un système hybride d'un véhicule électrique afin d'avoir une bonne autonomie et une bonne repense à la forte demande de puissance.

Nous avons entamé notre travail par des généralités sur les systèmes hybrides, d'où on a parlé sur les différentes configurations et architecture des bus pour les systèmes hybride, puis on a parlé sur le convertisseur et des généralités sur les véhicules électriques.

Nous avons consacré le deuxième chapitre pour la modélisation et la mise en équation les différents composants de notre véhicule, d'où on a simulé et réalisé ces composants dans l'environnement MATLAB.

Nous avons abordé dans le troisième chapitre les différentes gestions d'énergie des systèmes hybride et proposé une gestion pour notre véhicule.

On a terminé notre travail par un quatrième chapitre, où on a simulé le schéma global de notre véhicule et tracé aussi interprété les différents résultats trouvés.

Ce projet nous a permis d'approfondir nos connaissances dans le domaine des systèmes hybrides et des véhicules électriques hybrides. Nous avons pu mettre en pratique nos compétences en modélisation et en simulation. Les résultats confirment l'efficacité de la méthode de gestion que nous avons proposée.

En conclusion, ce projet a été une opportunité pour nous d'explorer et de développer nos connaissances dans un domaine en plein essor. Nous avons acquis une expérience précieuse dans la gestion des systèmes hybrides, ce qui nous sera bénéfique pour notre future carrière dans le domaine de l'électrification des transports.

Perspectives :

- L'essai de la réalisation du travail sur le réel
- Utilisation d'autres sources renouvelables



Bibliographie



Bibliographie :

Bibliographie :

- [1] : H_ IBRAHIM, A_ ILINCA, j_ PERRON « investigation différentes alternatives renouvelables hybrides pour l'électrification des sites isolés » Rapport interne Laboratoire de Recherche en Energie Eolienne LREE- 03_ septembre 2008.
- [2] : M_ MADIHA « Gestion d'énergie d'un système d'entraînement électrique hybride basé sur moteur synchrone à aimants permanents » université Mohamed Khider _ Biskra, 2014.
- [3] : F_ Fadila, B_ Nawel « Modélisation d'un Système énergétique hybride (photovoltaïque + batterie) » Université LARBI BEN M'HIDI OUM-EL-BOUAGHI, JUIN 2010.
- [4] : B_ ZAKARIA,H_ ELMAHDI « simulation d'un système hybride autonome » école supérieur en sciences appliquées_ Tlemcen,11/09/2020.
- [5] : B_ Charaf Eddine, B_ Makhoulf Mohammed « gestation optimal d'un système hybride » Centre universités Abdel Hafid Boussouf-Mila Institut des sciences et de Technologie, 2021/2022.
- [6]: Trust my science.com/ un nouveau système permet de stocker des énergies renouvelables pour les restituer à la demande, publiée par thomas Boisson le 6 décembre 2018.
- [7]: Brihmat Fouzia « l'étude conceptuelle d'un système de conditionnement de puissance pour une centrale hybride PV/Eolien » Univerité mouloud mammeri de Tizi-Ouzou,2012.
- [8]: Abdoul karim Traoré « gestion d'un système hybride photovoltaïque éolien pour applications agricoles » université du Québec à Trois-Rivières, juillet 2016.
- [9]: amededjihunde hypolite Hounnou « Architecture mixte à bus cc/ca d'un système hybride». décembre 2019.
- [10] : Djamel Saba « Architecture mixte à bus cc/ca d'un système hybride». juin 2017.
- [11] :Guettari Anissa Hafsia « Etude et dimensionnement d'un système d'énergie électrique mixte :photovoltaïque et éolien » Université aboubakr bekaid-Tlemcen. 2018.
- [12] :Riadh abdelhedi « optimisation d'un système de stockage hybride de l'énergie électrique avec batterie et super condensateur pour véhicule électrique »L'institut National des sciences appliquées et de technologies et L'université claude bernad Lyon 1, 17/12/2018.
- [13] :Tedjani Mesbahi « Influence des stratégies de gestion d'une source hybride de véhicule électrique sur son dimensionnement et sa durée de vie par integration d'un modèle multi-

Bibliographie :

physique »Laboratoires S2ET ESTACA' LAB-Laval et L2EP-Lille Ecole Doctorale SPI072(Centre Lille), 25/03/2016.

[14] :R-Célia, T-Lydia « Etude d'un Véhicule électrique » Université Abderrahmane mira-Bejaia. 2020.

[15] :Nicolas Dinis « système de gestion d'énergie d'un véhicule électrique hybride Rechargeables à trois Roues »Université Sherbrook, Mai 2014.

[16] : Stéphane Butterbach « Stockage d'énergie électrique par association de batteries au plomb et de supercondensateurs pour véhicule lourd » Université de technologie de compiegne, 2012.

[17] :A- Hammani, R-Sadoun, N-Rizoug, P-Bartholomeble, B-Barbedette « Influence of the management Strategies on the sizing hybride Supply composed with battery supercapacitor »Finst international conference Renewable Energies and vehicules technologie 2012,PP.1_7.

[18] :A-Floreseu, S-bacha, L-munteanu, A-luilliana-B, A-Rumeau «Adaptative frequency-separation based Energy Management systems for electric-v»Journale of power source.2015.280PP410.421.

[19] :Ramon Naiff da Fonseca « optimisation of the sizing and Energy Management Strategy for Hybrid fuel Cell Vehicle Including Fuel Cell Dynamics and Durability Constraints»ph.D of sience of the institut National des siences appliqués de Lyon-INSA Lyon, October 2013.

[20] : Philip Tritschler 'Optimisation de l'architecture électrique et gestion d'énergie pour un Système_a pile_a combustible embarquée dédiée a l'application agricole' 14/02/2011.

[21] : Z_Abdelghani, H_houssame « Stockage hybride de l'énergie électrique avec batterie et super-condensateur pour un véhicule électrique/PAC » université Abderrahmane Mira Bejaia, 2022.