



République **A**lgérienne **D**émocratique et **P**opulaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Abderrahmane MIRA- BEJAIA

Faculté De Technologie

Département de Génie Electrique

Filière : Electrotechnique

Mémoire De Fin D'étude

En vue de l'obtention du diplôme de master en Energies renouvelables

Option : Energies renouvelables en électrotechnique

Thème

Étude d'un véhicule électrique

Réalisé par :

RAHMANI Célia

TABTA Lyliya

Encadré par :

Mme REKIOUA Djamila

Member du jury:

Mr. A. HAMMAS

Mr. R. ALKAMA

Promotion 2019/2020

Remerciement

En préambule à ce projet de fin d'étude nous remerciant ALLAH qui nous aide et nous donne la patience et le courage durant ces longues années d'étude.

Nous souhaitons adresser nos remerciements les plus sincères aux personnes qui nous ont apporté leur aide et qui ont contribué à l'élaboration de ce mémoire ainsi qu'à la réussite de cette exceptionnelle année universitaire.

Ces remerciements vont tout d'abord au corps professoral et administratif de la faculté de technologie département de génie électrique, pour la richesse et la qualité de leur enseignement et qui déploient de grands efforts pour assurer à leurs étudiants une formation actualisée.

Nous tenons à remercier sincèrement notre encadreur Madame REKIOUA Djamila, qui s'est toujours montrée à l'écoute et très disponible tout au long de la réalisation de ce projet, ainsi pour l'inspiration, l'aide et le temps qu'elle a bien voulu nous consacrer et sans qui ce projet n'aurait jamais vu le jour.

Nous tenons à remercier Mr MEBARKI. N et Madame MOKRANI.Z pour l'aide qu'ils nous ont apportée.

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

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail

A mes très chers parents qui ont toujours été là pour moi.

A mon frère Brahim que j'aime beaucoup

A mes chères sœurs Thiziri, Célia, Siham et Hania

A mes petits anges Leticia et Aya et Syrine.

A la mémoire de ma grand-mère Fatima, mon oncle Abderezzak et ma tante Zahia que je n'oublierai jamais. Dieu leurs pardonne et les accueille dans son vaste paradis.

A mes amies Dyhia, Kenza et Samia

A ma binôme Celia et sa famille

A tous ceux qui ont participé à la réalisation de ce travail.

Lylia

Dédicace

Avec une pensée profonde que je dédie ce travail :

*A mes très chers parents qui m'ont vivement soutenu et encouragé tout au long
de Mes études*

A mes très précieux grands-parents, mes tantes et toute ma famille

A mes chers frères et sœur Yakoub, Taher et Darine

A la mémoire de mon grand-père et mon oncle que j'aime

A toute ma promo

A mes amis Walid et Ouali et mes copines Meriem, Sabrina et Lydia

A ma binôme Lylia et sa famille.

Celia

TABLE DE MATIERE

Introduction générale	1
Chapitre I : Etat de l'art des véhicules électriques et leurs systèmes de stockage	
I.1 Introduction.....	3
I.2 Types des véhicules à motorisation électrique	3
I.2.1 Véhicule tout électrique.....	3
I.2.1.1 Définition	3
I.2.1.2 Fonctionnement d'un véhicule tout électrique	3
I.2.1.3 Avantages et inconvénients de la voiture électrique.....	4
I.2.2 La voiture à pile hydrogène	4
I.2.2.1 Définition et principe de fonctionnement	4
I.2.2.2 Avantages et inconvénients d'une voiture d'hydrogène	5
I.2.3 Véhicule hybride	5
I.2.3.1 Définition et fonctionnement.....	5
I.2.3.2 Avantages et inconvénients d'un véhicule hybride	6
I.3 Etat de l'art des systèmes de stockages utilisés dans la traction électrique	7
I.3.1 Les batteries	7
I.3.1.1 Définition et principe de fonctionnement	7
I.3.1.2 Paramètres principaux de la batterie	8
I.3.1.3 Technologies de batteries utilisées pour la traction des véhicules électrique hybrides	9
I.3.1.4 Les conditions exigées pour l'intégration d'une batterie à un véhicule électrique.....	11
I.3.2 La pile à combustible	12
I.3.2.1 Définition et principe de fonctionnement	12
I.3.2.2 Les différents types des piles à combustible	12
I.3.2.3 Pile à combustible à membrane polymère (type PEM).....	14

I.3.2.3.1 Principe de fonctionnement	14
I.3.2.3.2 La PEM dans la traction de véhicule hybride	14
I.4 Hybridation des sources de stockage de l'énergie.....	15
I.4.1 Stockage de l'énergie	15
I.4.2 Principe de l'hybridation des sources de stockage d'énergie	18
I.4.3 Différentes associations des sources de stockage d'énergie	19
I.4.3.1 Association Batterie/supercondensateur	19
I.4.3.2 Hybridation supercondensateur/pile à combustible	20
I.4.3.3 Hybridation d'une batterie et une pile à combustible.....	21
I.4.3.4 Hybridation batterie/PAC/supercondensateur	22
I.5 Conclusion	22
Chapitre II : Modélisation des composants d'un véhicule électrique	
II.1. Introduction	23
II.2 Modélisation du groupe motopropulseur	23
II.3 Modélisation de la machine synchrone à aimants permanent commander par un onduleur MLI	24
II.3.1. Modélisation de la machine synchrone à aimant permanent	24
II.3.1.2 Hypothèses simplificatrices	25
II.3.2 Modélisation de la transformée de Park et Concordia	27
II.3.2.1 Transformée de Concordia [T32].....	27
II.3.2.2 Transformée de Park.....	28
II.3.3 Modèle d'état.....	30
II.3.4 Modélisation de l'onduleur de tension	30
II.3.5 Résultats de la simulation du MSAP commandé par un onduleur MLI.....	32
II.4 Dimensionnement du système de stockage	35
II.4.1 Dimensionnement du stack pile à combustible	35
II.4.1.1 Détermination du nombre de cellules	35
II.4.1.2 Détermination de la surface des cellules	36

II.4.2	Détermination de la taille des batteries	36
II.5	Modélisation des composantes du système de stockage.....	37
II.5.1	La modélisation de la pile à combustible de type PEMFC	37
II.5.1.1	Polarisation d'activation :	38
II.5.1.2	Polarisation ohmique	39
II.5.1.3	Polarisation de concentration :.....	40
II.5.1.4	Les résultats de la simulation du modèle de la PEMFC réalisé sous Matlab Simulink.....	41
II.5.2.1	Modèle de la capacité.....	42
II.5.2.2	L'état de charge EDC	43
II.5.2.3	Equations de la tension de décharge	43
II.5.2.4	Equations de la tension de charge	43
II.5.2.5	Les résultats de la simulation de modèle de la batterie réalisé sous Matlab Simulink.....	44
II.6	Modélisation du véhicule électrique.....	46
II.7	Conclusion.....	47
Chapitre III : Gestion des puissances d'un véhicule électrique hybride		
III.1	Introduction.....	48
III.2	Profil de vitesse.....	48
III.2.1	Simulation du système d'un véhicule électrique pour un profil de vitesse	49
III.2.2	Résultats de simulation	50
III.3	Alimentation d'un véhicule électrique avec un système de stockage (batterie)	50
III.3.1	Simulation d'un véhicule électrique alimenté par batterie	51
III.4	Alimentation du VE par une Source d'Energie Hybride (SEH)	53
III.5	Présentation de la méthode de la gestion d'un véhicule électrique à système de stockage hybride (batterie/PAC).....	54
III.5.1	L'organigramme de gestion d'énergie du véhicule électrique à système de stockage hybride (PAC/batteries).....	56

III.5.2 Simulation générale appliqué au système de gestion globale du VEH.....	57
III.5.3 Résultats de simulation	58
III.6 Conclusion	61
Conclusion générale.....	62

SSE Système de stockage d'énergie

PAC Pile à Combustible

VEH Véhicule électrique hybride

VE Véhicule électrique

EDC L'état de charge

Ni-MH Nickel-Métal Hydrure

PEMFC Proton Exchange Membranes Fuel Cell

DMFC Direct Methanol Fuel Cell

PAFC Phosphorique Acid Fuel Cell

AFC Alkaline Fuel Cell

SOFC Solid Oxyde Fuel Cell

MCF Molten Carbonate Fuel Cell

CC Courant continu

CA Courant alternatif

SC Supercondensateur

MSAP Moteur synchrone à aimant permanent

IGBT Insulated Gate Bipolar Transistor (transistor bipolaire à grille isolée)

MLI Modulation de largeur d'impulsions

CO_2	Dioxyde de carbone
V_{Bat}	Tension délivrée par la batterie (V)
I_{Bat}	Intensité de courant débité par la batterie (A)
P_{Bat}	La puissance de la batterie (W)
H_2	Dihydrogène
O_2	Dioxygène
R_S	Résistance du stator (Ω)
L_2	Inductance de fuite (H)
$\frac{R_1}{g}$	Résistance fictive représente la puissance transmise (Ω)
R_2	Résistance du rotor ramené au stator (Ω)
L_d	Inductance directe (H)
L_q	Inductance quadratique (H)
θ	Position angulaire du rotor (rad)
a, b, c	Axes liés aux enroulements triphasés
V_{abc}	Tension statorique triphasé (V)
i_{abc}	Courants statoriques triphasé (A)
Φ_{abc}	Flux magnétique au stator (Wb)
L_S	Inductance Statorique (H)
L_{SS}	Inductance propre (H)
M_S	Inductance mutuelle entre les enroulements (H)
Φ_f	Flux d'excitation
ω_m	La vitesse de rotation du rotor (rad/s)
e_{abc}	FMM produites dans les phases statoriques (A)
α, β	Axes de référence statoriques de Concordia

$V_{\alpha,\beta}$	Tensions statoriques diphasés dans le repère α, β (V)
$I_{\alpha,\beta}$	Courants statoriques diphasés dans le repère α, β (A)
C_{em}	Couple électromagnétique (N.m)
$V_{d,q}$	Tensions statoriques diphasées dans le repère tournant d, q (V)
$i_{d,q}$	Courants statoriques diphasées dans le repère tournant d, q (A)
$\Phi_{d,q}$	Flux statoriques diphasés dans le repère tournant d, q (Wb)
Ω	Vitesse de rotation mécanique de la MSAP (tr/min)
J	Moment d'inertie total de la machine (kg.m ²)
f	Coefficient de frottement visqueux
C_r	Couple résistant appliqué sur l'arbre de la machine (N.m)
Ω_s	Vitesse de synchronisme (rad/s)
v_{an}, v_{bn}, v_{cn}	Tensions simples à la sortie de l'onduleur (V)
S_a, S_b, S_c	Variables logiques correspondantes à l'état des interrupteurs de l'onduleur
V_{dc}	Tension discontinu à l'entrée de l'onduleur (V)
P_{dem}	Puissance demandée par le moteur synchrone à aimant permanent (W)
P_{PAC}	Puissance électrique brute du stack (W)
N_{PAC}	Nombre de cellules de l'empilement
S_{PAC}	Surface active des cellules (m ²).
E_{pac}	La tension d'une cellule PAC (V)
V_{act}	La polarisation d'activation. (V)
V_{ohm}	La polarisation ohmique. (V)
V_{conc}	La polarisation de concentration. (V)
E_{Nernst}	Le potentiel de Nernst (V)

T	La température opératoire absolue de la pile. (°K)
$P_{O_2}^*$	La pression partielle à l'interface de l'hydrogène. (atm)
$P_{H_2}^*$	La pression partielle à l'interface de l'oxygène. (atm)
I_{PAC}	Le courant de fonctionnement de la pile en ampère (A).
P_{cat}	La pression de l'oxygène à la cathode. (atm)
P_{anode}	La pression de l'hydrogène à l'anode. (atm)
$X_{H_2O}^{Sat}$	La fraction molaire de saturation de l'eau dans le gaz humidifié (SI)
R_M	La résistance équivalente de contact à la conduction des électrons. (Ω)
R_C	La résistance équivalente de la membrane à la conduction des protons. (Ω)
L	L'épaisseur de la membrane (μm).
A	La surface active de la pile (cm^2).
rM	La résistance spécifique de la membrane ($\Omega\cdot\text{m}$)
B	Constant empirique qui dépend du type de la pile et de son état de fonctionnement.
J	Densité de courant de fonctionnement permanente (A/cm^2).
J_{max}	La densité de courant maximale exprimé en (A/cm^2).
E_{bat}	La force électromotrice de la batterie (V)
R_{bat}	La résistance interne de la batterie (Ω)
I_{10}	Courant nominal de la batterie (A)
C_{10}	Capacité nominale de la batterie en régime de décharge à courant constant durant 10 heures. (Ah)
ΔT	L'échauffement de la batterie par rapport à la température ambiante (°K)
C_{bat}	Capacité de la batterie (Ah)
Q_d	La quantité de charge manquante à la batterie (Ah)
m	La masse totale du véhicule en (kg)

- g** La gravité en (m/s^2)
- f_{ro}** La constante de la force de résistance due au déplacement
- β** L'angle de pente de la route en (rad)
- ρ_{air}** La densité de l'air en (kg/m^3)
- A_f** La surface frontale du véhicule (m^2)
- V_e** La vitesse du véhicule en (m/s)
- C_d** Le coefficient de la traînée aérodynamique

Chapitre I : Etat de l'art des véhicules électriques et leurs systèmes de stockage

Figure I.1 Constitution d'un véhicule électrique.....	3
Figure I.2 Architecture d'une voiture d'hydrogène	5
Figure I.3 Architecture d'une voiture hybride	6
Figure I.4 Pack de batterie pour véhicule électrique.....	7
Figure I.5 Composantes d'une batterie au plomb.....	9
Figure I.6 Courbes montrant l'évolution de l'énergie spécifique des batteries.....	10
Figure I.7 Batterie Li-ion en section oblongue.....	11
Figure I.8 Schéma de principe de la pile à combustible.....	12
Figure I.9 Schéma de principe de la pile à combustible PEM.....	14
Figure I.10 Plan de Ragone	16
Figure I.11 comparaison des différents SSE électriques	17
Figure I.12 Conception d'hybridation et régimes de fonctionnement	19
Figure I.13 Association d'une batterie/supercondensateur	20
Figure I.14 Hybridation d'un supercondensateur et une PAC	21
Figure I.15 Association d'une pile à combustible et une batterie	21

Chapitre II : Modélisation des composants d'un véhicule électrique

Figure II.1 Le schéma physique de la voiture électrique hybride étudié	23
Figure II. 2 Représentation du moteur synchrone à aimant permanent	24
Figure II. 3 Représentation de MSAP dans le repère électrique (a, b, c).....	25
Figure II.4 Rotors des machines synchrones à aimant permanents	25
Figure II.5 Représentation des différents repères	27
Figure II.6 Modèle de Park de la MSAP.....	28
Figure II.7 Schéma de l'onduleur de tension	31
Figure II. 8 Schéma bloc d'une machine synchrone à aimant permanent commandé par un onduleur MLI.....	32
Figure II.9 Couple de charge appliqué sur la MSAP	33
Figure II.10 Allure des courants statorique d'une MSAP	33
Figure II.11 Courbe de variation de vitesse de rotation de MSAP en fonction du temps	34
Figure II.12 Courbe de variation du couple électromagnétique de MSAP en fonction du temps	34
Figure II.13 Puissance électromagnétique délivré par le moteur	35
Figure II.14 Schéma équivalent de la pile PEMFC	38
Figure II.15 Modèle de la PEMFC réalisé sous MATLAB Simulink	40
Figure II.16 Evolution de la tension de la pile en fonction de son courant.....	41

Figure II.17 Evolution de la puissance de la pile en fonction de son courant	41
Figure II.18 Schéma équivalent du modèle CIEMAT	42
Figure II.19 Modèle de la batterie réalisé sous MATLAB Simulink	44
Figure II.20 l'état de charge de la batterie en fonction de temps	44
Figure II.21 Influence de la température sur la capacité de la batterie	45
Figure II.22 influence de la température sur la tension de la batterie.....	45
Figure II.23 Représentation des forces agissant sur le véhicule.....	46

Chapitre III : Gestion des puissances d'un véhicule électrique hybride

Figure III.1 Le nouveau profil de vitesse européen.....	48
Figure III.2 Profil de vitesse appliqué	49
Figure III.3 Le système global de VE.....	49
Figure III.4 La puissance du VE	50
Figure III.5 Le couple de la VE	50
Figure III.6 Véhicule électrique à batteries.....	51
Figure III.7 Système globale d'un VE alimenté avec batterie.....	51
Figure III.8 Allure de la tension des batteries	52
Figure III.9 La variation de la tension des batterie.....	52
Figure III.10: L'état de charge de la batterie.	53
Figure III.11 La puissance délivrée par les batteries.	53
Figure III.12 Schéma électrique global du VE à système de stockage hybride [26]	54
Figure III.13 Organigramme de gestion des puissance dans un véhicule électrique hybride	57
Figure III.14 Système globale du Véhicule électrique hybride.....	58
Figure III.15 Allure du couple de charge et couple électromagnétique.....	58
Figure III.16 Allure des puissances.....	59
Figure III.17 L'allure de l'état de charge des batteries	60
Figure III.18 Tension de la batterie	60
Figure III.19 Tension des batteries zoomée	61

Chapitre I : Etat de l'art des véhicules électriques et leurs systèmes de stockage**Tableau I.1** Tableau comparatif des différentes piles à combustibles.13**Tableau I.2** Répartition des 5 niveaux suivant les critères de comparaison17**Chapitre III : Gestion des puissances d'un véhicule électrique hybride****Tableau III.1** Les différents cas du mode de traction d'un VE55**Tableau III.2** Les cas du mode de freinage d'un VE55**Tableau III.3** Les cas du mode arrêt d'un VE55**Tableau III.4** Différent mode de fonctionnement d'un VE à SSH.....56

Introduction générale

Les véhicules automobiles conventionnels utilisant un moteur à essence ou diesel se trouvent dans une situation critique due à leur forte dépendance vis-à-vis du pétrole, leur contribution à l'accroissement de l'effet de serre et à l'augmentation de la pollution atmosphérique.

Le transport routier du futur devra donc à la fois concilier diversification énergétique, maîtrise des émissions de CO₂ et maîtrise des émissions polluantes. Différentes solutions alternatives visent à répondre à ce challenge : amélioration des véhicules « tout thermique », utilisation de biocarburants, développement de Véhicules Electriques (VEs) et de Véhicules Electrique Hybrides (VEHs), etc.

Les solutions VE et VEH nécessitent de stocker à bord du véhicule de l'énergie électrique. Pour les véhicules existants sur le marché automobile, le stockage se fait principalement par batteries et pose un certain nombre de problèmes : autonomie, durée de vie, durée de recharge... Le stockage de l'énergie électrique peut également se faire au moyen de supercondensateurs, d'inductances supraconductrices, de systèmes à Pile A Combustible (PAC), à volant d'inertie ou à air comprimé. Cependant aucun de ces systèmes de stockage d'énergie (SSE) n'excellent à la fois sur les critères d'énergie, de puissance massique, de durée de vie, de recyclabilité, de sécurité et de cout, critères déterminants pour une application véhicule viable

Un moyen pour répondre à ces problématiques consisterait à associer deux à trois SSE électriques, choisis de façon à présenter des caractéristiques complémentaires. On appellera cette association un système de stockage d'énergie (SSE) mixte ; elle permettrait de pallier les lacunes de chaque SSE électrique pris séparément et d'allier leurs avantages respectifs pour obtenir un bon compromis sur l'ensemble des critères considérés. Différentes associations sont envisageables pour obtenir un SSE électrique mixte présentant les meilleurs atouts pour une application véhicule.

Notre travail consiste à étudier un véhicule électrique avec batteries et un véhicule électrique a système de stockage hybride (pile à combustible/batteries) et faire une comparaison entre les deux.

Les travaux présentés dans ce manuscrit s'articulent autour de quatre chapitres.

Introduction Générale

On introduit notre travail par un chapitre qui définit la traction à motorisation électrique, et les systèmes de stockages utilisés dans ce domaine, ainsi que leurs hybridations.

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 batterie), la machine synchrone et les éléments d'électronique de puissance accompagné par une simulation sous Matlab-Simulink

Le troisième chapitre sera consacré pour effectuer une étude de véhicule électrique hybride, dont on va réaliser un système des gestions des puissances des sources de stockage électrique afin de pouvoir répondre à la puissance demandée par la charge (moteur)

On finira notre travail par une conclusion générale et des perspectives.

I.1 Introduction

L'objectif de ce premier chapitre est de présenter l'état de l'art des véhicules à motorisation électrique en générale (tout électrique, hydrogène et hybride), les systèmes de stockage utilisés dans la traction électrique (batteries, pile à combustible, supercondensateur) et le principe de l'hybridation des différentes sources de stockages de l'énergie électrique en citant les associations possibles de ces sources.

I.2 Types des véhicules à motorisation électrique

I.2.1 Véhicule tout électrique

I.2.1.1 Définition

L'expression "tout électrique" ou "en mode tout électrique", que l'on peut trouver à de nombreuses reprises dans les discours des médias ou les articles de presse, désigne un véhicule qui roule sans utiliser de moteur thermique. Le résultat ? Une consommation de carburant et un taux d'émission de CO₂ totalement nuls. [1]

I.2.1.2 Fonctionnement d'un véhicule tout électrique

Le véhicule électrique comporte une batterie pour stocker l'énergie, un moteur à courant continu avec un système de contrôle et un chargeur de batteries (voir la figure I.1). Ainsi, le ou les moteurs électriques de traction sont reliés aux roues motrices. L'ordinateur contrôle, gère et régule la puissance. Une fiche de raccordement au réseau électrique permet le chargement des batteries via une prise traditionnelle. [2]

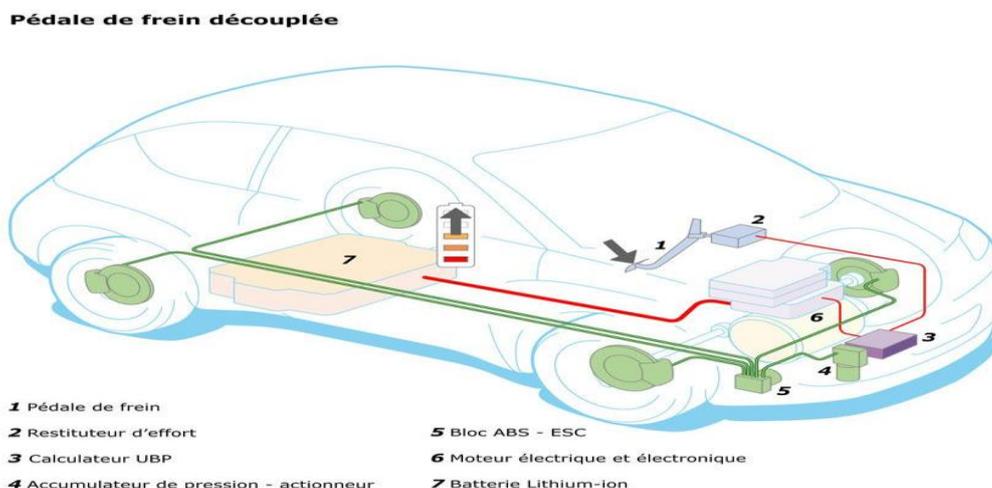


Figure I.1 Constitution d'un véhicule électrique

I.2.1.3 Avantages et inconvénients de la voiture électrique [3]

a) Avantages

- ✓ Pas de polluants de l'air et pas d'émission de CO₂ à l'utilisation
- ✓ La réduction de l'utilisation des combustibles fossiles pour le transport
- ✓ Economique à l'utilisation
- ✓ Peu d'entretien

b) Inconvénient

- ✓ L'impact de ses batteries (son utilisation accroît la pression sur le métal Lithium rare)
- ✓ La capacité des batteries diminue au court du temps
- ✓ Le temps de recharge et la disponibilité des bornes
- ✓ Le coût élevé des voitures et cherté des batteries

I.2.2 La voiture à pile hydrogène

I.2.2.1 Définition et principe de fonctionnement

Une voiture à pile hydrogène est d'abord une voiture électrique, mais qui reçoit principalement son énergie d'une pile à combustible (figure I.2). Une batterie est cependant bien présentée sur la chaîne de traction, mais de moindre importance. Cette architecture technologique s'active selon 4 scénarios, dont le principal est d'utiliser l'hydrogène des réservoirs pour faire avancer le véhicule, via la pile à combustible et ses dispositifs associés.

Si la batterie n'est pas à sa pleine capacité, et que l'utilisation de l'engin le permet, la PAC va permettre de la recharger en même temps. Lors d'un fort appel de puissance, à l'accélération, la pile à combustible et la batterie vont alimenter de concert la motorisation électrique. Enfin, comme dans la très grande majorité des véhicules électriques, l'énergie cinétique des phases de décélération et de freinage va être transformée en électricité pour régénérer le pack batterie. [4]

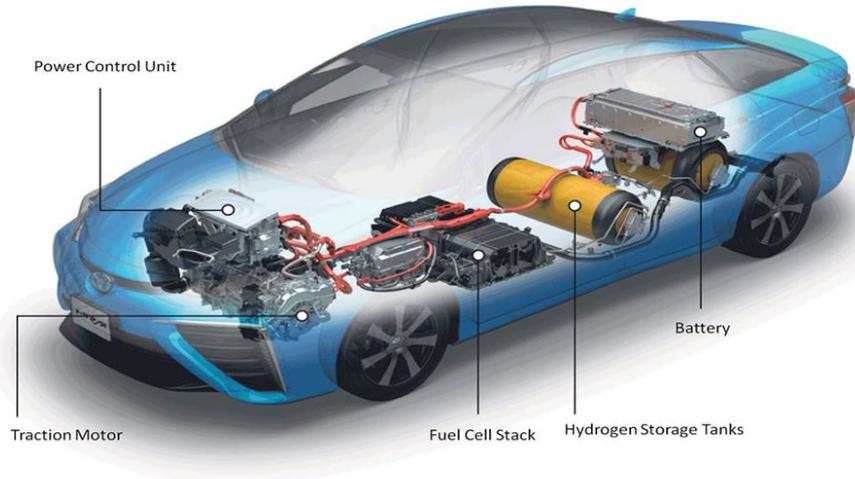


Figure I.2 Architecture d'une voiture d'hydrogène

I.2.2.2 Avantages et inconvénients d'une voiture d'hydrogène [5]

a) Avantages

- ✓ Silencieuse
- ✓ N'émette que de la vapeur d'eau
- ✓ La pile à combustible fournit de l'électricité pour charger la batterie
- ✓ L'avantage de ne pas devoir recharger la voiture

b) Inconvénients

- ✓ Le réservoir d'hydrogène qui prend une place et le poids de la pile
- ✓ La sécurité pour le remplissage
- ✓ L'énergie nécessaire à l'extraction de l'hydrogène
- ✓ L'Hydrogène (H_2) n'est pas facile à stocker ni à transporter

I.2.3 Véhicule hybride

I.2.3.1 Définition et fonctionnement

L'hybridation consiste à combiner deux énergies pour assurer la propulsion d'un véhicule. On appelle donc hybride tout véhicule qui, en plus de sa source d'énergie primaire, dispose d'un stockage réversible d'énergie sous une seconde forme (hydraulique avec réserve de pression, cinétique avec volant d'inertie, électrique...). Dans la pratique, il s'agit essentiellement d'une association de l'électrique et du thermique, mais cette solution est aussi utilisée pour les voitures à hydrogène qui sont également des hybrides électrique-hydrogène.

L'objectif est de cumuler les avantages des deux modes de motorisation. Sur les véhicules hybrides actuels, la source principale d'énergie est le moteur thermique. L'adjonction d'un moteur électrique et d'une puissante batterie permet d'optimiser le fonctionnement du moteur thermique ou de le remplacer momentanément et donc de réduire la consommation et les émissions. Toute la difficulté est de réussir un fonctionnement bi-mode harmonieux et pour un coût limité car il ne s'agit pas de la juxtaposition de deux chaînes de tractions fonctionnant en alternance mais de deux chaînes fonctionnant de concert. [6]

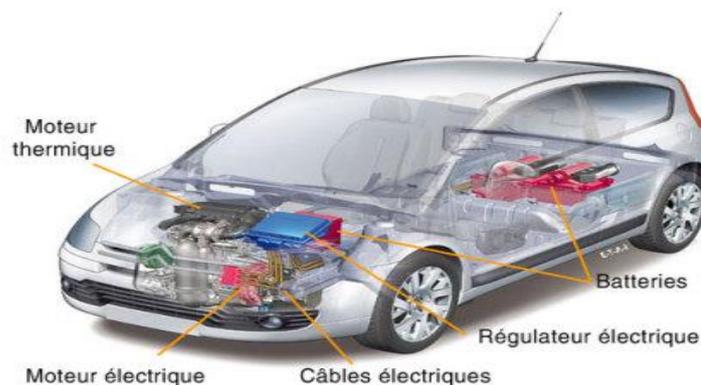


Figure I.3 Architecture d'une voiture hybride

Cette voiture possède deux moteurs reliés à ses roues :

- Le moteur électrique. Il fonctionne quand la voiture roule à vitesse réduite, surtout en ville.
- Le moteur thermique. Il fonctionne sur route et autoroute.
- Les deux moteurs fonctionnent ensemble pour effectuer une accélération importante.

Le moteur thermique fait tourner un générateur d'électricité qui recharge la batterie.

I.2.3.2 Avantages et inconvénients d'un véhicule hybride [7]

a) Avantages

- ✓ Faible émission de CO₂ et consommation du carburant limitée
- ✓ Puissance de moteur plus importante et grande souplesse au démarrage
- ✓ Consommation réduite
- ✓ Réduction des bruits de fonctionnement

b) Inconvénients

- ✓ Cout à l'achat plus élevé
- ✓ Poids supérieur
- ✓ Accidents avec piétons plus fréquent en mode électrique (pas de bruit)

I.3 Etat de l'art des systèmes de stockages utilisés dans la traction électrique

I.3.1 Les batteries

I.3.1.1 Définition et principe de fonctionnement

L'accumulateur est un générateur électrochimique secondaire rechargeable réversible, ou la transformation de l'énergie électrochimique en énergie électrique s'appelle la charge tandis que la transformation inverse s'appelle la décharge.

L'accumulateur est constitué d'un couple électrochimique qui se compose de deux électrodes séparées par un électrolyte et aux interfaces desquelles déroulent des réactions d'oxydation ou de réduction qui cèdent ou absorbent des électrons. Les ions générés circulent dans l'électrolyte afin d'avoir une grande énergie stockée. [10]

L'assemblage de plusieurs cellule d'accumulateurs forme un pack batterie (figure I.4) dont les caractéristiques sont définies par le constructeur d'une façon que ce pack répond aux exigences désiré par le consommateur, ces cellules peuvent être connectés en série ou en parallèle selon suivant les niveaux de tension et de courant souhaité.

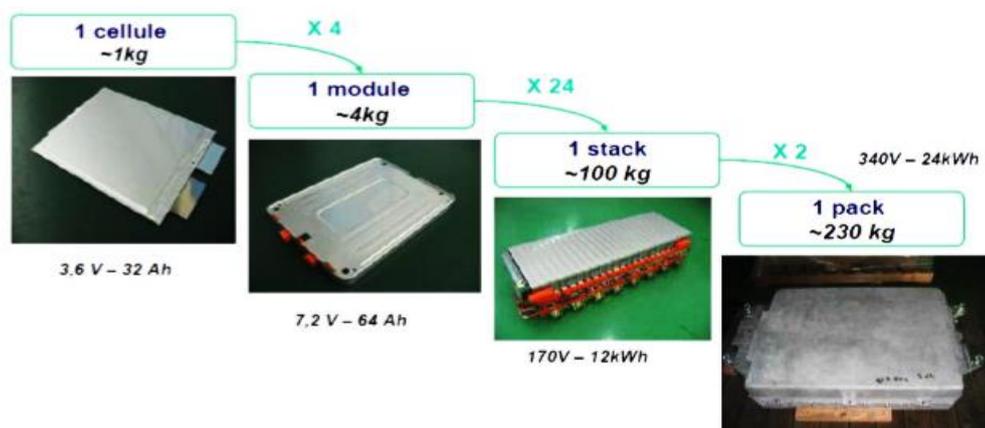


Figure I.4 Pack de batterie pour véhicule électrique

Généralement toute batterie comporte les éléments suivants :

- Un pôle négatif nommé **une anode**.
- Un pôle positif nommé **cathode**.
- Un élément qui sépare ces deux pôles et assure le passage du courant entre l'anode et la cathode, appelé **électrolyte**. [11]

Le principe de fonctionnement de la batterie est basé sur une double réaction chimique ou interviennent des réactions d'oxydation et de réduction qui cèdent ou absorbent des électrons, et cela nécessite l'utilisation des couples de métaux capable d'échanger les électrons.

Les réactions chimiques dans ces dispositifs sont sensibles à la température, il existe des certaines batteries qui ne fonctionnent pas dans des températures basses ($< 0^{\circ}\text{C}$) et d'autres requièrent des hautes températures qui peuvent atteindre (300°C). [10]

I.3.1.2 Paramètres principaux de la batterie [11]

Chaque batterie se caractérise par des paramètres spécifiques qui sont : la puissance utilisable, l'énergie stockée et l'état de charge.

❖ Puissance utilisable [kW]

La puissance utilisable est le produit de la tension délivrée par la batterie (V_{bat}) et l'intensité maximale qu'elle peut débiter (I_{bat})

$$P_{\text{Bat}} = V_{\text{Bat}} \times I_{\text{Bat}} \quad (1.1)$$

Pour alimenter un moteur par une batterie la puissance utilisable de la batterie doit être au moins égale à celle de point de fonctionnement du moteur électrique.

❖ Energie stockée [kWh]

Cette énergie stockée est assimilable au volume du carburant d'un véhicule thermique c'est cette énergie qui définit l'autonomie de véhicule électrique.

L'énergie de la batterie est souvent exprimée en fonction de sa capacité son unité est l'ampère heure (Ah).

❖ L'état de charge (EDC)

Ce paramètre indique l'état de charge de la batterie, il est généralement exprimé en pourcentage, lorsque la batterie est complètement chargée son état de charge est 100%, et lorsqu'elle est profondément déchargée son EDC est 0%.

I.3.1.3 Technologies de batteries utilisées pour la traction des véhicules électrique hybrides

Afin d'assurer l'électrification des véhicules hybrides on utilise des batteries de traction, les performances de véhicule dépendent directement de ces dispositifs et de leurs caractéristiques.

Avec l'évolution que les véhicules électriques ont connue, plusieurs technologies de batteries ont apparue, les technologies les plus employées dans l'électrification des véhicules électrique hybrides sont : les batteries au plomb, les batteries nickel métal hydrure et les batteries lithium ion. [11] [12]

➤ Les batteries au plomb

La batterie au plomb (figure I.5) est généralement utilisée comme batterie de démarrage dans des véhicules particuliers, elles se caractérisent par leurs sensibilités à la recharge et ne supporte pas les décharges profondes, ces batteries son moins coûteuse avec des caractéristiques plus au moins équivalente aux autres technologies de batteries.

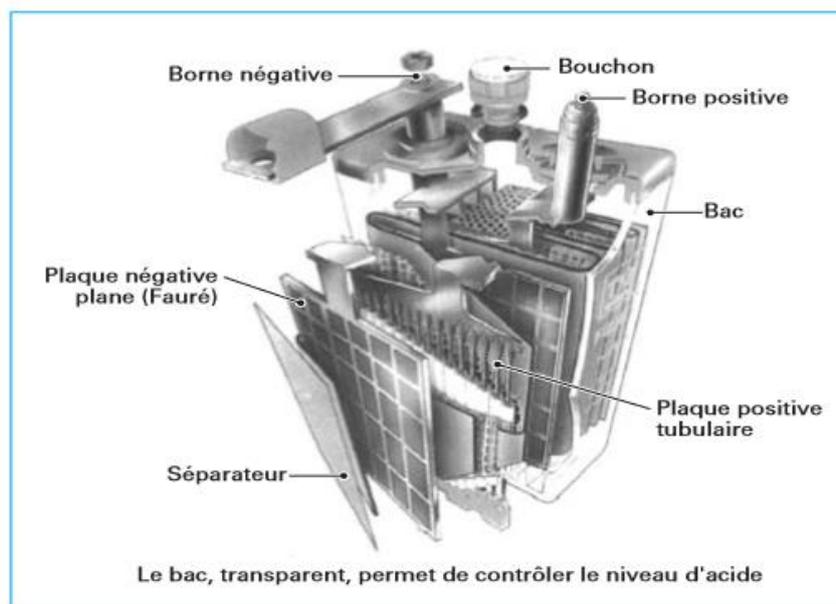


Figure I.5 Composantes d'une batterie au plomb

Les batteries au plomb ont connu une évolution importante sous forme de pack qui résiste à la profondeur de décharge, il a pris le nom VERLA [Valve Regulated Lead Acid], la VERLA a rendu l'utilisation de la technologie plomb dans les véhicules électriques à faible degré d'hybridation possible, et elle a été employée dans le type micro-hybrid comme le système Valeo iStARS. [11] [12]

Pour le type de véhicules qui requièrent une énergie embarquée importante les accumulateurs au plomb présentent un inconvénient comme l'indique la figure ci-dessous (figure I.6) :

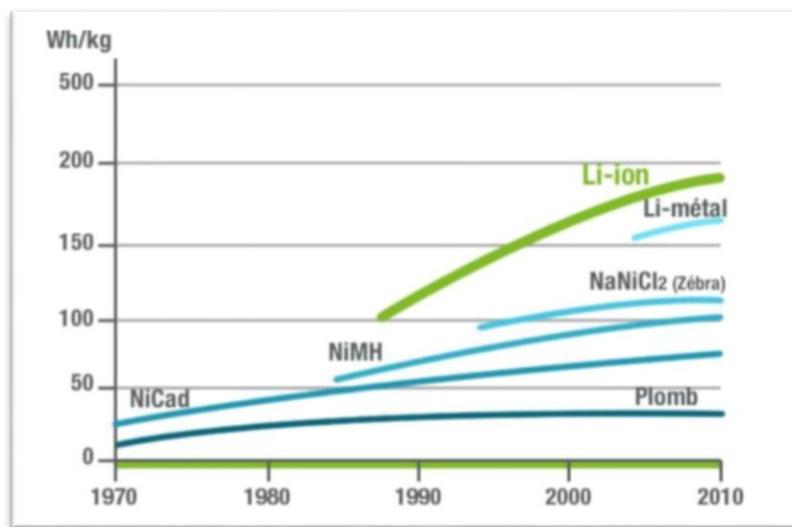


Figure I.6 Courbes montrant l'évolution de l'énergie spécifique des batteries

➤ Les batteries nickel métal hydrure

Les batteries Ni-MH (Nickel-Métal Hydrure) ont été majoritairement utilisées jusqu'à présent dans les HEV (Toyota Prius, Honda Civic et Insight) et sont désormais éprouvées en termes de vieillissement et de sécurité. Cependant leur faible énergie spécifique ne convient pas à un usage dans les véhicules à forte hybridation (PHEV, EREV). [12]

➤ Les batteries lithium-ion

Ce type de batterie (figure I.7) se caractérise par son énergie massique et sa densité d'énergie élevée par rapport aux autres types de batteries et elle détient une tension par élément très importante (3.6 V/élément), sa forte énergie spécifique est très adéquate pour les véhicules rechargeables. La réalisation des accumulateurs Li-ion se fait généralement sous deux formes : soit par l'utilisation de lithium sous forme ionique venant s'insérer dans l'un ou l'autre des

électrodes selon la phase (charge ou décharge), soit sous forme de LMP (lithium métal polymère) ou l'anode est constitué de lithium métallique et l'électrolyte étant un polymère.

Plusieurs technologies de batteries lithium-ion ont été utilisées pour l'électrification des véhicules rechargeables comme l'utilisation d'un pack Li-ion de (16kWh) dans la GM Chevrolet Volt. Malgré les performances intéressantes des accumulateurs Li-ion mais leurs coûts élevés et leurs vieillissement rapide présente un problème qui empêche leur utilisation massive [11] [12]

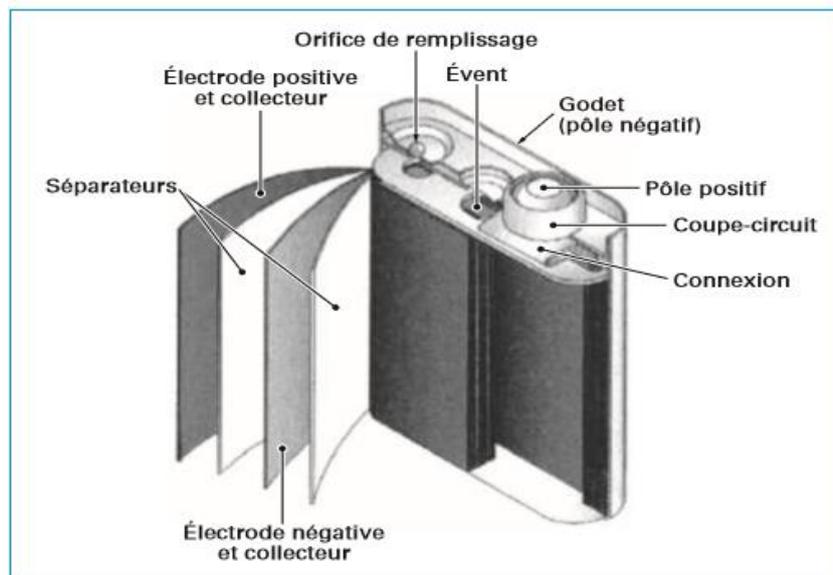


Figure I.7 Batterie Li-ion en section oblongue

I.3.1.4 Les conditions exigées pour l'intégration d'une batterie à un véhicule électrique

Les performances de VE dépend directement des batteries de traction utilisées, et avant d'intégrer une batterie au véhicule il faut vérifier les conditions suivantes [11] :

- Une bonne puissance massique [W/kg].
- Une bonne énergie massique [Wh/kg].
- Une tension stable qui engendra des performances régulières.
- Une bonne autonomie.
- Une durée de vie maximale.
- Moins d'entretien.
- Plus de disponibilités.

I.3.2 La pile à combustible

I.3.2.1 Définition et principe de fonctionnement [13]

La pile à combustible est connue depuis assez longtemps, cette dernière nécessite de l'hydrogène, consomme l'oxygène de l'air et rejette de l'eau, ce qui en fait une source d'énergie particulièrement propre.

Le principe de fonctionnement d'une pile à combustible est le principe inverse de l'électrolyse, comme un accumulateur la pile à combustible comporte deux électrodes : l'anode et la cathode où se déroulent des réactions d'oxydation et de réduction, ces deux électrodes sont séparées par un électrolyte. On alimente en hydrogène et oxygène et on constate l'apparition d'une tension électrique entre les deux électrodes: le dispositif est devenu un générateur électrique qui fonctionnera aussi longtemps qu'il sera alimenté. Pour cela elle est constituée de deux électrodes (anode et cathode) séparées par un électrolyte, matériau qui bloque le passage des électrons mais laisse circuler les ions (figure I.8). Selon le type de pile, les réactions chimiques intermédiaires qui interviennent diffèrent mais le principe demeure le même.

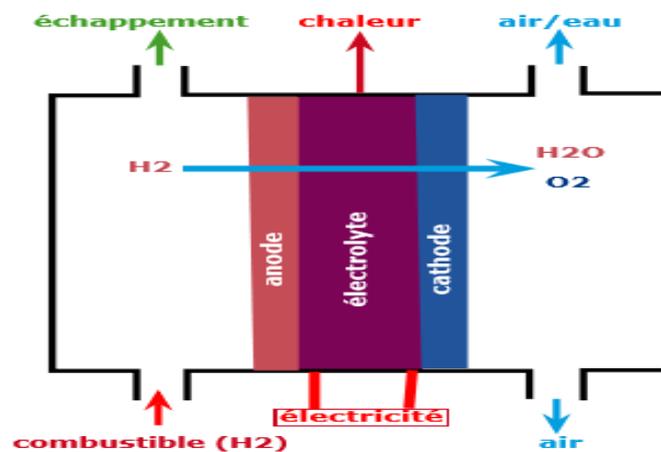


Figure I.8 Schéma de principe de la pile à combustible

I.3.2.2 Les différents types des piles à combustible [14]

Les piles à combustible sont classées en basant sur des critères différents telle que : la température de fonctionnement (haute de 600° à 1000° et basse de 60° à 250°), la nature de la membrane utilisée (liquide ou solide) et le type de combustible (hydrogène, méthanol, gaz naturel). De ceci ils ont fini par avoir six types différents des piles à combustible qui sont :

✓ **Les piles à basse température de fonctionnement**

- Les piles à combustible à membranes polymères échangeuse de protons (**PEMFC** Proton Exchange Membranes Fuel Cell).
- Les piles à combustible à méthanol directe (**DMFC** Direct Methanol Fuel Cell).
- Les piles à combustible à acide phosphorique (**PAFC** Phosphorique Acid Fuel Cell).
- Les piles à combustible alcaline (**AFC** Alkaline Fuel Cell).

✓ **Les piles à haute température de fonctionnement**

- Les piles à combustible a oxydes solides (**SOFC** Solid Oxyde Fuel Cell).
- Les piles à combustible a carbonates fondus (**MCFC** Molten Carbonate Fuel Cell).

La comparaison entre ces différents types est résumée dans le tableau suivant (tableau I.1).

Tableau I.1 Tableau comparatif des différentes piles à combustibles. [22]

Type de la pile.	PEMFC	DMFC	PAFC	AFC	MCFC	SOFC
Electrolyte	Membrane en polymère solide.	Membrane en polymère solide.	Acide phosphorique liquide H ₃ PO ₄ .	Potasse liquide KOH.	Sels fondus Li ₂ CO ₃ /Na ₂ CO.	Céramique.
Température de fonctionnement	60°-100°C	60°-100°C	160°-220°C	50°-250°C	600°-800°C	750°-1050°C
Combustible utilisé	Hydrogène	Méthanol	Hydrogène	Hydrogène, gaz naturel.	Hydrogène, gaz naturel.	Hydrogène, gaz naturel.
La puissance électrique	1W-700kW	1W-100Kw	10kW-10MW	1W-100Kw	500Kw-100MW	1MW-100MW, (1GW cogénération).
Rendement électrique	40-55%	30-45%	35-50%	45-60%	45-55%	45-70% (60-90% cogénération)
Applications	Immeuble, , véhicule, sous marins, spéciales	Immeuble, véhicule sous marins – spéciales.	Cogénération, transport.	Spatiale militaire	Cogénération production de l'électricité décentralisée	Cogénération production de l'électricité décentralisée

I.3.2.3 Pile à combustible à membrane polymère (type PEM)

I.3.2.3.1 Principe de fonctionnement [15]

La pile à combustible de type PEM permet la conversion de l'énergie chimique en énergie électrique, des réactions électrochimiques interviennent lors de cette transformation, l'énergie électrique est produite par une réaction d'oxydoréduction entre l'oxygène (oxydant) et l'hydrogène (réducteur). L'oxydation a lieu à l'anode et la réduction à la cathode. Ces deux réactions sont isolées par une membrane qui joue le rôle d'électrolyte. La cathode est alimentée en oxygène gazeux (ou plus généralement en air) et l'anode est alimentée en hydrogène gazeux. Les équations chimiques d'oxydoréductions (figure I.9) sont les suivantes :

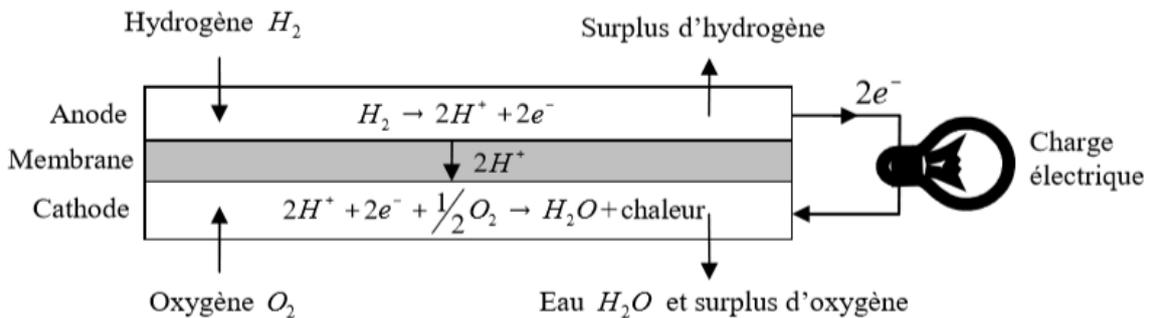
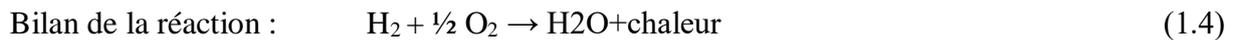
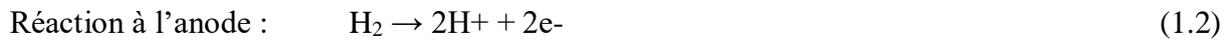


Figure I.9 Schéma de principe de la pile à combustible PEM

I.3.2.3.2 La PEM dans la traction de véhicule hybride [15]

Parmi tous les types des piles à combustible connu la pile à membrane échangeuse de protons reste la plus utilisée dans le domaine d'automobile, mais elle n'est pas été choisie aléatoirement plusieurs raisons expliquent ce choix :

✓ **Densité de puissance**

La propulsion d'un véhicule requiert une puissance de quelques kilowatts à une centaine de kilowatts. En outre, le groupe motopropulseur doit avoir une masse et un encombrement acceptable. La PAC de type PEM répond le mieux à ces contraintes avec une densité de puissance comprise entre 1 kg/kW et 3 kg/kW.

✓ Température de fonctionnement

La pile de type PEM a une température de fonctionnement comprise entre 50 °C et 80 °C, ce qui est adapté à un usage automobile.

✓ Structure solide

La pile à combustible PEM est composée d'éléments solides (spécialement la membrane en polymère). Cette structure solide garantit une certaine résistance mécanique vis à vis des contraintes liées à l'environnement automobile.

I.4 Hybridation des sources de stockage de l'énergie.

I.4.1 Stockage de l'énergie [9] [22]

Le stockage d'électricité apparaît comme le vrai défi des transports du futur aussi bien routiers que guidés. Pour stocker de l'énergie électrique, il faut d'abord la transformer en une forme d'énergie stockable puis appliquer la transformation inverse pour l'utiliser sous sa première forme électrique. Cette dernière peut être stockée sous plusieurs formes : électrochimique (batterie), électrostatique (supercondensateur), électromagnétique (inductance supraconductrice), mécanique (volant d'inertie ou air comprimé) ou gazeuse (H₂). Dans le cas du stockage sous une forme gazeuse (H₂) ça nécessite une insertion d'un dispositif de conversion, **une pile à combustible**, et le stockage sous une forme mécanique nécessite l'ajout d'un convertisseur mécanique/électrique **une machine électrique**

Les principales caractéristiques des systèmes de stockage sont :

La densité massique d'énergie : L'unité généralement utilisée dans ce domaine est le wattheure par kilogramme (Wh/kg). Plus la densité d'énergie est élevée, plus il y a d'énergie pouvant être stockée ou transportée pour un volume ou une masse donnée. Ceci est particulièrement important dans le domaine des transports (automobile, avion, fusée...).

La puissance massique : La puissance massique est le ratio d'une puissance (en W) par une masse (en kg). La puissance massique s'exprime donc dans le Système international d'unités en W/kg ; elle traduit la capacité d'un dispositif d'une masse donnée à développer une puissance. La puissance massique est principalement utilisée dans les domaines des transports et des appareils mobiles. En effet la vitesse d'un dispositif dépend de la puissance.

La durée de vie : exprimée en nombre maximal de cycles N (un cycle correspond à une charge et une décharge). La cyclabilité caractérise la durée de vie du dispositif de stockage, c'est-à-dire le nombre de fois où il peut restituer le même niveau d'énergie après chaque nouvelle recharge pour lequel il était dimensionné.

Le coût : un dispositif de stockage n'est intéressant que si la somme des gains qu'il procure est supérieure à la somme des coûts qu'il occasionne.

La recyclabilité : une caractéristique qui permet de définir le critère recyclable de la source considérée.

La sécurité : elle permet d'évaluer les risques associés à l'utilisation d'une source de stockage. Elle est obligatoire pour une application véhicule.

Le diagramme de Ragone (Figure I.10) est un graphique utilisé couramment pour comparer les performances des techniques de stockage d'énergie. Il s'agit d'un graphique à axes logarithmiques. La densité massique de puissance (en W/kg par exemple) est tracée en abscisse. La densité massique d'énergie (en J/kg par exemple) est tracée en ordonnée. Cependant ce dernier ne se concentre que sur ces deux critères alors que les autres critères sont tout aussi importants pour une application véhicule viable.

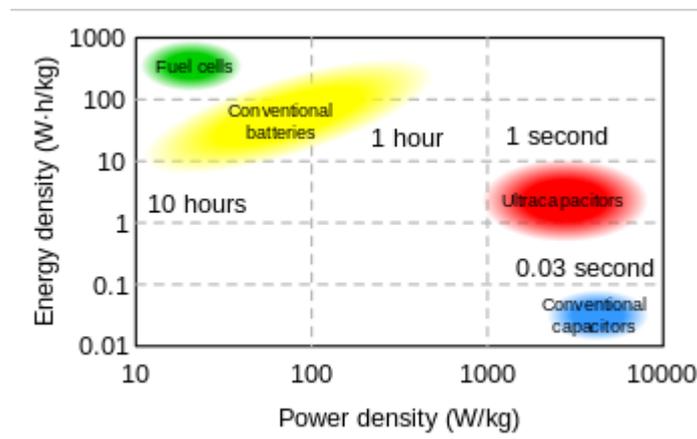


Figure I.10 Plan de Ragone

Une comparaison des différents moyens de stockage de l'énergie électrique sur 5 indices de performances est proposée, à l'aide d'un diagramme araignée suivant les 6 critères présentés précédemment. La répartition des indices de performances suivant les critères de comparaison est donnée dans le tableau I.2 et Figure I.11. [16] [17]

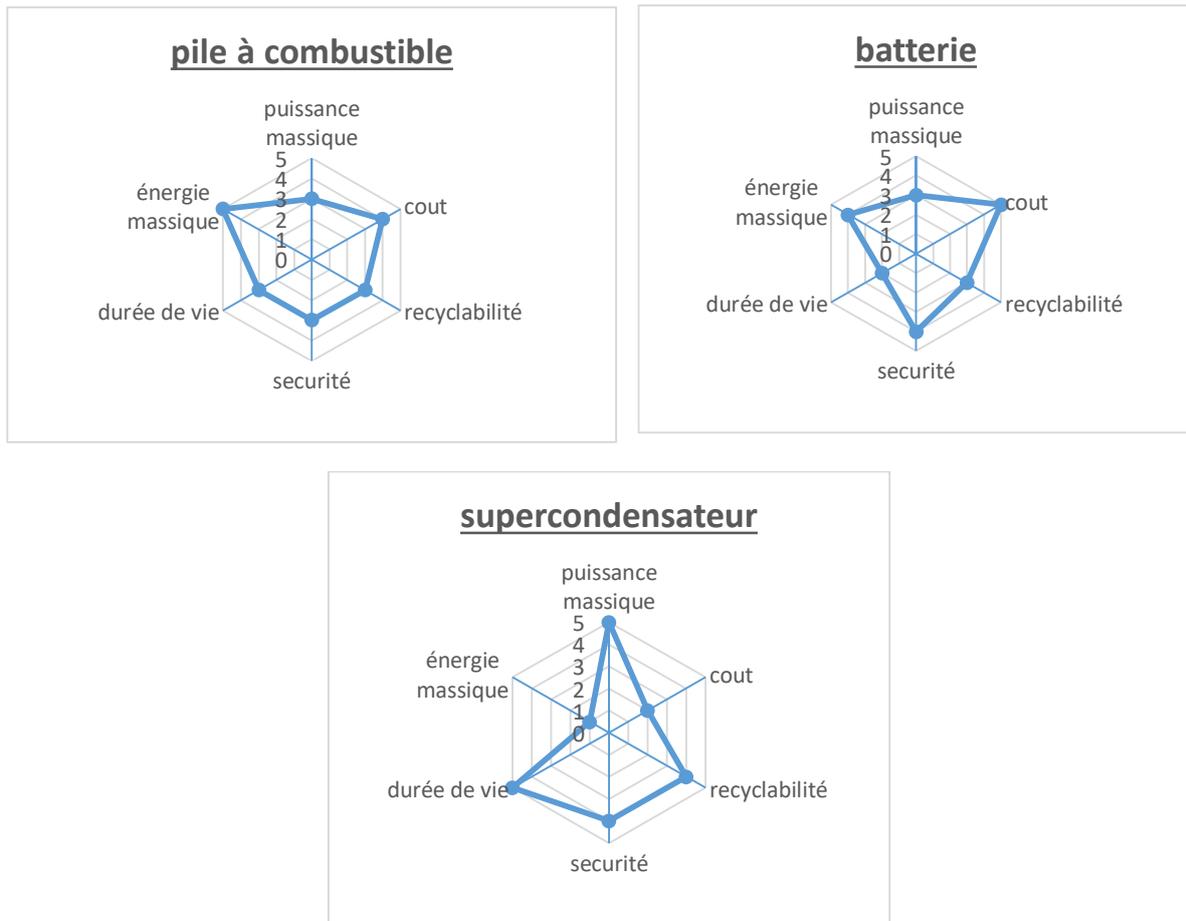


Figure I.11 comparaison des différents SSE électriques

Tableau I.2 Répartition des 5 niveaux suivant les critères de comparaison

Indices de performances	Durée de vie	Energie massique (Wh/kg)	Puissance massique (W/kg)	Cout (€/kWh)	Recyclabilité %	Sécurité
Indice 1	$10 - 10^2$	5 - 10	50 - 100	$>10^6$	0 - 20	1
Indice 2	$10^2 - 10^3$	10 - 50	100 - 500	$10^5 - 10^6$	20 - 40	2
Indice 3	$10^3 - 10^4$	50 - 100	500 - 1000	$10^4 - 10^5$	40 - 60	3
Indice 4	$10^4 - 10^5$	100 - 500	1000 - 5000	$10^3 - 10^4$	60 - 80	4
Indice 5	$>10^5$	500 - 1000	>5000	$10^2 - 10^3$	80 - 100	5

Le système PAC et les batteries sont les SSE électriques les plus intéressants en termes d'énergie massique (bien que très inférieur à celle du carburant, d'où une autonomie limitée). Ainsi ils pourraient être les SSE électriques privilégiés pour les applications VE. En terme de

prix, les batteries sont les plus compétitives cependant elles supportent mal le recyclabilité qui réduit sensiblement leur durée de vie. Des incertitudes restent pour le système PAC notamment sur les critères de recyclabilité, durée de vie et de prix. De plus, la sécurité de fonctionnement reste également à garantir ; l'H₂ peut être inflammable et explosif s'il y a fuite en cas d'accident.

Les supercondensateurs sont les meilleurs pour une application nécessitant de fortes contraintes en puissance, et où le nombre de cycles charge/décharge est important. Cependant ce système de stockage électrique présente une faible énergie massique (niveau 1) et donc une faible autonomie.

Le point faible du stockage d'énergie électrique

A la vue de la figure (I.11), il apparaît qu'aucun des SSE électrique n'atteint l'indice de performance 5 pour l'ensemble des critères considérés. En effet, la plupart des SSE électrique excellent dans un ou deux critères et sont moins bons voire mauvais dans les autres. Aussi, la question suivante se pose : *comment obtenir un SSE électrique le mieux adapté à une application véhicule du futur ?*

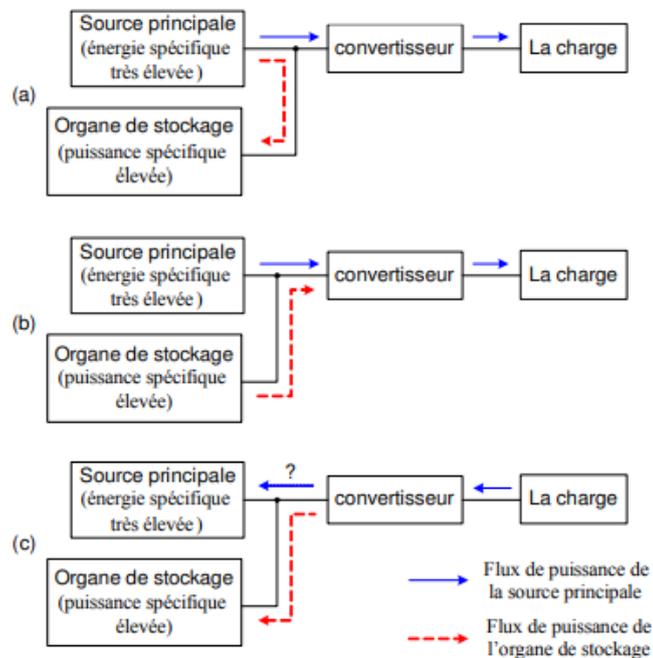
L'idée d'associer deux SSE électrique. Ceux-ci sont également choisis de façon à présenter des caractéristiques complémentaires. Cette association permettrait de pallier les lacunes de chaque SSE pris séparément et d'allier leurs avantages respectifs. Au global le SSE pris séparément et promis sur l'ensemble des critères considérés. Différentes associations sont envisageables pour obtenir un SSE électrique mixte présentant les meilleurs atouts pour une application véhicule : (batterie/supercondensateur), (batterie/système PAC), (système PAC/supercondensateur).

I.4.2 Principe de l'hybridation des sources de stockage d'énergie [18]

L'hybridation, qui par principe, combine les avantages de deux technologies (énergie spécifique élevée pour la première, puissance spécifique importante et disponible sur des durées appréciables pour la seconde), permet en particulier de séparer les dimensionnements en puissance moyenne et en puissance transitoire, l'intérêt principal résidant ici dans un gain substantiel en termes de volume et de masse.

Dans un système hybride, trois régimes de fonctionnement peuvent être définis (Figure I.13) :

- Un régime dit "normal", pour lequel la puissance de la charge est inférieure à la puissance maximale de la source principale. La source principale fournit alors de l'énergie à l'organe de stockage et à la charge,
- Un régime dit "décharge", pour lequel la puissance de la charge est supérieure à la puissance maximale de la source principale. Par conséquent, la source principale et l'organe de stockage fournissent de l'énergie à la charge,
- Un régime dit "récupération", pour lequel l'utilisation fournit de l'énergie à l'organe de stockage (et peut être à la source principale, si elle est rechargeable).



(a) régime normal (b) régime décharge (c) régime récupération

Figure I.12 Conception d'hybridation et régimes de fonctionnement

I.4.3 Différentes associations des sources de stockage d'énergie [19]

I.4.3.1 Association Batterie/supercondensateur

L'idée principale qui conduit au concept de source hybride consiste à introduire, en plus de la source d'énergie primaire (Batterie), une source de puissance (Supercondensateur). Cette solution d'hybridation présente des meilleures performances notamment en terme du coût, de

dimensionnement et de durée de vie des batteries qu'un système composé uniquement de batteries, comme c'est le cas de la plupart des VE et des VEHs sur le marché automobile actuel.

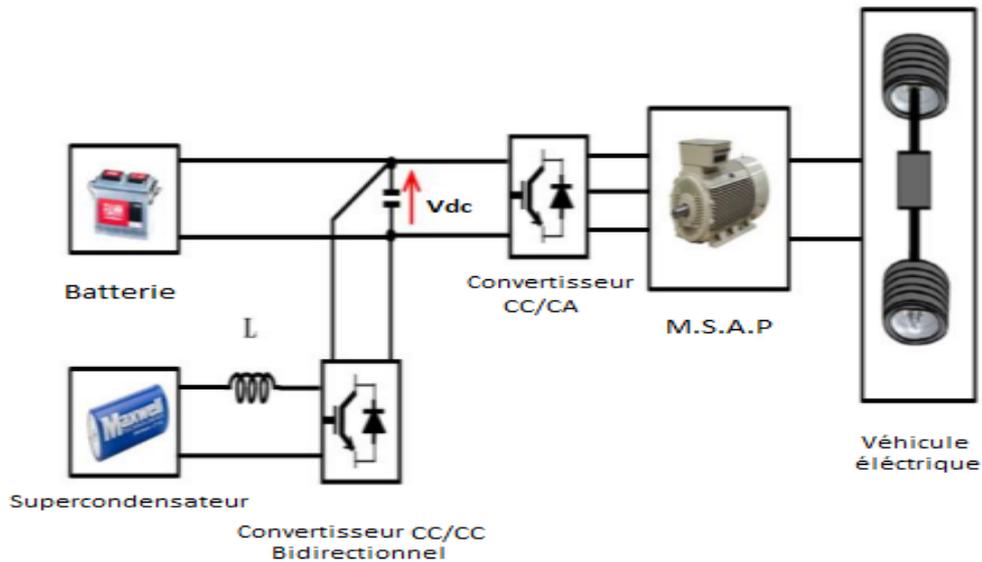


Figure I.13 Association d'une batterie/supercondensateur

I.4.3.2 Hybridation supercondensateur/pile à combustible

Cette hybridation consiste à diviser en deux la puissance à fournir à la charge, une partie dédiée à la pile à combustible et l'autre aux supercondensateurs. Cette répartition de puissance dépend de la stratégie de commande. La structure de cette source hybride contient un bus continu (DC Link) alimenté par une pile à combustible à travers un hacheur élévateur qui maintient la tension du Pile à Combustible, un moyen de stockage basé sur des supercondensateurs qui est connecté au bus continu à travers d'un hacheur abaisseur-élévateur bidirectionnel en courant. La pile à combustible est la source principale, son rôle est de fournir la majorité de l'énergie à la charge alors que le moyen de stockage (supercondensateur) est une source auxiliaire qui alimente la charge pendant les régimes transitoire et permanent et récupère de l'énergie selon le mode de fonctionnement et son état de charge Soc SC

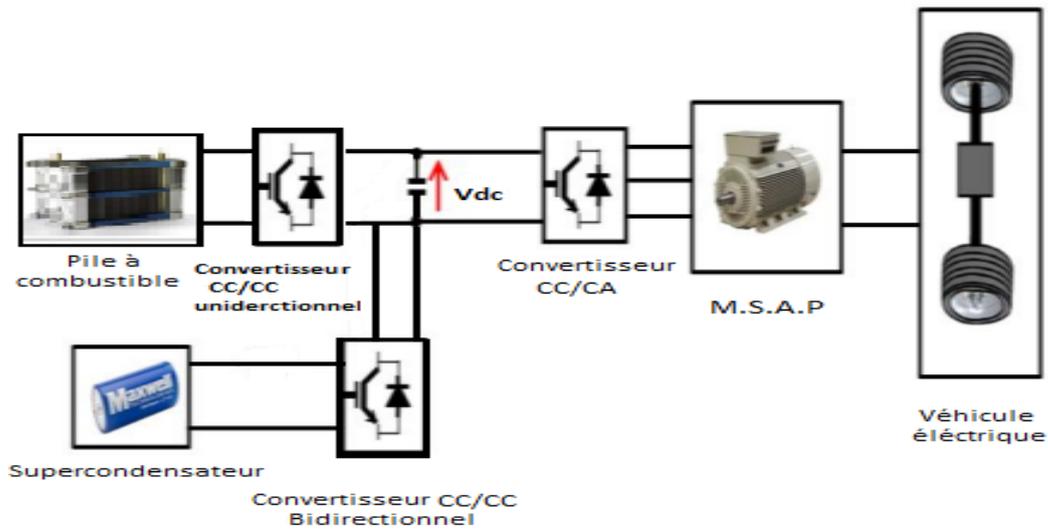


Figure I.14 Hybridation d'un supercondensateur et une PAC

I.4.3.3 Hybridation d'une batterie et une pile à combustible

Ce Système hybride à pile à combustible/batterie, combine les avantages des deux sources d'énergie. La pile à combustible est considérée comme source principale qui fournit la majorité de la demande de la charge, alors que la batterie sert à compenser la puissance intermittente ou transitoire de la charge. De cette façon, ce système d'alimentation peut être intéressant pour certaines applications de secours ou de propulsion des véhicules électriques et les petits avions selon le type de la pile à combustible. Les sources de cette structure sont connectées à un bus continu (DC Link) à travers deux convertisseurs DC/DC.

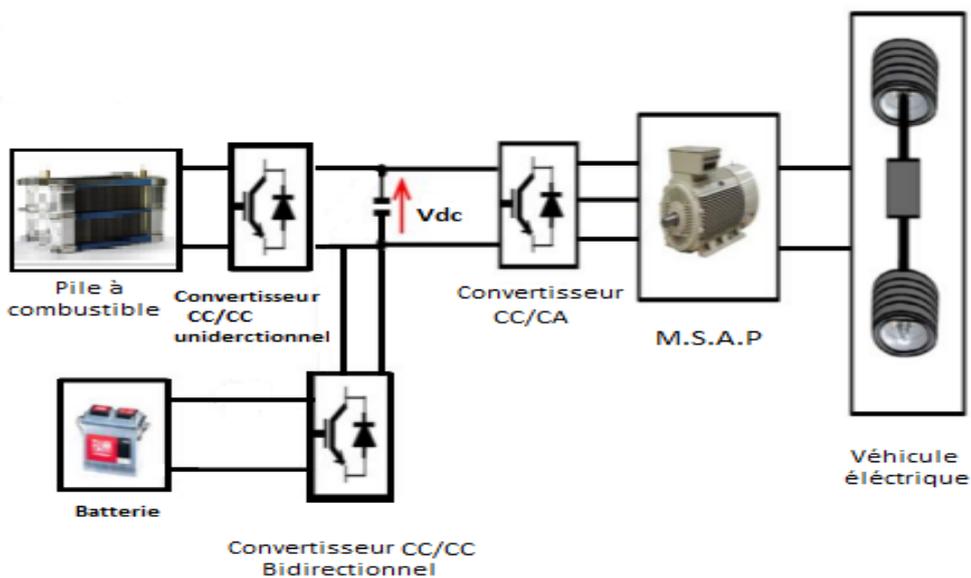


Figure I.15 Association d'une pile à combustible et une batterie

I.4.3.4 Hybridation batterie/PAC/supercondensateur

En général, la structure PAC/SC a de meilleures performances parce que les supercondensateurs peuvent aider d'une manière plus efficace La PAC pour satisfaire la demande transitoire de puissance de la charge (les supercondensateurs peuvent être chargés ou déchargés à un courant élevé, dans lequel la batterie ne peut pas fonctionner), et la charge et la décharge de la batterie par un courant très élevé permettra de réduire ainsi sa durée de vie.

Néanmoins, un véhicule hybride à pile à combustible avec supercondensateurs comme le seul moyen de stockage sera insuffisant ou aura même un dysfonctionnement lors du démarrage du véhicule en raison du temps de démarrage du PAC (environ de 5 – 10 min), dans lequel la batterie grâce à son énergie spécifique plus élevée que le supercondensateur, peut alimenter les auxiliaires de la pile et du véhicule. Par conséquent, une solution plus pratique est d'associer les trois sources dans une seule source hybride (PAC/Batterie/SC) pour augmenter la durée de vie de la batterie en raison de la réduction des charges et de décharges à haute intensité. La structure de cette source hybride contient un bus continu (DC Link) alimenté par une pile à combustible à travers un hacheur élévateur qui maintient la tension du bus continu, une batterie et un pack de supercondensateur comme moyens de stockage connectés au bus continu à travers deux hacheurs (abaisseur-élévateur) bidirectionnels en courant

I.5 Conclusion

Ce chapitre nous a permis de présenter les types des véhicules à motorisation électrique, les différents systèmes de stockage utilisés dans ces véhicules et l'hybridation de ces sources

- Le véhicule tout électrique, hydrogène et hybride avec leur principe de fonctionnement, leurs avantages et inconvénients ainsi que leurs types
- Les batteries, les piles à combustibles leurs principes de fonctionnement ; les types utilisés dans la traction électrique leurs différentes technologies existantes ainsi que leurs applications.
- L'hybridation des sources d'énergies et leurs différentes associations.

Dans le prochain chapitre on va modéliser les différentes composantes du véhicule électrique à système de stockage hybride qui contient une batterie et une pile à combustible

II.1. Introduction

Le véhicule électrique hybride est avant tout un assemblage de composants qui sont capables de convertir une énergie électrique stockée dans une source de stockage en une énergie mécanique, on peut résumer ces différents composants dans les catégories suivantes :

- ❖ Les composants de conversion de l'énergie (le convertisseur statique et la machine électrique : la machine considéré dans ce travail est la MSAP).
- ❖ Les sources d'énergie (dans cette étude les sources considérées sont les batteries et la pile à combustible).
- ❖ Les éléments de transmission mécanique (embrayage, rapport de réduction, boîte de vitesses).

Le schéma suivant représente le schéma physique de la voiture électrique hybride

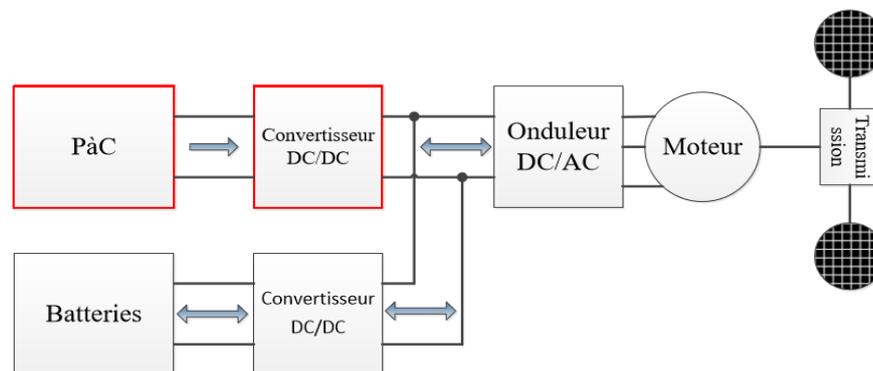


Figure II.1 Le schéma physique de la voiture électrique hybride étudié

Le but de ce chapitre est de modéliser les différentes composantes d'un véhicule électrique à système de stockage hybride (batterie et une pile à combustible).

II.2 Modélisation du groupe motopropulseur

Un groupe motopropulseur se compose d'une source d'énergie, électronique de commande, un ou des convertisseurs d'énergie, une ou des machines électriques et un système de liaison mécanique (réducteur de vitesse, différentiel).

-Source d'énergie : La source d'énergie est un système de stockage hybride qui contient une batterie et une pile à combustible, qui est pour but de fournir (éventuellement de récupérer en cas de freinage) l'énergie électrique.

- **Convertisseur** : Les onduleurs sont utilisés dans la chaîne de traction pour gérer les échanges énergétiques entre la source d'énergie et le groupe motopropulseur (moteur de traction). L'onduleur de tension permet une alimentation alternative triphasée du moteur. Les semi-conducteurs utilisés sont des IGBT.

- **Partie commande** : La partie commande reçoit sur son entrée des consignes telles que : le couple demandé par l'utilisateur et la vitesse de rotation de la machine.

- **Moteur de traction** : Le moteur utilisé est de type synchrone triphasé à aimants permanents. L'intérêt ce type de machine est sa grande fiabilité, son rendement plus élevé, possibilité de supporter des surcharges transitoires importantes, sa puissance massique élevée, ce qui est important pour les systèmes embarqués.

- **Partie mécanique** : Il existe une transmission mécanique comprenant un réducteur entre le moteur et la roue

II.3 Modélisation de la machine synchrone à aimants permanent commander par un onduleur MLI

Dans notre travail le véhicule étudié est équipé d'un moteur synchrone à aimant permanent, pour pouvoir simuler le système entier du véhicule on doit modéliser le moteur et effectuer par la suite la simulation sous Matlab Simulink

II.3.1. Modélisation de la machine synchrone à aimant permanent [20]

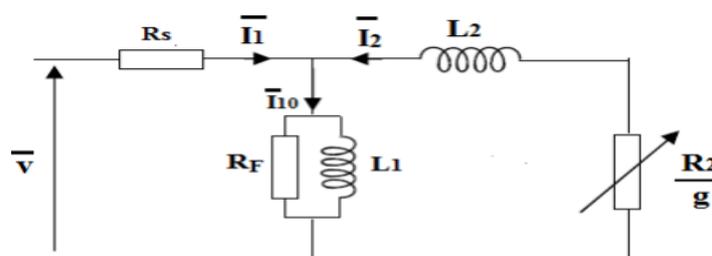


Figure II. 2 Représentation du moteur synchrone à aimant permanent

Le moteur synchrone à aimants permanents (MSAP) comporte au stator un enroulement triphasé représenté par les trois axes (a, b, c) déphasés, l'un par rapport à l'autre, de 120° électrique, et au rotor des aimants permanents assurant son excitation (Figure II.3). En fonction de la manière dont ils sont placés, on peut distinguer deux types de rotors.

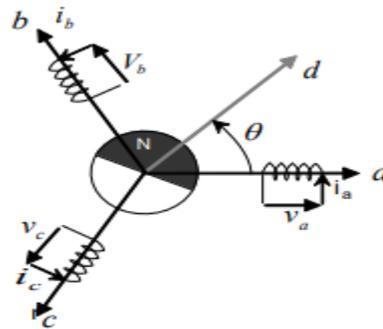


Figure II. 3 Représentation de MSAP dans le repère électrique (a, b, c)

Dans le premier type (Figure II.4(a)) les aimants sont montés sur la surface du rotor offrant un entrefer homogène, le moteur est appelé à rotor lisse et les inductances ne dépendent pas de la position du rotor. Dans le deuxième (Figure II.4 (b)) les aimants sont montés à l'intérieur de la masse rotorique et l'entrefer sera variable à cause de l'effet de la saillance. Dans ce cas les inductances dépendent fortement de la position du rotor. De plus, le diamètre du rotor du premier type est moins important que celui du deuxième ce qui réduit considérablement son inertie en lui offrant la propriété dans l'entraînement des charges rapides. En ce qui concerne le stator, il est semblable à celui de toutes les machines à courant alternatifs, (Figure II.4)

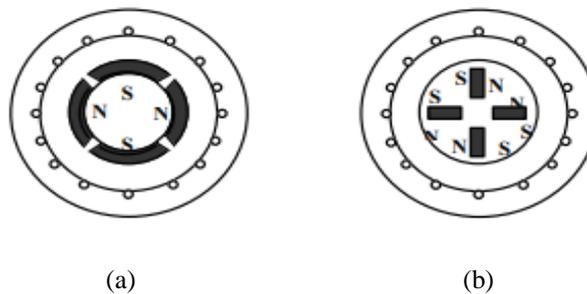


Figure II.4 Rotors des machines synchrones à aimant permanents

II.3.1.2 Hypothèses simplificatrices

La modélisation de la machine synchrone à aimants permanents est subordonnée par les hypothèses simplificatrices suivantes

- ❖ L'entrefer est d'épaisseur uniforme ;
- ❖ L'effet d'encoche est négligeable ;
- ❖ L'induction dans l'entrefer est sinusoïdale ;
- ❖ Le circuit magnétique est supposé saturé ;
- ❖ Les harmoniques d'encoche et d'espaces ne sont pas prises en compte ;

- ❖ Le circuit magnétique est supposé parfaitement feuilleté, i.e. : les courants de Foucault sont négligeables ;
- ❖ L'hystérésis, l'effet de peau ainsi que l'effet de la température sont négligeables

Le modèle mathématique du MSAP est similaire à celui de la machine synchrone classique.

En tenant compte de la représentation de la machine (Figure II.4) et des hypothèses simplificatrices précédentes, le modèle triphasé s'exprime par :

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

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

$V_{abc}, i_{abc}, \Phi_{abc}$ 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 :

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

$$\text{Où : } [L_S] = \begin{bmatrix} L_{SS} & M_S & M_S \\ M_S & L_{SS} & M_S \\ M_S & M_S & L_{SS} \end{bmatrix}, [\Phi_f] = \Phi_f \begin{bmatrix} \cos \theta \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix}$$

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 :

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

Le couple électromagnétique est exprimé par

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

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

II.3.2 Modélisation de la transformée de Park et Concordia

Pour étudier les machines synchrones, nous pouvons utiliser une représentation dans un repère diphasé. L'utilisation de ce modèle permet de voir l'effet des champs tournants, modélisés sous forme de vecteur tournant, sur la création du couple. Bien qu'il soit possible de définir les vecteurs dans un repère quelconque, nous les décrivons soit dans le repère du rotor (d, q) à l'aide de la transformée de Park, soit dans le repère du stator (α , β) d'après la transformée de Concordia, comme le montre la Figure II.5

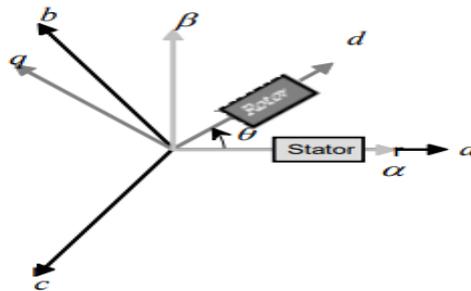


Figure II.5 Représentation des différents repères

Cette méthode se décompose en deux étapes

- ✓ Transformée triphasée-diphasée (dans un repère fixe) (Concordia)
- ✓ Transformée repère fixe-repère tournant (Park)

II.3.2.1 Transformée de Concordia [T32]

La transformée de Concordia est utilisée pour faire le passage entre le système triphasé a, b, c à un système fictif (α , β). Elle est définie comme suit :

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

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

La matrice de la transformation C est donnée par :

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

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

$$\begin{cases} \Phi_{s\alpha} = L_S i_{s\alpha} + \Phi_f \cos \theta \\ \Phi_{s\beta} = L_S i_{s\beta} + \Phi_f \sin \theta \end{cases} \quad (\text{II.8})$$

Equation du couple électromagnétique

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

II.3.2.2 Transformée de Park

On remarque que le système (II.3) engendre des équations fortement non linéaires et couplées. Pour simplifier ce problème, la majorité des travaux dans la littérature préfèrent utiliser ladite transformée de Park qui, par une transformée appliquée aux variables réelles (tensions, courants et flux), permet d'obtenir des variables fictives appelées les composante d q ou les équations de Park. Du point de vue physique, cette transformée est interprétée comme étant une substitution des enroulements immobiles (a, b, c) par des enroulements (d, q) tournant avec le rotor. Cette transformée rend les équations des moteurs à courant alternatif plus simples ce qui facilite leur étude et leur analyse.

En (d, q), la transformée de Park permet de ramener le système triphasé d'équations à un système diphasé disposé selon deux axes en quadrature liés au rotor. Conventionnellement, l'axe (d) est choisi sur l'inducteur, Figure II.6.

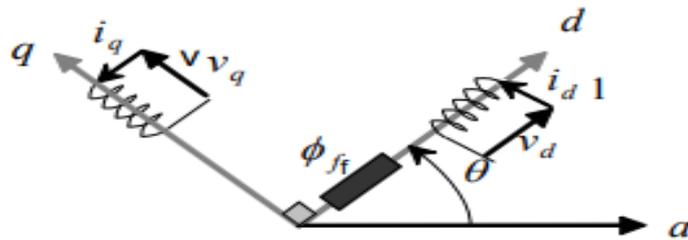


Figure II.6 Modèle de Park de la MSAP

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 :

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

Dont la matrice inverse à pour forme :

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

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

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

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

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

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

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 :

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

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

II.3.3 Modèle d'état

Pour présenter un modèle d'état il faut définir le vecteur d'état x , le vecteur d'entrée u et le vecteur de sortie y . Le vecteur d'entrée est composé de tension statorique et le vecteur d'état est constitué des grandeurs électrique (courant) et grandeurs mécanique (vitesse et/ou position

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

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 d'une régulation de la position θ du rotor, il faut prendre celle-ci comme une 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.3.4 Modélisation de l'onduleur de tension [21]

L'objectif de la modélisation est de trouver une relation entre les grandeurs de commande et les grandeurs électriques de la partie alternative et continue de l'onduleur. Dans cette étude on considère le cas idéal d'un onduleur triphasé à deux niveaux de tension qui est modélisé par un interrupteur parfait à commutation instantanée. Le schéma de cet onduleur est donné dans la figure (II.7)

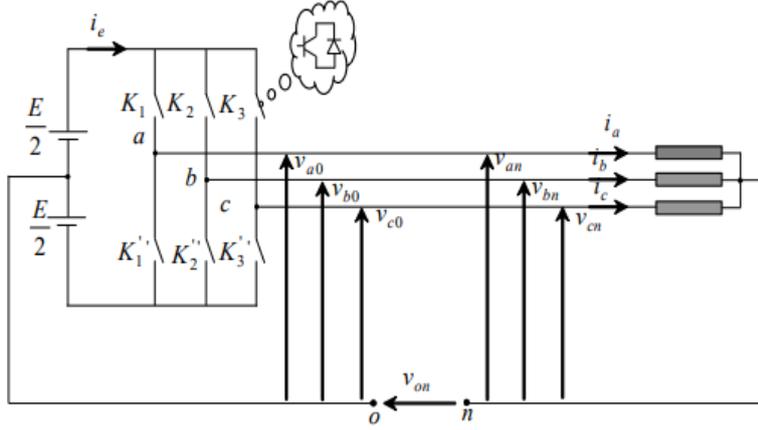


Figure II.7 Schéma de l'onduleur de tension

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

$$\begin{cases} v_{an} = v_{ao} + v_{on} \\ v_{bn} = v_{bo} + v_{on} \\ v_{cn} = v_{co} + v_{on} \end{cases} \quad (\text{II.23})$$

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

$$v_{an} + v_{bn} + v_{cn} = v_{ao} + v_{bo} + v_{co} + 3v_{on} = 0 \quad (\text{II.24})$$

$$v_{ao} + v_{bo} + v_{co} = -3v_{on} \quad (\text{II.25})$$

$$v_{no} = \frac{1}{3}(v_{ao} + v_{bo} + v_{co}) \quad (\text{II.26})$$

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

$$\begin{bmatrix} v_{an} \\ v_{bn} \\ v_{cn} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{ao} \\ v_{bo} \\ v_{co} \end{bmatrix} \quad (\text{II.27})$$

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

$$v_i - v_o = \begin{cases} +\frac{E}{2} & \text{Si } K_i : \text{ fermé} \\ -\frac{E}{2} & \text{Si } K_i : \text{ fermé} \end{cases} \quad \text{Avec } i=a, b, c \quad (\text{II.28})$$

Les tensions aux bornes de la machine sont données par :

$$\begin{bmatrix} v_{an} \\ v_{bn} \\ v_{cn} \end{bmatrix} = \frac{E}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (\text{II.29})$$

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 MLI est représenté dans la figure II.8

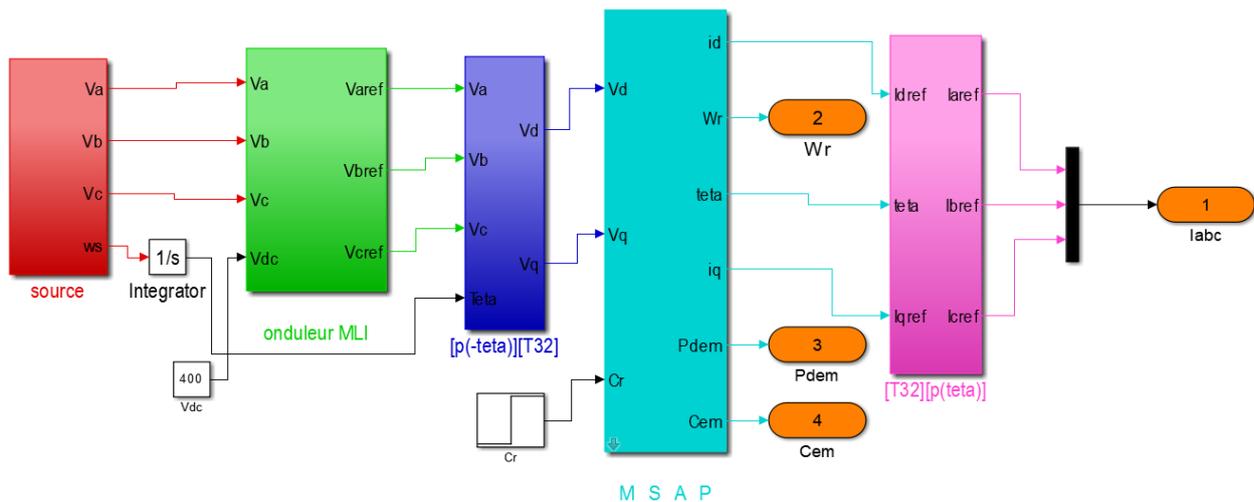


Figure II. 8 Schéma bloc d'une machine synchrone à aimant permanent commandé par un onduleur MLI

Les paramètres du moteur sont donnés dans l'annexe A.

II.3.5 Résultats de la simulation du MSAP commandé par un onduleur MLI

Après la modélisation de l'ensemble machine onduleur on a abouti au schéma bloqué de la figure (II.8) à l'aide de Matlab Simulink. Le système global à étudier est constitué de :

- Un onduleur de tension triphasée.
- Un moteur synchrone à aimants permanents.

Le couple de charge appliqué sur la machine synchrone à aimants permanent est le suivant (Figure II.9)

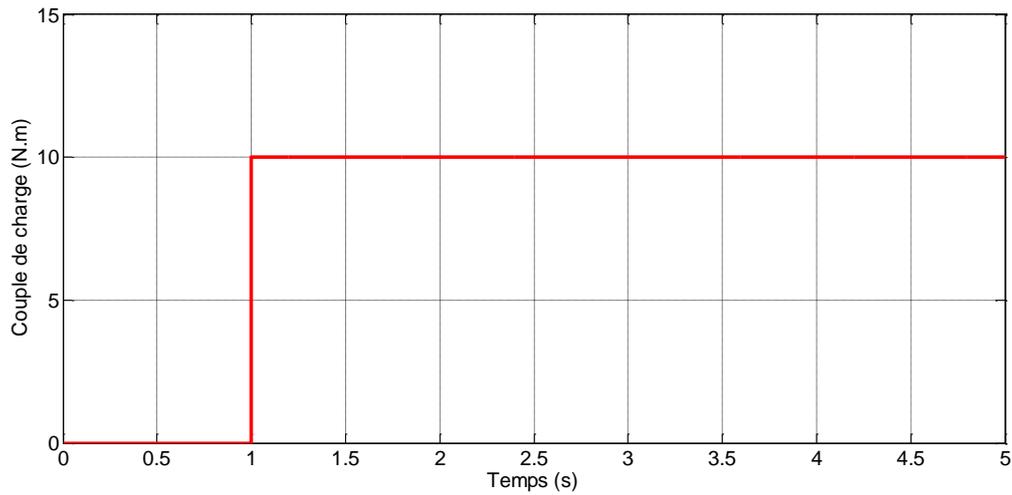


Figure II.9 Couple de charge appliqué sur la MSAP

La figure ci-dessus représente l'allure des courants statorique triphasé (i_a , i_b , i_c)

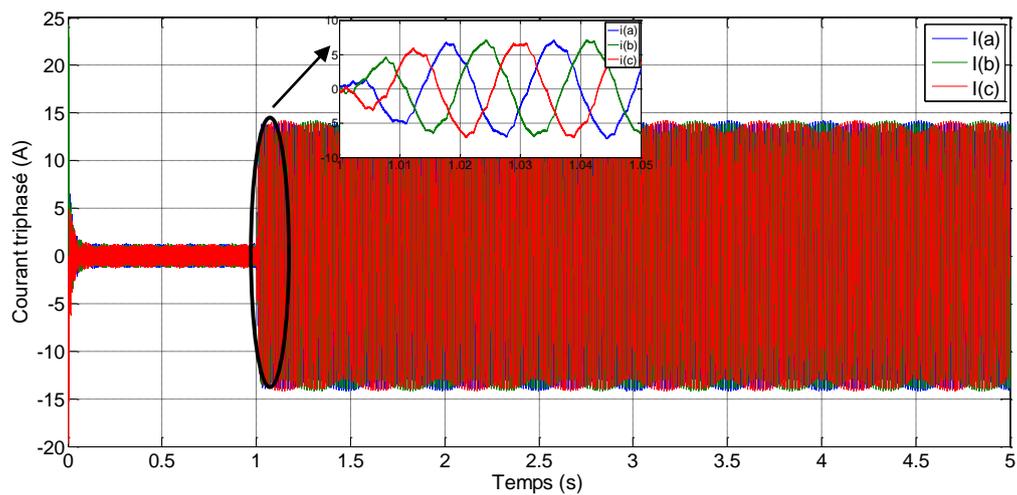


Figure II.10 Allure des courants statorique d'une MSAP

Les courants statoriques sont de la forme sinusoïdale, en appliquant un couple de charge de 10 N.m à 1s on remarque l'augmentation des courant.

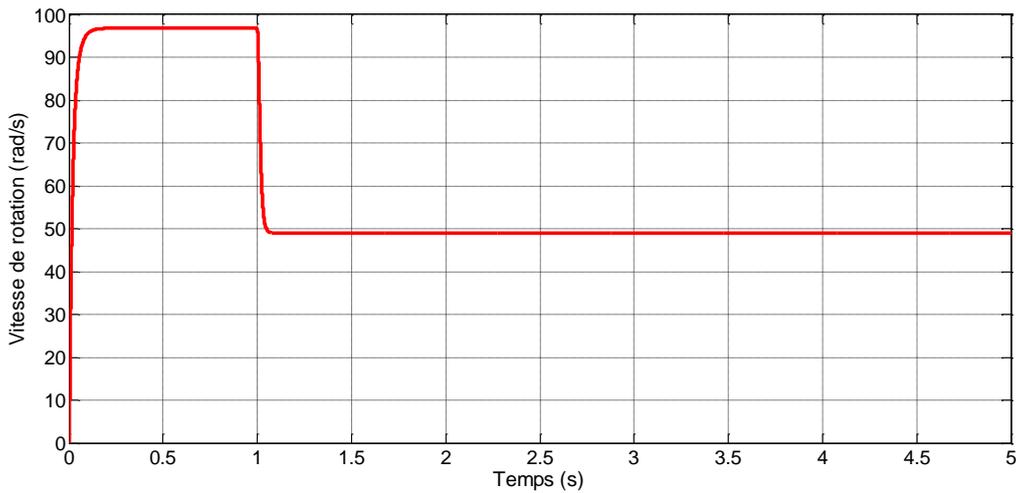


Figure II.11 Courbe de variation de vitesse de rotation de MSAP en fonction du temps

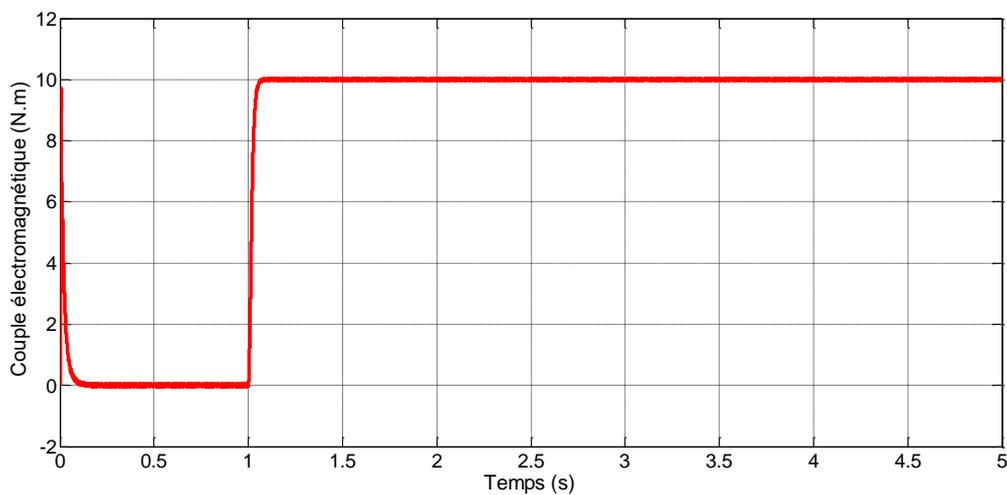


Figure II.12 Courbe de variation du couple électromagnétique de MSAP en fonction du temps

La figure II.11 montre le comportement de la vitesse du moteur synchrone à aimant permanent et la figure II.12 montre le comportement du couple. On remarque que le couple électromagnétique suit le couple appliqué sur la machine synchrone à aimants permanents montré dans la figure II.9.

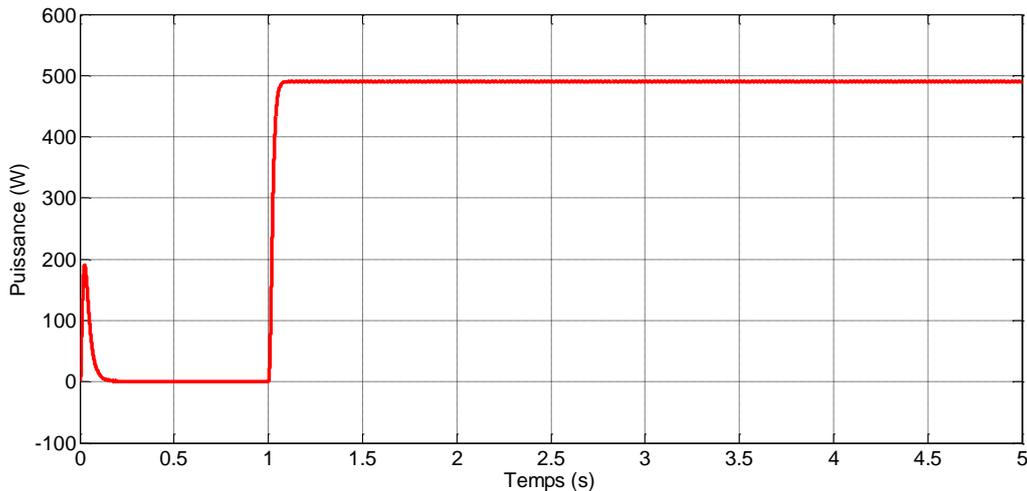


Figure II.13 Puissance électromagnétique délivré par le moteur

L'allure de la puissance électromagnétique délivré par le MSAP suit l'allure du couple de charge appliqué.

II.4 Dimensionnement du système de stockage

II.4.1 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 :

$$P_{PAC} = P_d(1 + 0.2) \quad (\text{II.30})$$

P_d : la puissance à l'entrée de l'onduleur

$$P_{PAC} = 417 (1 + 0.2) = 500 \text{ W} \quad (\text{II.31})$$

II.4.1.1 Détermination du nombre de cellules

La puissance électrique brute de l'empilement se calcule par la relation suivante [25] :

$$P_{PAC} = N_{PAC} \times E_{PAC} \times j \times S_{PAC} \quad (\text{II.32})$$

Il est intéressant d'avoir la tension $U_{stach} = N_{PAC} \cdot E_{PAC}$ la plus élevée et donc le courant $I_{stach} = j \cdot S_{pac}$ 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 [25].

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 390V. Ce qui donne un nombre de cellules de :

$$N_{PAC} = \frac{U_{stack}}{E_{PAC}} = \frac{\frac{V_{bus}}{2}}{E_{PAC}} = ENT \left(\frac{200}{0.6} \right) + 1 = 334 \text{ cellules} \quad (II.33)$$

Avec :

- 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 $E_{ch}=0.6V$

II.4.1.2 Détermination de la surface des cellules

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

$$I_{PAC} = \frac{P_{PAC}}{U_{stack}} = 2.5 \text{ A} \quad (II.34)$$

$$S_{PAC} = \frac{I_{PAC}}{j} = 4.17 \text{ cm}^2 \quad (II.35)$$

- * P_{PAC} : Puissance utile maximale soit 500 W.
- * I_{pac} : Courant maximal de la pile à combustible.

II.4.2 Détermination de la taille des batteries

La capacité des batteries de stockage est déterminée à partir de la puissance demandée [29], elle est exprimée par :

$$C_{bat,tot} = \frac{N_{ja} \cdot P_{dem}}{V_{bat} \cdot P_{DD} \cdot \eta_{bat}}$$

Où :

- ✓ N_{ja} : nombre de jours d'autonomie (2 jours).
- ✓ P_{dem} : puissance demandée par le moteur (550 W)
- ✓ P_D : profondeur de décharge (0.7).
- ✓ η_{bat} : Le rendement de la batterie (0.9).
- ✓ V_{bat} : tension des batteries (24V).

Le nombre de batteries à retenir est déterminé à partir de la capacité d'une unité de batterie, en prenant la valeur entière du rapport par excès.

$$N_{bat} = ENT \left[\frac{C_{bat,tot}}{C_{bat,u}} \right] \quad (II.36)$$

$$N_{bat,s} = ent \left[\frac{V_{dc}}{V_{bat,u}} \right] = \frac{400}{24} = 16 \text{ batteries} \quad (II.37)$$

II.5 Modélisation des composantes du système de stockage

II.5.1 La modélisation de la pile à combustible de type PEMFC

Avant de réaliser le modèle de la pile à combustible on considère quelques hypothèses pour simplifier la modélisation.

Pour cette modélisation les hypothèses considérées sont les suivantes : [22] [24]

- ✓ Modélisation zéro-dimensionnelle
- ✓ Il est supposé que toutes les cellules se comportent de la même manière
- ✓ Les gaz d'entrée sont de dihydrogène et du dioxygène pur.
- ✓ La diffusion est prise en régime stationnaire.
- ✓ Aucune réaction chimique parasite n'est considérée (rendement faradique unitaire).
- ✓ Le modèle décrit les conditions normales de fonctionnement c'est-à-dire que le vieillissement et d'éventuelles détériorations de la pile ne sont pas pris en compte.
- ✓ La gestion de l'eau n'est pas prise en compte dans notre cas.
- ✓ Les produits sont évacués continuellement.
- ✓ Les paramètres : température, pression, hydratation sont connus et constants.

Dans la littérature il existe deux approches de modélisation de la pile combustible [22] :

- **La première approche**

Inclut les modèles structuraux qui simulent le transfert de chaleur et les phénomènes électrochimiques de la pile.

- **La deuxième approche**

Inclut les modèles sur les équations empiriques ou semi empiriques, appliqués afin de prévoir l'effet de différents paramètres opératoires sur les caractéristiques tension –courant de la pile sans décrire les phénomènes électrochimiques.

Dans notre étude, nous avons choisi une modélisation basée sur la deuxième approche et plus précisément sur le modèle d'Amphlett.

La pile à combustible dans les conditions normales de ($T=25^{\circ}\text{C}$ et $P=1\text{atm}$) a un potentiel thermodynamique de 1.23 V, mais en réalité le potentiel de la pile à combustible (E_{PAC}) s'affaiblit par rapport à cette valeur quand le courant débite, cette déviation 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.14) :

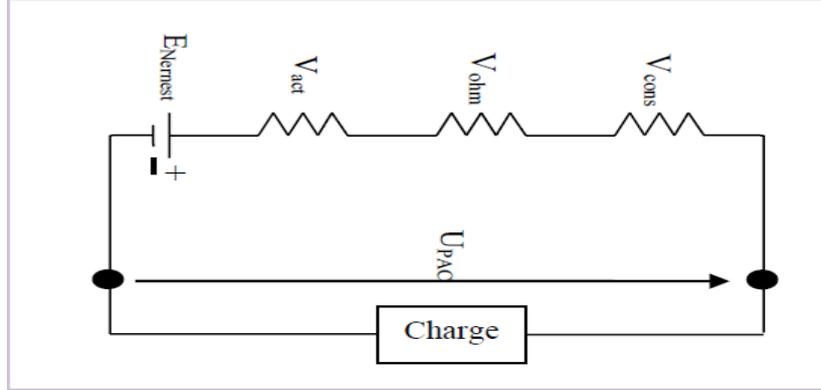


Figure II.14 Schéma équivalent de la pile PEMFC

D'ici on peut exprimer la tension d'une cellule PEMFC comme suit (équation II.38) :

$$E_{pac} = E_{Nernst} - V_{act} - V_{ohm} - V_{conc} \quad (II.38)$$

Alors que l'expression de E_{Nernst} est donnée par l'équation suivante (équation II.39) :

$$E_{Nernst} = 1.229 - 0.85 \times 10^{-3} \times (T - 298.15) + 4.3085 \times 10^{-5} \times T \left[\ln(P_{H_2}^*) + \frac{1}{2} \ln(P_{O_2}^*) \right] \quad (II.39)$$

Il reste à définir les polarisations citées dans l'équation (II.38).

II.5.1.1 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-Volmer et par la cinétique lente de transfert de charge dans les zones actives. [23]. Cette polarisation est exprimée par l'équation suivante (équation II.40) :

$$V_{act} = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 \times T + \varepsilon_3 \times T \times \ln(C_{O_2}^*) + \varepsilon_4 \times T \times \ln(I_{PAC}) \quad (II.40)$$

I_{PAC} : le courant de fonctionnement de la pile en ampère (A).

Les coefficients ε_1 , ε_2 , ε_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/cm^3) 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.41) :

$$P_{O_2}^* = P_{cath} \times (1 - X_{H_2O}^{Sat}) \quad (\text{II.41})$$

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.42) :

$$P_{O_2}^* = P_{cath} \times \frac{1}{2} \quad (\text{II.42})$$

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

$$P_{H_2}^* = P_{anode} \times \left(1 - \frac{1}{2} \cdot X_{H_2O}^{Sat}\right) \quad (\text{II.43})$$

$$P_{H_2}^* = P_{anode} \times \frac{3}{4} \quad (\text{II.44})$$

II.5.1.2 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 : (l'équation II.45).

$$V_{ohm} = I_{PAC} \times (R_M + R_C) \quad (\text{II.45})$$

$$R_M = \frac{l \times r_M}{A} \quad (\text{II.46})$$

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

$$r_M = \frac{181.6 \times \left[1 + 0.03 \times \left(\frac{I_{PAC}}{A}\right) + 0.062 \times \left(\frac{T}{303}\right)^2 \times \left(\frac{I_{PAC}}{A}\right)^{2.5}\right]}{\left[\delta_{H_2O/SO_3} - 0.634 - 3 \times \left(\frac{I_{PAC}}{A}\right)\right] \times \exp\left[4.18 \times \left(\frac{T-303}{T}\right)\right]} \quad (\text{II.47})$$

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 ($T = 303$ 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 [22]

En remplaçons les relations dans l'équation (II.37) on aura l'équation suivante (équation II.48) :

$$V_{ohm} = \frac{I_{PAC}}{A} \left[\frac{181.6 \times \left[1 + 0.03 \times \left(\frac{I_{PAC}}{A} \right) + 0.062 \times \left(\frac{T}{303} \right)^2 \times \left(\frac{I_{PAC}}{A} \right)^{2.5} \right]}{\left[\delta_{H_2O/SO_3^-} - 3 \times \left(\frac{I_{PAC}}{A} \right) \right] \times \exp \left[4.18 \times \left(\frac{T-303}{T} \right) \right]} \right] \times l \times A \times R_C \quad (II.48)$$

II.5.1.3 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.49).

$$V_{conc} = -B \left(1 - \frac{J}{J_{max}} \right) \quad (II.49)$$

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.50).

$$E_s = n \times E_{PAC} \quad (II.50)$$

Le modèle de la PEMFC modélisé sous MATLAB Simulink, est le suivant (figure II.15) :

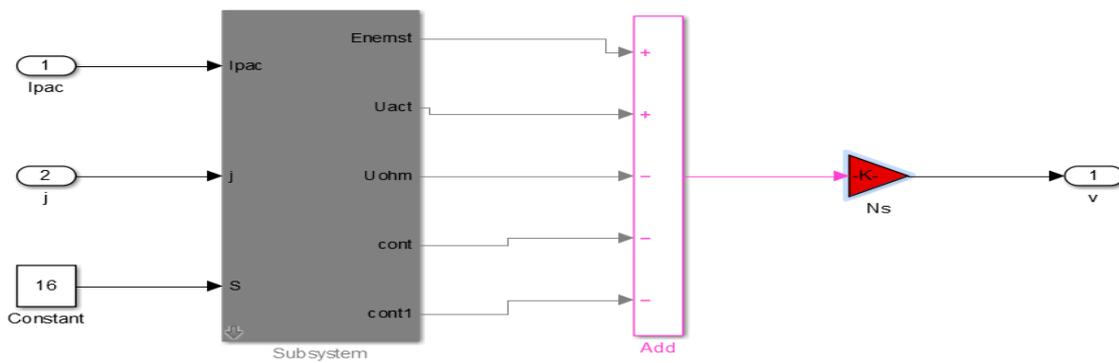


Figure II.15 Modèle de la PEMFC réalisé sous MATLAB Simulink

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.5.1.4. Les résultats de la simulation du modèle de la PEMFC réalisé sous Matlab Simulink

La simulation de modèle d'une cellule PEMFC réalisé nous a donné les résultats suivants :

❖ La courbe tension courant

Après la simulation du modèle de la PEMFC réaliser sous matlab-simulink on a obtenus les figures suivantes ,la figure (II.16) représente l'évolution de la tension de la pile en fonction de son courant

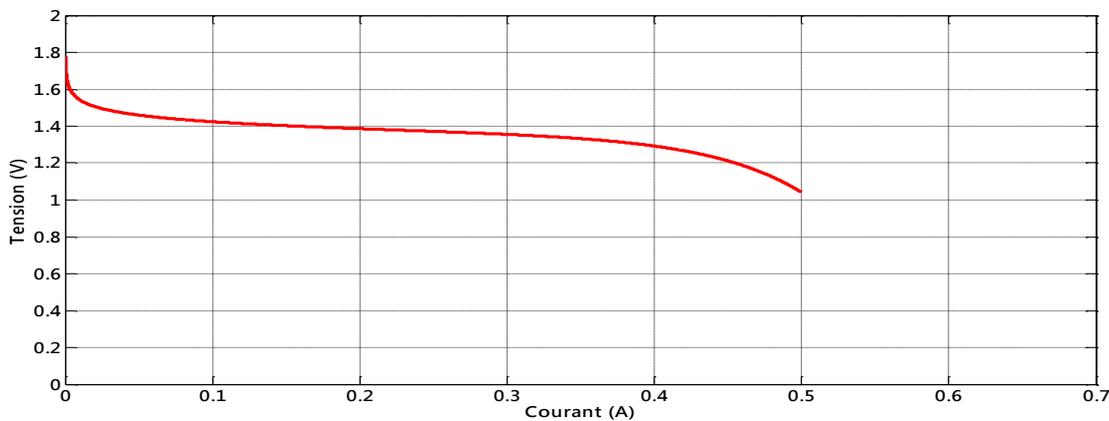


Figure II.16 Evolution de la tension de la pile en fonction de son courant

❖ La courbe puissance courant

Après la simulation du modèle de la PEMFC réaliser sous matlab-simulink on a obtenus les figures suivantes ,la figure (II.17) représente l'évolution de la puissance de la pile en fonction de son courant.

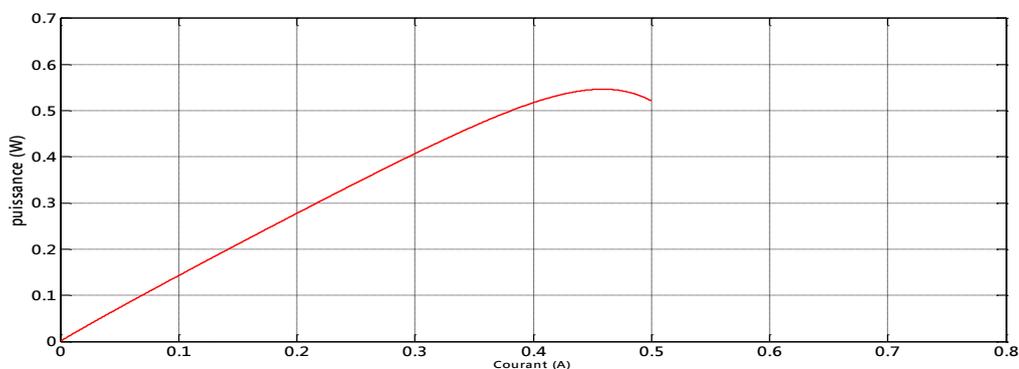


Figure II.17 Evolution de la puissance de la pile en fonction de son courant

La figure II.16 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 II.17 montre le comportement de la puissance de la PEMFC, on remarque que la pile PEMFC atteint sa puissance maximale à $i=0,56A$.

II.5.2 La modélisation la batterie plomb-acide

Le modèle utilisé dans notre cas afin de modéliser les accumulateur plomb –acide est le modèle CIEMAT (Centro de Investigación Energéticas Medioambientales y Tecnológicas en Espagnol) développé par un centre de recherche espagnol. Il est relativement complet, il est appelé modèle « universel » et ne nécessite pas d'identification expérimentale ou de paramètres empiriques comme c'est le cas des autres modèles couramment utilisés. Il est précis, malgré quelques imperfections comme le saut de tension lorsqu'on passe d'un cycle de charge a un cycle de décharge, et la négligence de l'autodécharge.

Ce modèle est basé sur le schéma électrique ci-dessous la figure (II.18), la batterie est décrite par deux éléments dont les caractéristiques dépendent d'un certain nombre de paramètres: la tension à vide E_b et sa résistance interne R_b .

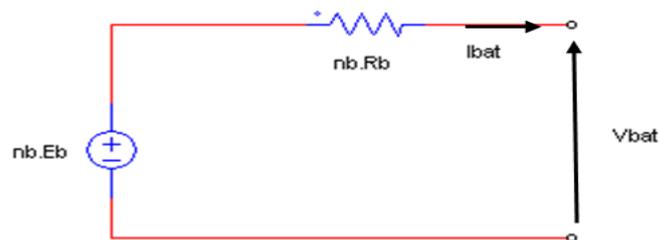


Figure II.18 Schéma équivalent du modèle CIEMAT

A partir de ce schéma la tension de la batterie est définie par l'équation suivante (l'équation II.51) :

$$V_{bat} = n_b E_b + n_b R_b I_{bat} \quad (II.51)$$

II.5.2.1 Modèle de la capacité

Le modèle de la capacité, donnant la quantité d'énergie qui peut être restituée en fonction du courant de décharge I_{bat} est donné par l'équation suivante (équation II.52) :

$$C_{bat} = \frac{1.67 C_{10}}{1 + 0.67 * \left(\frac{I_{bat, moy}}{I_{10}}\right)^{0.9}} * (1 + 0.005 * \Delta T) \quad (II.52)$$

La capacité C_{10} est exprimée par la loi suivante :

$$C_{10} = 10 * I_{10} \quad (II.53)$$

ΔT : L'échauffement de la batterie par rapport à la température ambiante.

II.5.2.2 L'état de charge EDC

La Capacité C_{bat} sert de référence pour son évaluation, il est formulé en fonction de la quantité de charge manquante à la batterie Q_d .

Le EDC de la batterie est donné par l'équation suivante :

$$EDC = 1 - \frac{Q_d}{C_{bat}} \quad (II.54)$$

L'évolution temporelle de Q_d dépend du mode de fonctionnement de la batterie, et elle est défini par l'équation ci-dessous :

$$Q_d = I_{bat} * t \quad (II.55)$$

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

II.5.2.3 Equations de la tension de décharge

L'équation de la fem de la batterie en régime de décharge est comme suivie (équation II.56), elle est fonction de l'état de charge [25]

$$E_{b,déch} = 1.965 + 0.12EDC \quad (II.56)$$

Tandis que la résistance interne de la batterie dans ce régime il est exprimé par [25] :

$$R_{b,déch} = R_{bat} = \frac{1}{C_{10}} \left(\frac{4}{1+|I_{bat}|^{0.3}} + \frac{0.27}{EDC^{1.5}} \right) \quad (II.57)$$

Et la tension de la batterie dans ce régime sera défini comme suit [25] :

$$V_{bat,déch} = n[1.965 + 0.12EDC] - n \frac{|I_{bat}|}{C_{10}} \left(\frac{4}{1+|I_{bat}|^{0.3}} + \frac{0.27}{EDC^{1.5}} + 0.02 \right) (1 - 0.007\Delta T) \quad (II.58)$$

II.5.2.4 Equations de la tension de charge

L'équation de la tension en régime de charge est définie par l'équation suivante (équation II.59), elle est fonction de l'état de charge et du courant de la batterie [25].

$$V_{bat,char} = n_b * [2 + 0.16.EDC] + n_b * \frac{|I_{bat}|}{C_{10}} * \left(\frac{6}{1+|I_{bat}|^{0.86}} + \frac{0.48}{(1-EDC)^{1.2}} + 0.036 \right) * (1 - 0.025\Delta T) \quad (II.59)$$

Le modèle de la batterie est réalisé sous MATLAB Simulink est présenté sur la figure suivante :

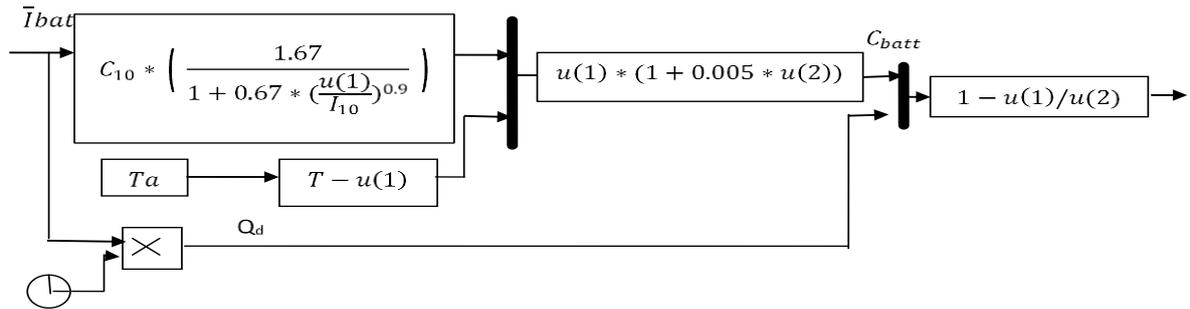


Figure II.19 Modèle de la batterie réalisé sous MATLAB Simulink

II.5.2.5 Les résultats de la simulation de modèle de la batterie réalisé sous Matlab Simulink

La simulation de modèle réalisé, une batterie de 24 V nous a donné les résultats suivants :

❖ L'état de charge de la batterie

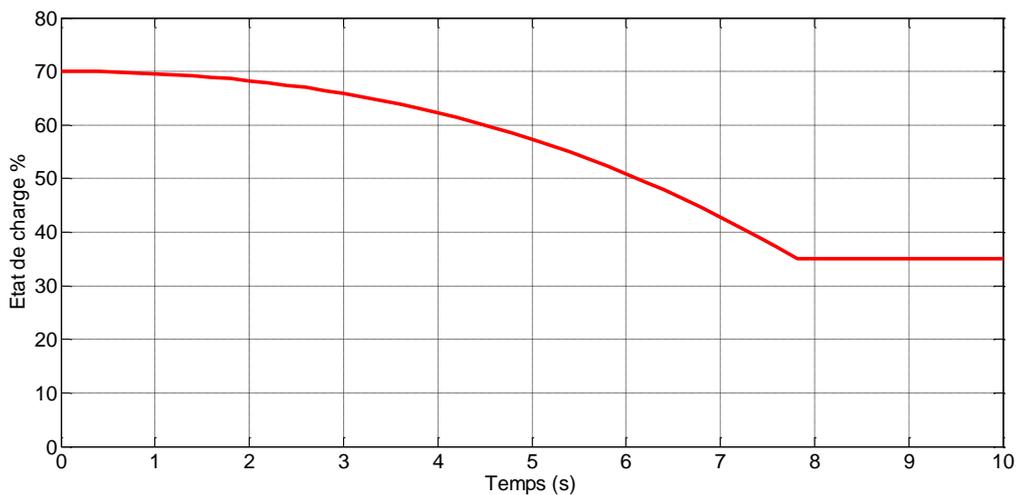


Figure II.20 l'état de charge de la batterie en fonction de temps

❖ L'influence de la température sur la capacité et la tension de la batterie

Pour la capacité

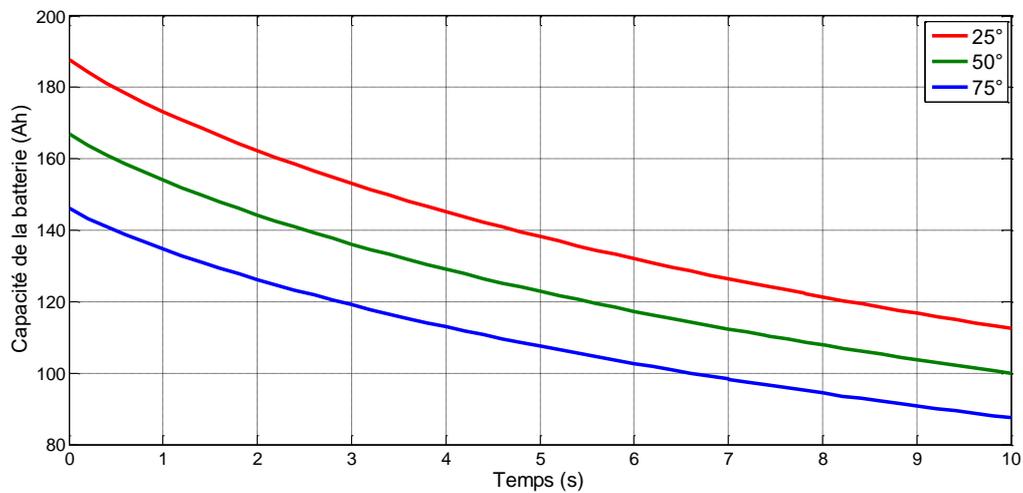


Figure II.21 Influence de la température sur la capacité de la batterie

Pour la tension de la batterie

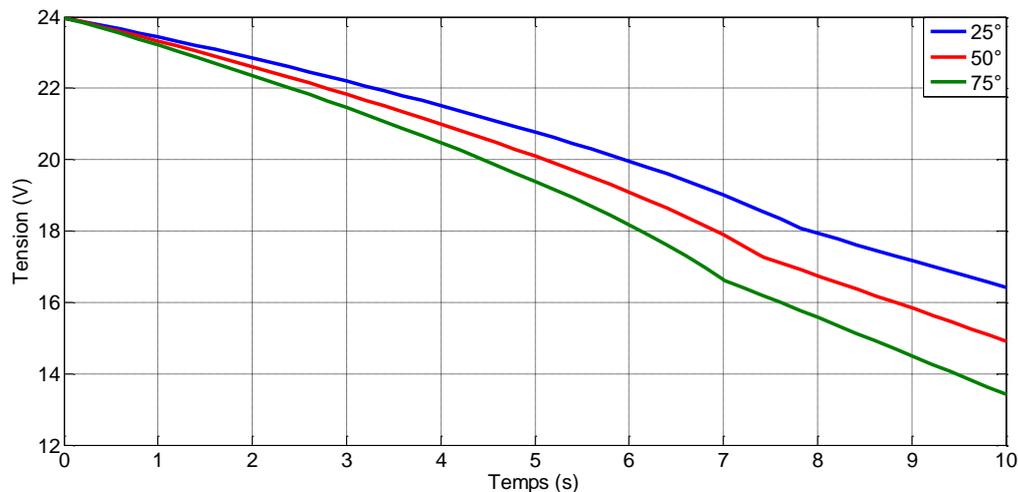


Figure II.22 influence de la température sur la tension de la batterie

- ✓ A partir de la figure II.20, initialement la batterie étant chargée à 70%, elle se décharge jusqu'à atteindre le EDC_{min} imposé à 35%.
- ✓ D'après la figure II.21, on remarque que L'augmentation de la température est inversement proportionnelle à la capacité de la batterie
- ✓ De la figure II.22, à chaque augmentation de la température, la tension de la batterie diminue, alors y'a une relation inverse entre la tension et la température de la batterie.

La température agit de sorte à réduire les performances de la batterie (la capacité, la tension de la batterie) par conséquent, la durée de vie de la batterie est réduite

II.6 Modélisation du véhicule électrique

Le véhicule électrique est un système complexe constitué de composants très variés de nature différentes (mécanique, électrique, électromécanique...) en interaction son comportement est donc sensible à toute variation des caractéristiques de l'un des composant à travers ces interactions. Afin de pouvoir le modéliser un bilan des efforts appliqué doit être effectué

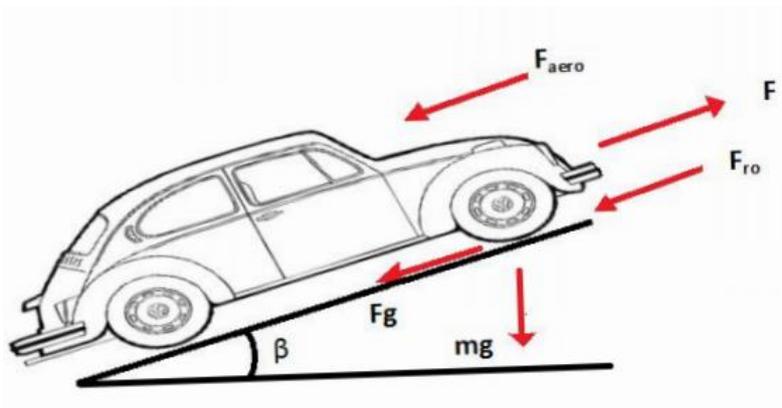


Figure II.23 Représentation des forces agissant sur le véhicule

A partir de la figure ci-dessus, on distingue les forces suivantes ;

- Force de résistance au roulement (F_{ro}) due principalement à la friction des pneus du véhicule sur la route. Cette force agit dans le sens opposé du déplacement du véhicule. Elle est donnée par l'équation :

$$F_{ro} = mg * f_{ro} * \cos(\beta) \quad (\text{II.60})$$

- Force résistante à la pénétration dans l'air (F_{aero}) engendrée par le frottement de l'air sur l'ensemble de la carrosse du véhicule en se déplaçant. Son expression est :

$$F_{aero} = \frac{1}{2} * \rho_{air} * A_f * C_d * V_e^2 \quad (\text{II.61})$$

- Force résistante due à la pente à gravir (F_g) qui est proportionnelle à la masse m du véhicule et dépend de la pente de la route. Son expression est :

$$F_g = mg * \sin(\beta) \quad (\text{II.62})$$

La force résistive totale est donnée par l'équation suivante :

$$F_r = F_g + F_{aero} + F_{ro} \quad (\text{II.63})$$

L'équation du mouvement est donnée par :

$$m \frac{dV_e}{dt} = F - F_r \quad (\text{II.64})$$

Dont F est la force de traction du véhicule électrique, elle est assurée par le moteur.

- ✓ Si $F - F_r > 0$ le véhicule accélère
- ✓ Si $F - F_r < 0$ le véhicule décélère

Le couple mécanique du véhicule électrique est donné par l'expression suivante :

$$T_r = F_r \frac{r}{G_r} \quad (\text{II.65})$$

r : c'est le rayon de la roue et G_r le gain du réducteur qui relie le moteur à l'axe de rotation

II.7 Conclusion

Ce chapitre a été consacré à la modélisation des composants d'un véhicule électrique à système de stockage hybride (Batterie/Pile à combustible).

Pour la partie motorisation nous avons choisie dans la modélisation du moteur roue, un moteur de type synchrone à aimants permanents.

Pour le système de stockage nous avons choisis une pile à combustible de type PEM avec une batterie de type plomb-acide. On a réalisé le modèle de chaque composant sous Matlab Simulink.

Dans le prochain chapitre nous allons assembler tous les composants dans un système afin de réaliser une étude sur la gestion d'énergie dans le véhicule électrique

III.1 Introduction

Dans ce chapitre nous allons présenter en premier lieu les résultats de simulation d'un véhicule tout électrique avec une seule source de stockage (batterie) ensuite nous allons utiliser deux sources d'énergie (batterie et pile à combustible) avec une méthode de gestion ainsi qu'une présentation des résultats sous Matlab Simulink.

III.2 Profil de vitesse

Un cycle de conduite représente en général un ensemble de points de vitesse véhicule en fonction du temps. Il est utilisé pour évaluer la consommation de l'énergie et les émissions de polluants d'un véhicule d'une manière normalisée, de sorte que les différents véhicules puissent être comparés entre eux.

Il existe deux types de cycles de conduite, les cycles modaux comme le cycle Européen "NEDC" ou Le Japonais "10-15 mode" et les cycles transitoires comme le FTP-75 ou le cycle Artemis. La différence principale est que les cycles modaux sont une compilation d'accélération linéaire et de périodes à vitesse constante et ne sont pas représentatifs du comportement d'un vrai conducteur, alors que les cycles transitoires comportent de nombreuses variations de vitesse, typiques des conditions de conduite sur route. [29]

Le NEDC par exemple est un cycle de conduite automobile consistant en une simulation d'une durée de 20 minutes (19 min et 40 secondes pour être précis) sur un trajet de 11 km. Il se divise en 2 parties urbaine et extra-urbaine composées chacune d'accélération et de décélérations ainsi que de paliers de vitesse constante. (Figure III.1)

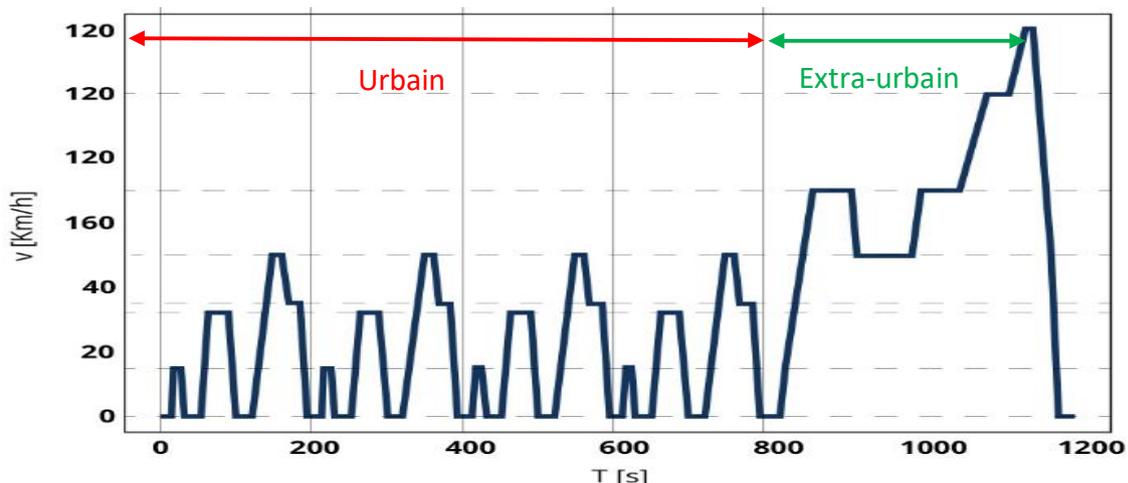


Figure III.1 Le nouveau profil de vitesse européen

Chapitre III : Gestion d'énergie électrique dans un VEH

III.2.1 Simulation du système d'un véhicule électrique pour un profil de vitesse

Dans cette partie du travail, un profil de vitesse est appliqué au système global du VE, sur une durée de 10s. Un profil qui montre les scénarios de traction (accélération, décélération et arrêt)

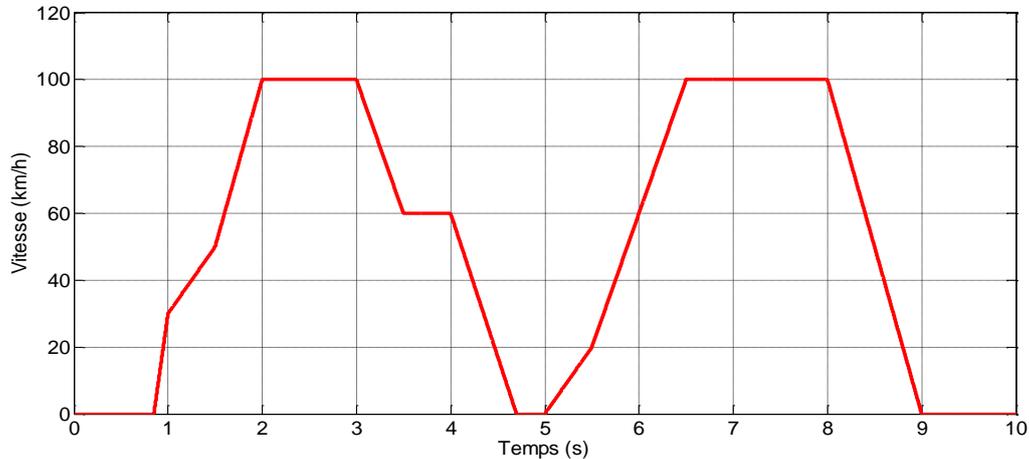


Figure III.2 Profil de vitesse appliqué

Le principe de ce cycle est un « scénario » constitué d'accélération, de décélération et de paliers à vitesse constante sur une durée. La vitesse à tout moment doit être maintenue dans un certain écart de tolérance autour de la consigne.

L'application d'un profil de vitesse au système globale du VE, impose une modification sur ce système global présenté dans la figure (III.3), le couple de charge est maintenant variable en fonction du profil de vitesse, le système global approprié à cette simulation est le suivant :

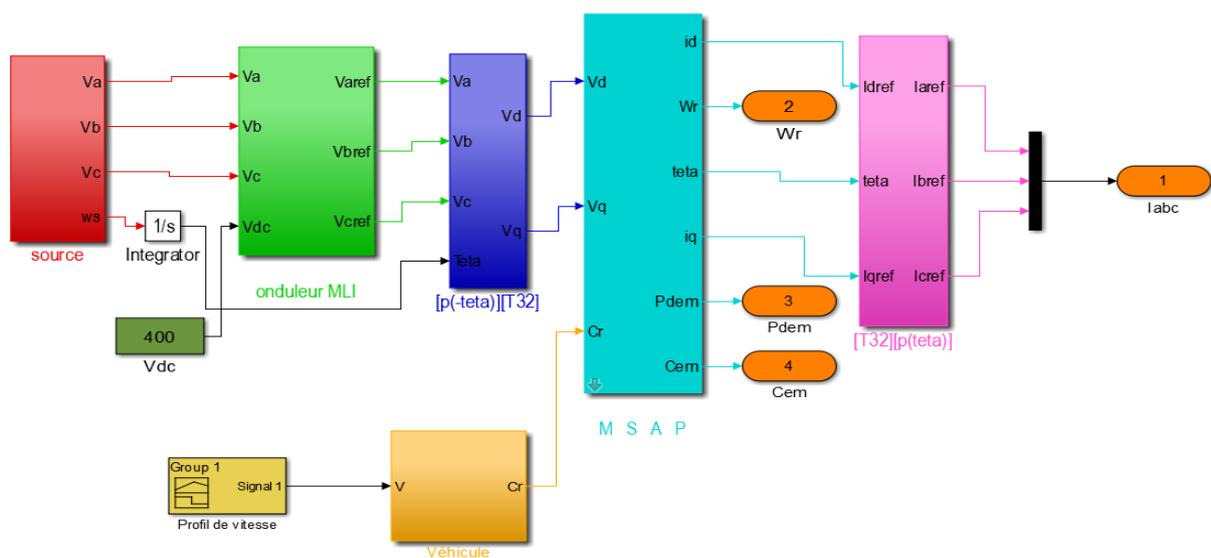


Figure III.3 Le système global de VE

III.2.2 Résultats de simulation

La simulation du modèle globale du VEH avec un cycle vitesse nous a donnés les résultats suivants :

L'allure de la puissance générée par le véhicule est présentée dans la figure ci-dessous :

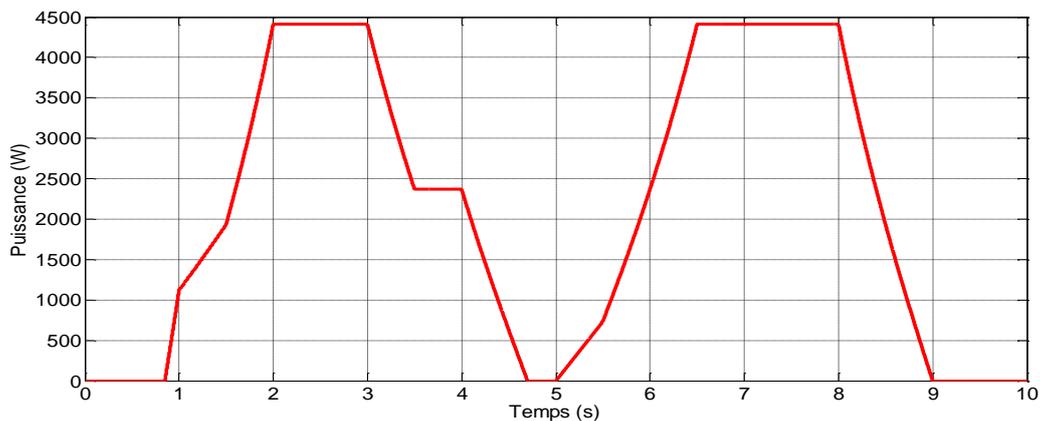


Figure III.4 La puissance du VE

L'allure de couple de véhicule est présentée dans la figure ci-dessous :

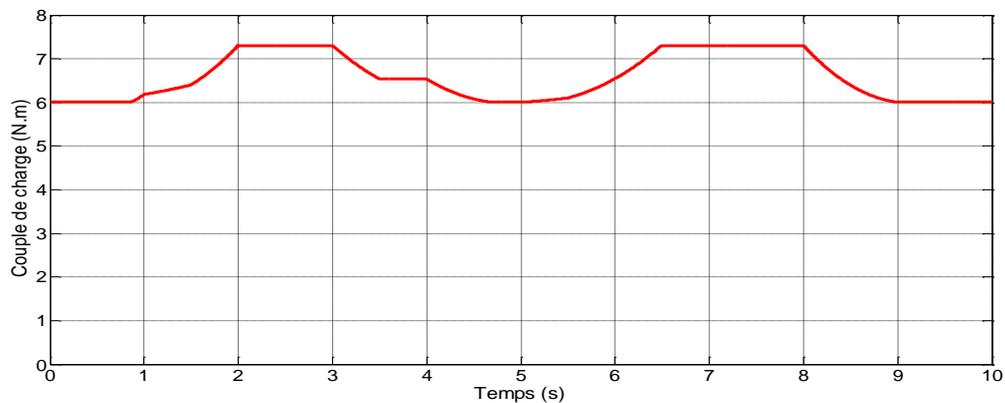


Figure III.5 Le couple de la VE

On remarque que la puissance et le couple du VE suivent le profil de vitesse

III.3 Alimentation d'un véhicule électrique avec un système de stockage (batterie)

Un véhicule tout électrique contient un moteur électrique alimenté par une batterie d'accumulateur, comme montré sur la figure ci-dessous :

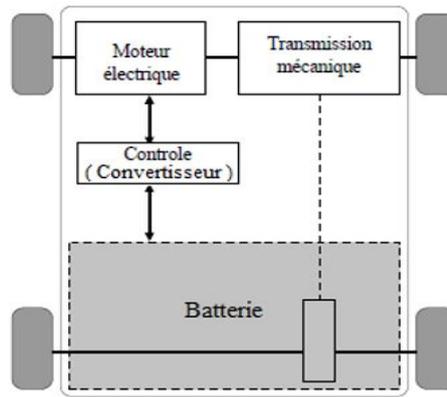


Figure III.6 Véhicule électrique à batteries

La batterie d'accumulateur fournit l'énergie pour le moteur dans le but d'assurer son déplacement normal, les batteries sont-elles même rechargées soit par un câble depuis une source électrique extérieur ; soit par récupération de l'énergie en cours de roulement grâce au freinage régénératif. Dans ce cas le moteur fonctionnant en mode générateur d'électricité.

III.3.1 Simulation d'un véhicule électrique alimenté par batterie

A l'aide de Matlab Simulink, le schéma bloc global à étudier est représenté par la figure (III.7) :

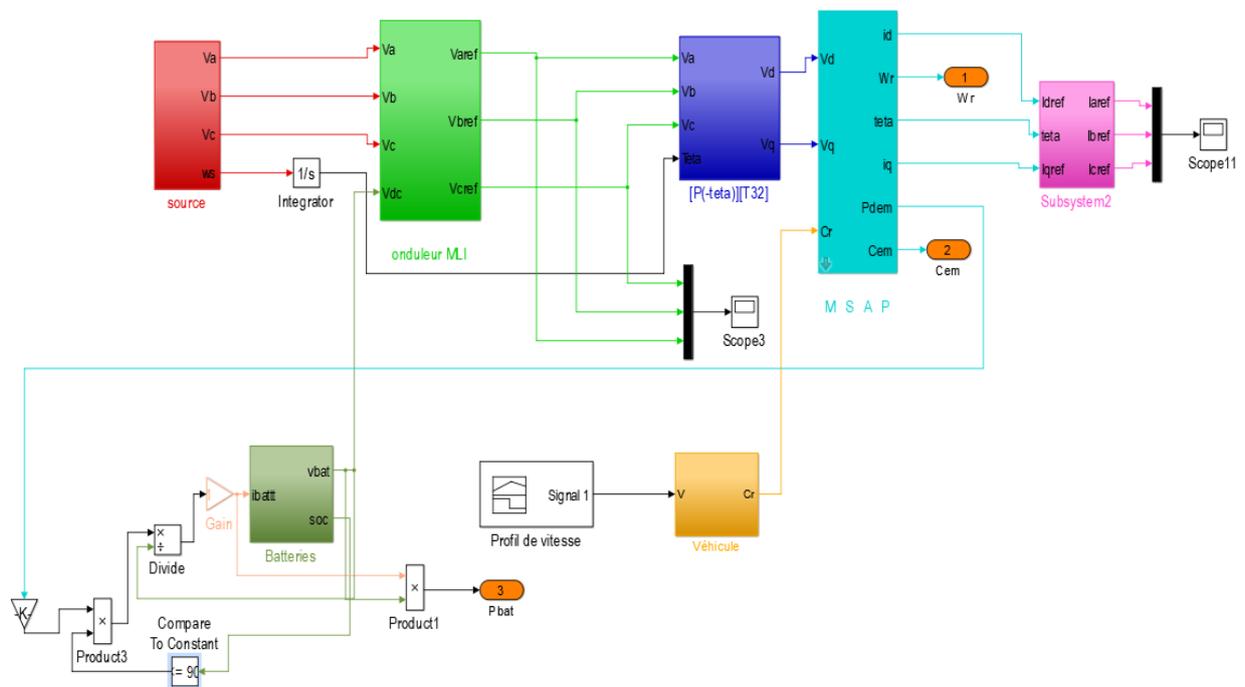


Figure III.7 Système global d'un VE alimenté avec batterie

Chapitre III : Gestion d'énergie électrique dans un VEH

La simulation du système nous a permis d'obtenir les résultats suivants :

a) La tension de la batterie

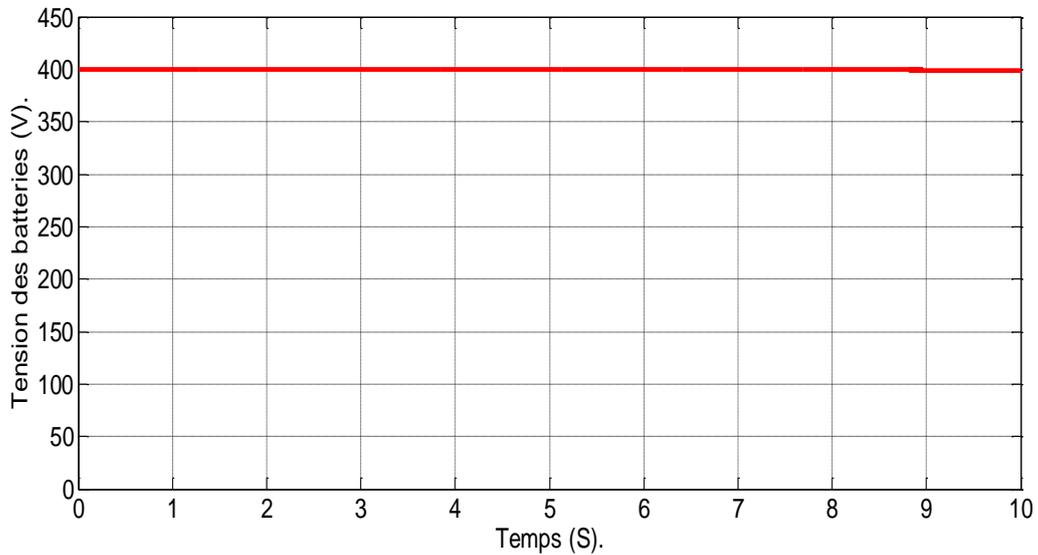


Figure III.8 Allure de la tension des batteries

La tension des batteries est presque constante et égale à 400 V

Un zoom est appliqué

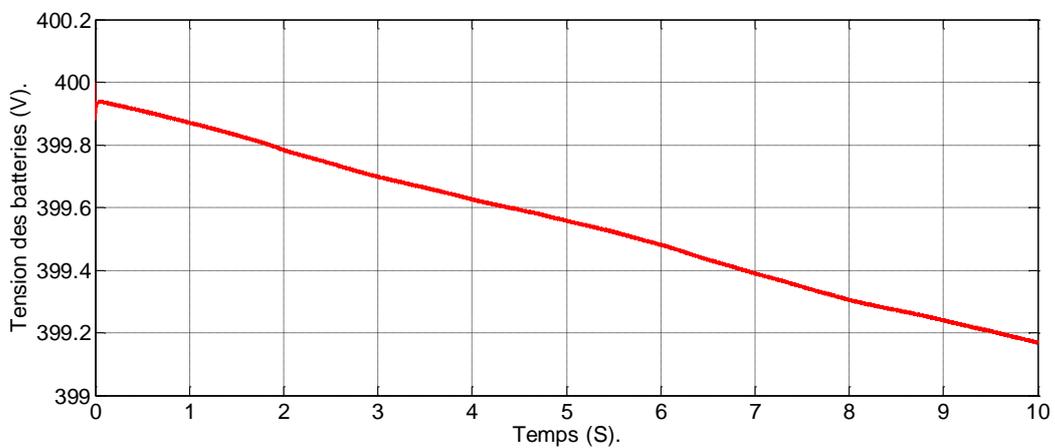


Figure III.9 La variation de la tension des batterie

On remarque une diminution légère de la tension des batteries

b) L'allure de l'état de charge de la batterie

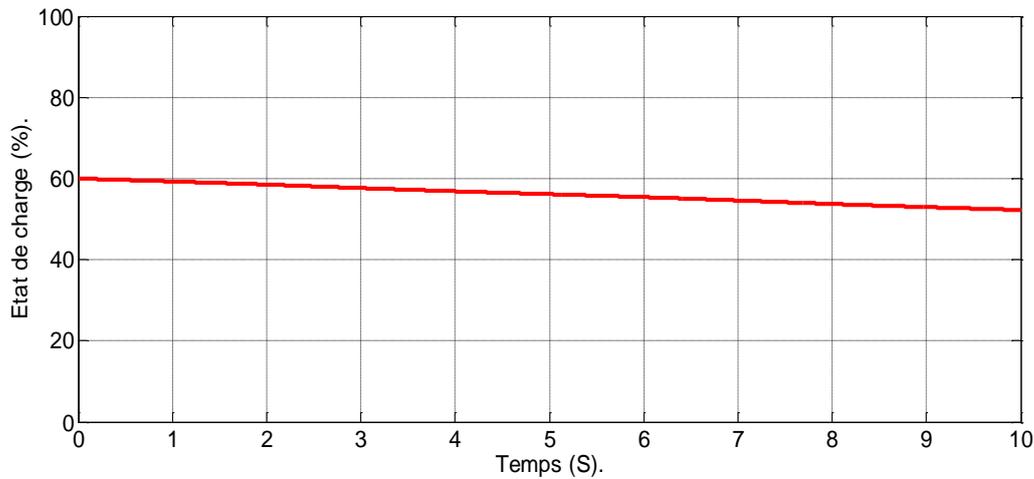


Figure III.10: L'état de charge de la batterie.

On remarque que la batterie se décharge (une diminution de l'état de charge) est cela est dû à son utilisation pour l'alimentation de véhicule électrique.

c) L'allure de l'état de charge de la batterie

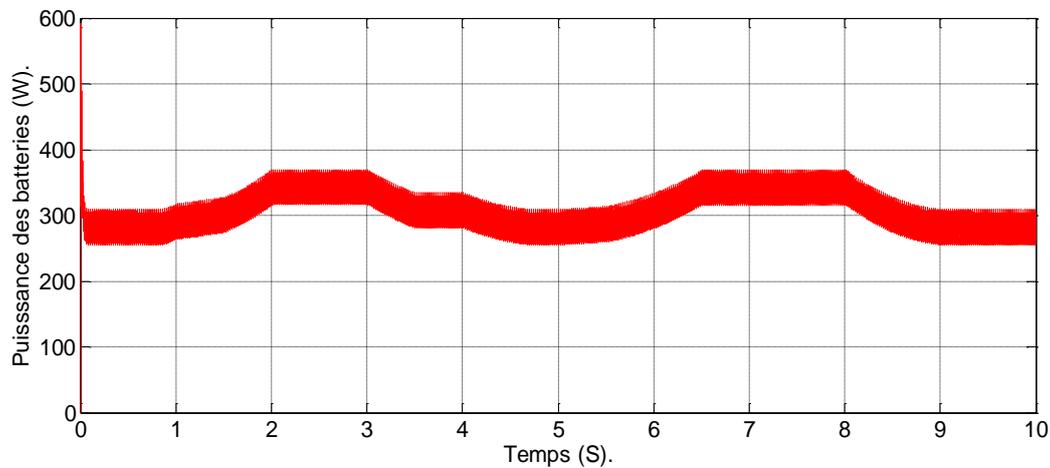


Figure III.11 La puissance délivrée par les batteries.

On remarque que la puissance débitée par les batteries n'est pas suffisante pour l'alimentation de véhicule électrique.

III.4 Alimentation du VE par une Source d'Énergie Hybride (SEH)

Comme il a été souligné lors de l'étude de l'alimentation du VE par les batteries seules, le dimensionnement des batteries par rapport à la puissance est très contraignant et offre peu de degrés de liberté en vue de l'optimisation de la source d'énergie. De plus, il est pratiquement impossible, dans la plupart des cas, de récupérer toute l'énergie au freinage, à cause des

contraintes technologiques (particulièrement, le faible régime de charge des batteries). Ainsi, dans le but de récupérer intégralement cette énergie et d'exploiter au mieux les caractéristiques des systèmes de stockage d'énergie, nous proposons dans cette partie l'étude d'une solution hybride (pile à combustible/batterie).

L'idée générale de ce principe d'hybridation des systèmes de stockage d'énergie est basée sur le respect des natures essentiels de deux sources d'énergie l'une est réversible en courant et l'autre est irréversible. Sur cette base nous allons dimensionner les composants de la SEH en considérant que la pile à combustible est une source primaire d'énergie qui assure à la fois l'alimentation de la charge la recharge de la batterie pendant que la batterie assure la compensation de la puissance de la charge. Cependant, la présence de deux sources nécessite la détermination de la part de mission destinée à chacune d'elles. Ceci peut être établi par une stratégie de gestion de l'énergie, qui assure la distribution de la puissance avec la prise en compte des caractéristiques et les conditions d'exploitation des sources.

III.5 Présentation de la méthode de la gestion d'un véhicule électrique à système de stockage hybride (batterie/PAC)

La fonction principale de la gestion d'énergie consiste à répartir les flux entre les sources d'énergie. Elle doit permettre une utilisation optimale des différentes sources d'énergie/puissance à bord du véhicule.

La gestion de l'énergie à bord du véhicule dépend de plusieurs facteurs : la topologie de la chaîne de traction du véhicule, le taux d'hybridation, l'autonomie en énergie électrique, le profil de vitesse appliqué et la technologie du stockage d'énergie.

Le système hybride étudié comporte une source d'énergie (pile à combustible) ; un élément de stockage (une batterie) ; une machine synchrone à aimant permanent.

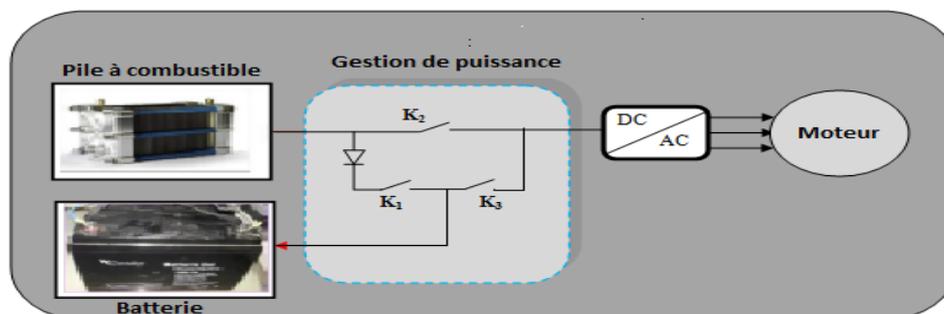


Figure III.12 Schéma électrique global du VE à système de stockage hybride [26]

Chapitre III : Gestion d'énergie électrique dans un VEH

Les trois interrupteurs que comporte le système de gestion (Figure III.6) nous donnent trois modes de fonctionnement possible du groupe motopropulseur qui sont :

- ❖ **Mode de traction** : C'est un mode qui permet le déplacement de véhicule, pour obtenir ce mode il est nécessaire d'avoir une demande de puissance à l'instant t_2 supérieur ou égale à celle de l'instant t_1 (instant précédant). Le tableau suivant résume les différents cas du mode

Tableau III.1 Les différents cas du mode de traction d'un VE [26]

Cas		Puissances
Mode de traction		
Premier cas	PAC alimente VE	$P_{dem} > 0, P_{pile} > 0$ et $P_{Batt} = 0$
Deuxième cas	PAC et Batteries alimentent ensemble le VE	$P_{dem} > 0, P_{pile} > 0, P_{Batt} > 0$
Troisième cas	Batteries alimentent seules le VE	$P_{dem} > 0, P_{pile} = 0, P_{Batt} > 0$
Quatrième cas	PAC alimente les VE et recharge les batteries	$P_{dem} > 0, P_{pile} > 0, P_{Batt} < 0$

- ❖ **Mode de freinage** : Le mode de freinage est un mode où la demande de puissance du véhicule est négative, dans ce cas la source de puissance (PAC) ne fournit aucune puissance et la source auxiliaire (batterie) stocke l'énergie produite par le freinage. Le tableau présente les cas du freinage

Tableau III.2 Les cas du mode de freinage d'un VE [26]

Cas		Puissances
Mode de freinage		
Premier cas	Pas de puissance	$P_{dem} = 0, P_{PAC} = 0, P_{Batt} = 0$
Deuxième cas	Les batteries récupèrent l'énergie cinétique de freinage et reçoivent également l'énergie des PAC.	$P_{dem} < 0, P_{PAC} > 0, P_{Batt} < 0$

- ❖ **Mode d'arrêt** : Le véhicule est dit en mode d'arrêt lorsque la puissance demandée est nulle, dans ce cas la source principale et secondaire ne fournissent aucune puissance pour la traction. Les cas du mode arrêt sont

Tableau III.3 Les cas du mode arrêt d'un VE [26] :

Cas		Puissances
Mode d'arrêt		
Premier cas	Pas de puissance	$P_{dem} = 0, P_{Pile} = 0, P_{Batt} = 0$
Deuxième cas	PAC recharge les batteries	$P_{dem} = 0, P_{Pile} > 0, P_{Batt} < 0$

Chapitre III : Gestion d'énergie électrique dans un VEH

Avec :

$$P_{charge} = P_{bat} + P_{PAC} \quad (III.1)$$

$$\Delta P_{charge} = P_{PAC} - P_{charge} \quad (III.2)$$

Où : ΔP_{charge} est la variation de la demande de puissance requise par le véhicule électrique.

Les états de commutation des interrupteurs pour obtenir ces modes de fonctionnement sont présentés dans le tableau suivant (Tableau III.4)

Tableau III.4 Différent mode de fonctionnement d'un VE à SSH [26] :

Interrupteurs			Puissances			EDC	Etat de véhicule	Modes
K ₁	K ₂	K ₃	P _{pile}	P _{Batt}	P _{charge}			
0	0	0	0	0	0	=EDC _{min}	Arrêt	3
0	0	0	0	0	$\Delta P_{dem} < 0$	=EDC _{max}	Freinage	2
1	0	0	$0 < P_{pile} < P_{dem}$	P _{pile}	0	<EDC _{max}	Arrêt	3
					$\Delta P_{dem} < 0$		Freinage	2
0	1	0	$P_{Pile} \geq P_{dem}$	0	$P_{dem} = P_{Pile}$	>EDC _{min}	Traction	1
1	1	0	$P_{Pile} > P_{dem}$	$P_{Pile} - P_{dem}$	$P_{dem} = P_{Pile} > 0$	<EDC _{max}	Traction	1
0	0	1	0	P _{Batt}	$P_{dem} = P_{Batt} > 0$	>EDC _{min}	Traction	1
0	1	1	$0 < P_{Pile} < P_{dem}$	P _{Batt}	$P_{dem} = P_{Batt} + P_{Pile} > 0$	>EDC _{min}	Traction	1

III.5.1 L'organigramme de gestion d'énergie du véhicule électrique à système de stockage hybride (PAC/batteries)

Le système de gestion d'énergie présenté est réalisé selon le fonctionnement d'un véhicule électrique à système de stockage hybride, ce système n'est pas fait par rapport à la dynamique du véhicule, il utilise un algorithme simple basé sur une logique de seuil, son objectif est de commander les sources d'énergie d'une manière à assurer les besoins de la charge (machine électrique). Le système de gestion fonctionne de la manière suivante [27] :

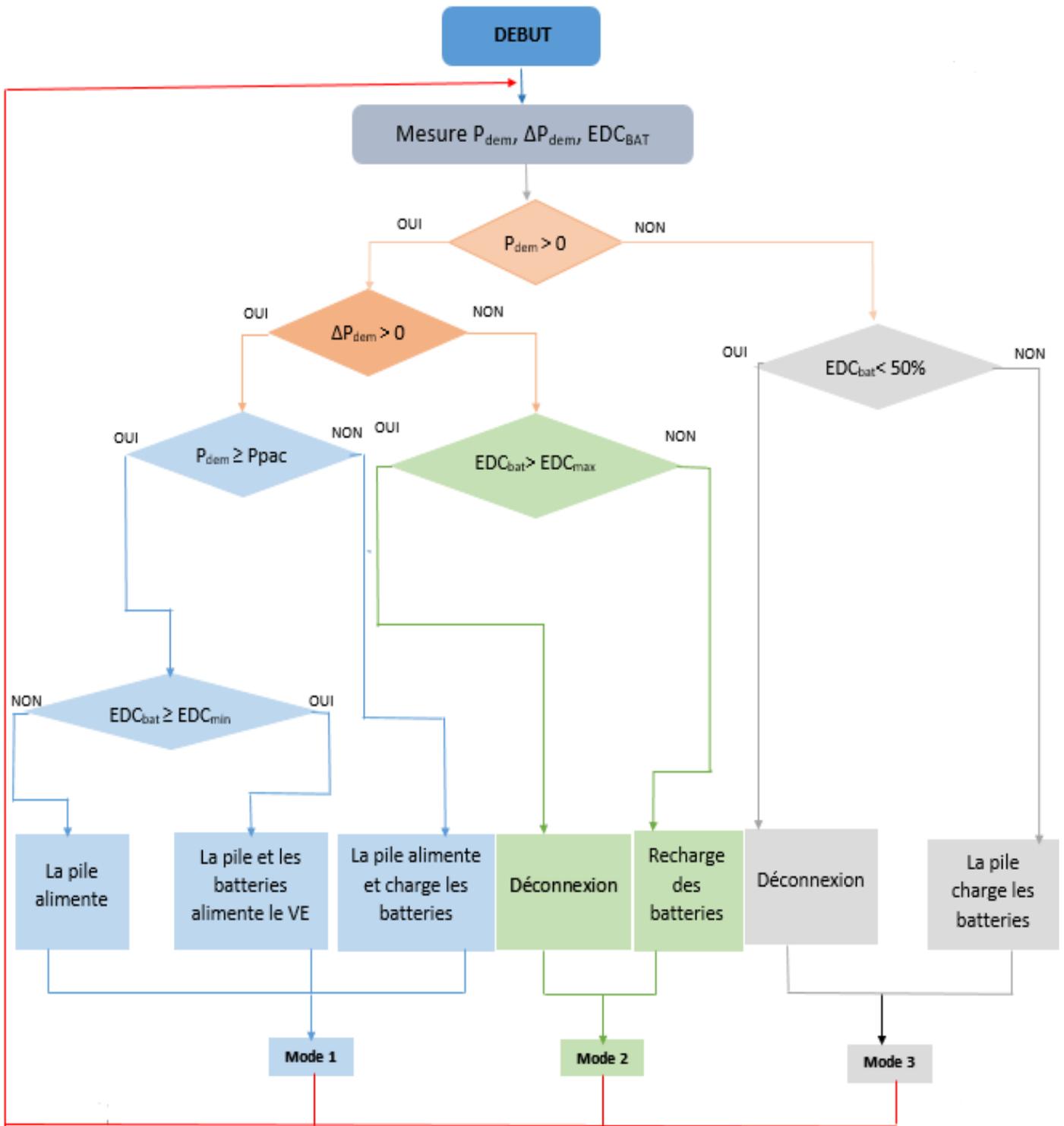


Figure III.13 Organigramme de gestion des puissance dans un véhicule électrique hybride

III.5.2 Simulation générale appliqué au système de gestion globale du VEH

La figure III.14 présente le modèle global du véhicule électrique hybride étudié, simulé sous MATLAB Simulink.

Chapitre III : Gestion d'énergie électrique dans un VEH

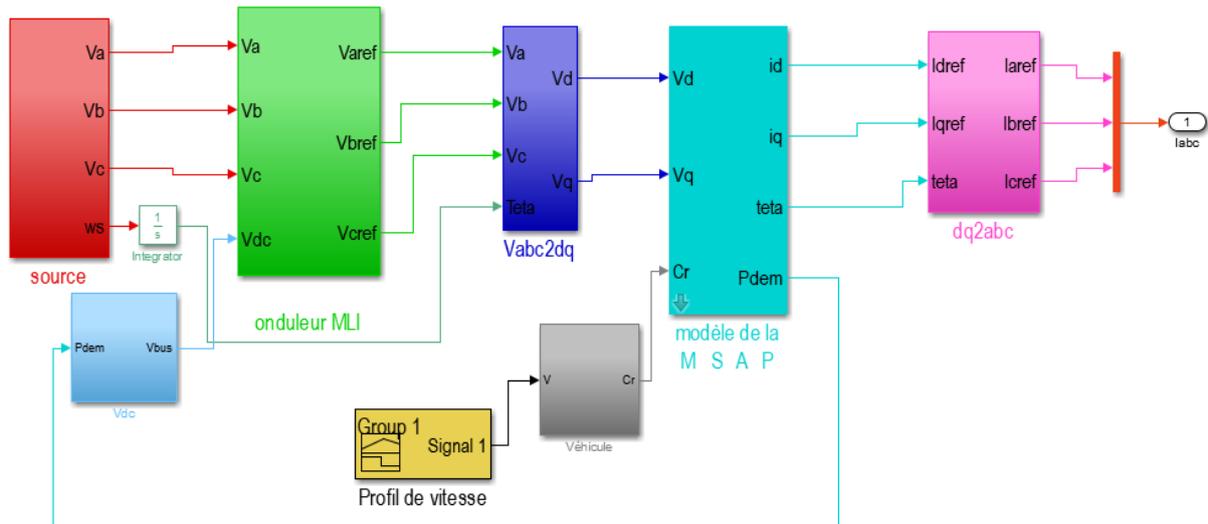


Figure III.14 Système globale du Véhicule électrique hybride

III.5.3 Résultats de simulation

Après simulation, nous avons obtenus les résultats suivants

a) L'allure de couple de charge et du couple électromagnétique

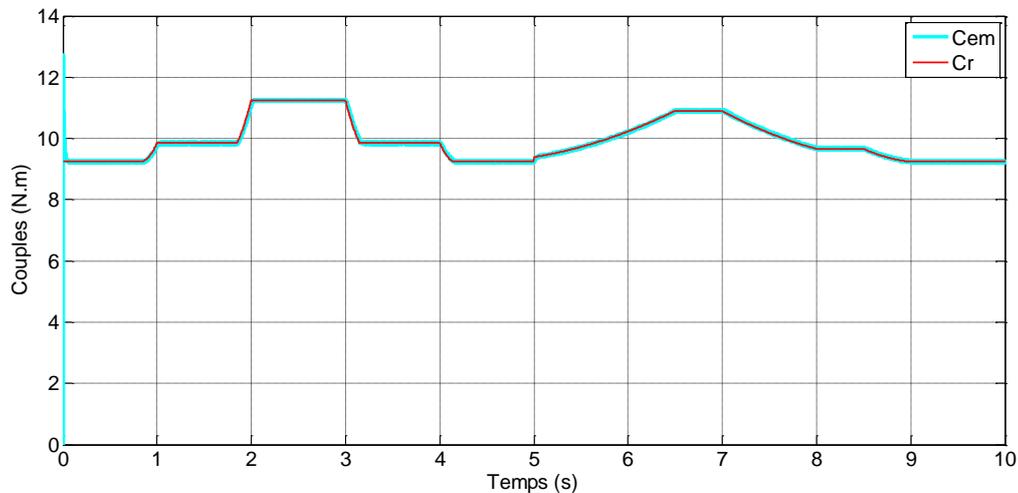


Figure III.15 Allure du couple de charge et couple électromagnétique

A partir de la figure III.15 on voit que le couple appliqué à la machine (Cr) est identique avec le couple électromagnétique (Cem) généré par le moteur

b) L'allures des puissances

L'équation d'équilibre est donnée par : $P_{dem} = P_{pac} \pm P_{bat}$

Lors de la traction $P_{dem} = P_{pac} + P_{bat}$ (alimentation par source hybride)

Chapitre III : Gestion d'énergie électrique dans un VEH

Lors du freinage $P_{dem} = P_{pac} - P_{bat}$ (récupération de l'énergie de freinage pour la recharge des batterie)

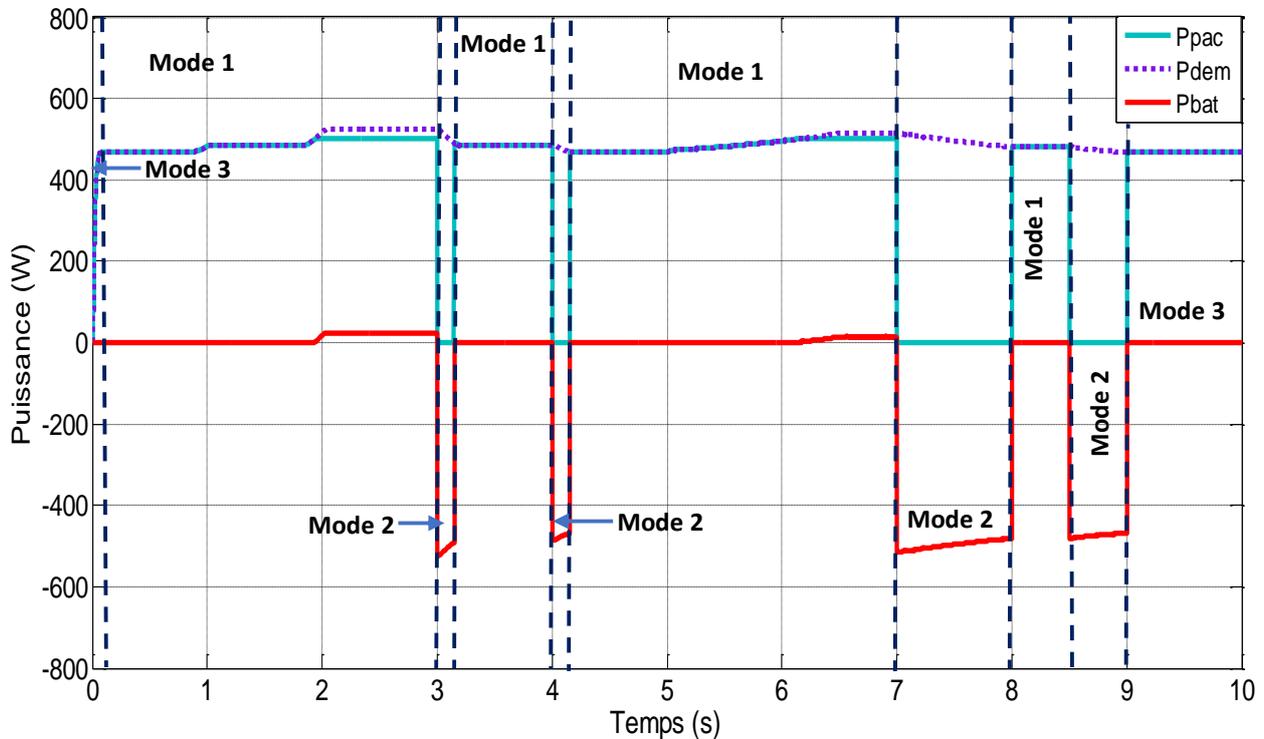


Figure III.16 Allure des puissances

La figure montre la variation des puissances du VEH en fonction du temps, on remarque que les trois modes de fonctionnement du véhicule sont visibles sur la courbe (mode arrêt, mode freinage et mode traction).

La puissance demandée par le moteur (P_{dem}) varie entre 450 W et 550 W, pendant que la pile à combustible fournit une puissance de 500 W

- ❖ Lorsque $P_{dem} \leq 500$ W, $P_{dem} = P_{pac}$. C'est la pile à combustible qui alimente le véhicule pendant que $P_{bat} = 0$
- ❖ Lorsque $P_{dem} > 500$ W, $P_{dem} = P_{pac} + P_{bat}$. Le véhicule est alimenté par la batterie et la pile à combustible au même temps (batterie sollicitée).
- ❖ Lors de freinage, $P_{dem} = P_{pac} - P_{bat}$. Les batteries se rechargent avec l'énergie cinétique récupérée pendant le freinage, et $P_{pac} = 0$

c) Les résultats de simulation des batteries

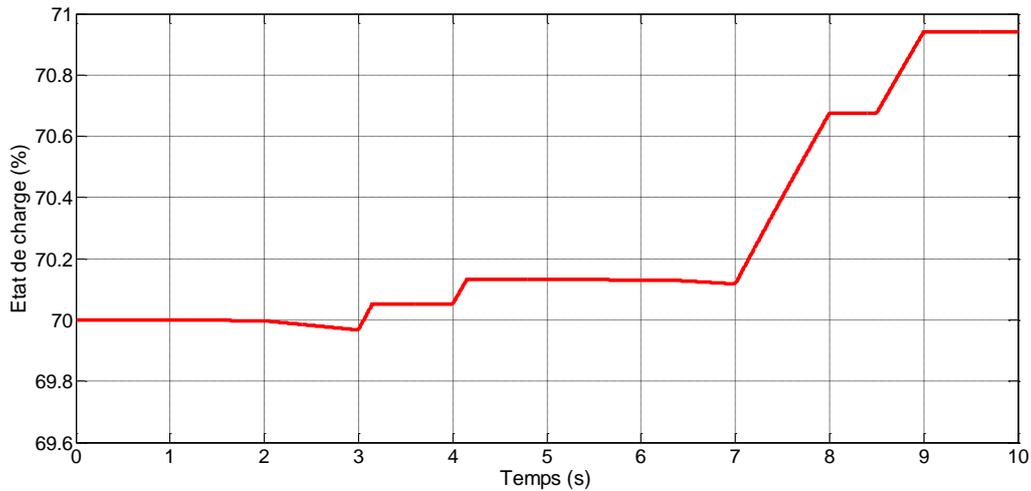


Figure III.17 L'allure de l'état de charge des batteries

La figure III.17 montre l'état de charge des batteries, lorsqu'elles ne fournissent aucune puissance. L'état de charge reste constant, lors des fortes demandes de puissance les batteries se déchargent, et pendant le freinage ces dernières se chargent avec l'énergie récupérée

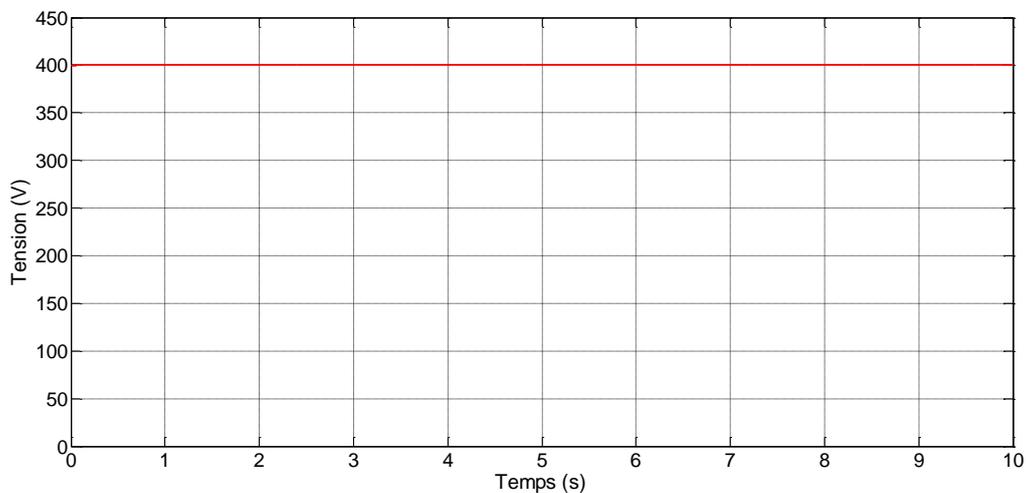


Figure III.18 Tension de la batterie

La figure III.18 montre que la tension délivrée par la batterie pour l'alimentation du véhicule électrique est presque constante et elle est égale à V_{dc}

Un zoom est fait sur l'axe de la tension montre l'allure sur la figure suivante :

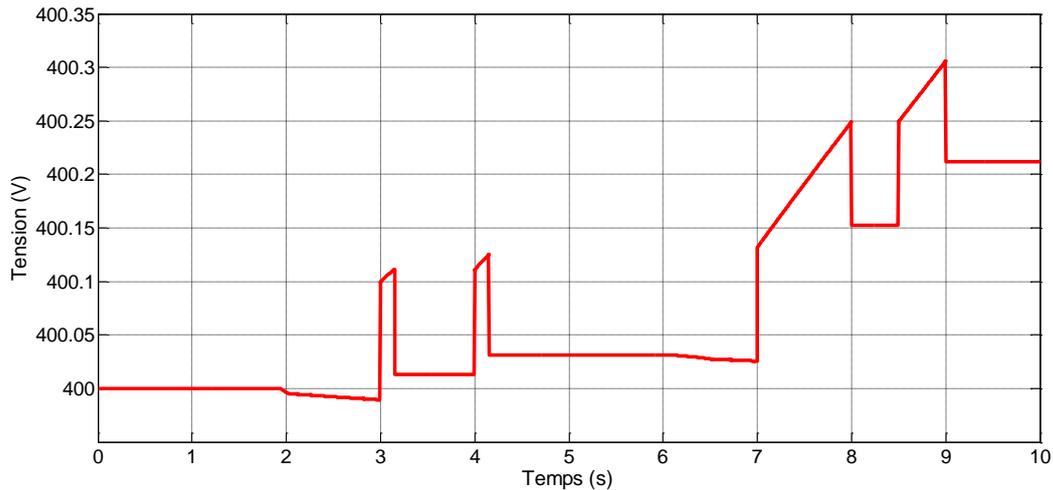


Figure III.19 Tension des batteries zoomée

La variation sur la figure III.13 montre les différents modes de fonctionnement de véhicule électrique

L'augmentation est dû au freinage (récupération d'énergie)

La diminution est dû à la forte demande de puissance par le moteur ($P_{dem} > P_{pac}$)

Pour la partie constante c'est ou $P_{dem} \leq P_{pac}$

III.6 Conclusion

Un véhicule électrique hybride à pile à combustible fournit de l'énergie pour la traction par un système pile à combustible associé à un élément de stockage qui est le système à batteries.

La gestion des puissances à bord est essentielle pour pouvoir suivre le flux de puissance demandée par le moteur et la recharge des batterie ce qui conduit à une bonne recyclabilité donc amélioration de leur durée de vie.

Conclusion générale

Le principal objectif de ce travail était de proposer une amélioration au système de stockage d'un véhicule électrique afin d'avoir une bonne autonomie et une bonne repense à la forte demande de puissance.

L'étude des caractéristiques de chaque source de stockage d'énergie nous a permis de démontrer qu'une seule source n'est pas suffisante dans ce type d'alimentation, ce qui a conduit à l'hybridation des sources de stockage.

L'hybridation étudiée s'agit d'une mixité d'une source d'énergie qui est la pile à combustible (source primaire), et une source de puissance c'est la batterie (source secondaire).

Une méthode de gestion des puissances a été proposée afin d'arriver à une amélioration, cette dernière est basée sur l'état de trois interrupteurs, elle permet de gérer les différentes sources (PàC, batteries), c'est un système simple, flexible et facile à implémenter.

En perspective de ce travail il sera intéressant de faire :

- ✓ Production d'hydrogène et recharge des batteries par énergie renouvelable (panneaux photovoltaïques)
- ✓ Une proposition d'un système de gestion d'énergie basé sur les méthodes d'intelligence artificielle
- ✓ Une commande des machines à boucle fermée afin d'avoir de meilleurs résultats (commande vectorielle, DTC ...)
- ✓ Une étude sur un profil de vitesse réel (NEDC, WLDC...) sur une longue durée (20 minutes).

Annexe A**A.1 Paramètres du moteur synchrone à aimant permanent**

Paramètres	Symbole	valeurs	Unité
Résistance statorique	R_s	2.875	Ω
Inductance directe	L_d	$8.5 \cdot 10^{-3}$	H
Inductance quadratique	L_q	$8.5 \cdot 10^{-3}$	H
Flux statorique	Phi	0.175	Wb
Moment d'inertie	J	$0.8 \cdot 10^{-3}$	$\text{kg} \cdot \text{m}^2$
frottement	f	0.00001	N
Nombre de paires de pôles	P	4	/

A.2 Paramètres de la pile à combustible [32]

Paramètre	Symbole	valeur	Unité
Température de fonctionnement de la pile	T_{pac}	298.15	K
Pression partielle de l'oxygène	P_{cath}	0.02	atm
Pression partielle de l'hydrogène	P_{anode}	0.01	atm
Surface active de la pile	A	16	cm^2
Epaisseur de la membrane	l	230	μm
Résistance équivalente de contact à la conduction des électrons	R_c	0.0003	Ω
constant empirique qui dépend du type de la pile et de son état de fonctionnement.	B	0.016	V
Densité de courant maximale	J_{max}	0,04934375	A/cm^2
Teneur de l'eau dans la membrane.	λ	14	/
coefficients paramétriques appropriés à chaque modèle de PàC.	ε_1 ε_2 ε_3 ε_4	-0.9514 $3.12 \cdot 10^{-3}$ $-1.87 \cdot 10^{-4}$ $7.4 \cdot 10^{-5}$	/

Annexes

A.3 Paramètre de véhicule électrique

Paramètre	symbole	Valeur	Unité
La masse de la voiture	m	150	kg
La surface frontale du véhicule	A_f	1	m^2

Annexe B : les convertisseurs DC/DC

B.1 Hacheur survolteur

Connu aussi sous le nom de « Boost » ou hacheur parallèle ; son schéma de principe de base est celui de la figure (B.1). 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.

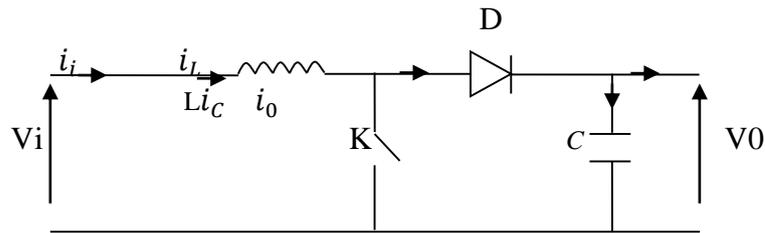


Figure B.1 : Schéma de principe d'un convertisseur survolteur.

Ce dispositif électronique de puissance qui est un convertisseur continu-continu, nous permet d'adapter la tension aux bornes 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 :

$$V_{pv} = L \frac{di_L}{dt} \quad (B.1)$$

$$0 = C \frac{dV_{ch}}{dt} + I_{ch} \quad (B.2)$$

Lorsque l'interrupteur (K) est ouvert :

$$V_{pv} = L \frac{di_L}{dt} + V_{ch} \quad (B.3)$$

$$I_L = C \frac{dV_{ch}}{dt} + I_{ch} \quad (B.4)$$

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 .

$$V_{ch} = \frac{1}{1-\alpha} V_{pv} \quad (B.5)$$

$$I_{ch} = (1 - \alpha)I_L \quad (\text{B.6})$$

B.2 Hacheur dévolteur (série)

Ce nom est lié au fait que la tension moyenne de sortie V_s est inférieure à celle de l'entrée V_i . Il comporte un interrupteur à amorçage commandé (transistor, bipolaire, transistor MOS ou IGBT...) et en série avec la source (Figure B.2) et une diode de roue libre. Le cycle de fonctionnement de période de hachage T , comporte deux étapes. Lors de la première, on rend le MOSFET passant et la diode polarisée en inverse, est bloquée. Cette phase dure de 0 à αT . Lors de la seconde, on bloque le MOSFET. La diode devient passante. Cette phase dure de αt à T [08].

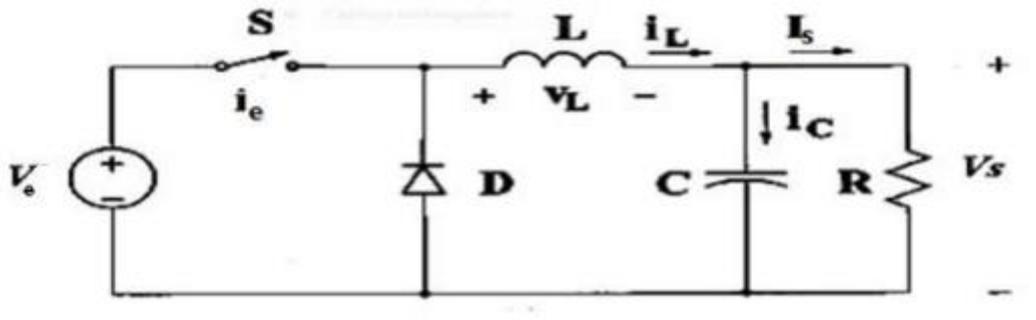


Figure B.2 : Schéma de principe d'un hacheur série

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

$$\begin{cases} V_s = \alpha V \\ I_s = \frac{1}{\alpha} I_e \end{cases} \quad (\text{B.7})$$

Avec : $\alpha = \frac{t_f}{T}$

Listes des références

- [1] <https://voiture.kidioui.fr/lexique-automobile/tout-electrique.html>, date de consultation : 15/06/2020
- [2] <https://sites.google.com/site/waag78/la-voiture-dans-sa-complexite/fonctionnement-de-la-voiture-electrique> ; date de consultation : 15/06/2020
- [3] <https://www.ecoconso.be/fr/content/voiture-electrique-ses-avantages-et-inconvenients> ; date de consultation : 20/06/2020
- [4] Messaoud MOHAMMEDI, « gestion de l'énergie pour une chaîne multi-sources », Thèse de doctorat, Université Mouhamed KHIDER Biskra, 2016
- [5] <https://www.proximus.be/pickx/fr/1751733/lhydrogene-carburant-davenir> ; date de consultation : 21/06/2020
- [6] Hattab MAKER, « Optimisation et gestion d'énergie pour un système hybride : association pile à combustible et supercondensateur », thèse de doctorat, Université de technologie BELFORT Montbéliard, 2008
- [7] Rochdi TRIGUI, « Approche systématique pour la modélisation, la gestion de l'énergie et l'aide au dimensionnement des véhicules hybride thermique-électrique », thèse de doctorat, université des sciences et technologie de Lille, 2011
- [8] LHOMME Walter, « Gestion d'énergie de véhicule électrique hybride basé sur la représentation énergétique macroscopique, thèse de doctorat, Université et de technologie de Lille 2007
- [9] Gwenaëlle SOUFFRAN, « Dimensionnement de la chaîne de traction d'un véhicule électrique hybride basé sur une modélisation stochastique de ses profils de mission », thèse de doctorat, Ecole doctorale science et technologie de l'information et de mathématique, 2012.
- [10] Bernard MULTON et Jean-Marie PETER, « Le stockage de l'énergie électrique moyens et applications », synthèse de la journée d'étude SEE clubs 13 et 11 du 1^{er} février 1996 au CNAM PARIS, école nationale supérieure de Cachan antenne de Bretagne
- [11] Rania MKAHL, « contribution à la modélisation, au dimensionnement et à la gestion des flux énergétique d'un système de recharge de véhicule électrique : étude de
-

Références Bibliographique

l'interconnexion avec le réseau électrique », thèse de doctorat, université de technologie de Belfort –Mont Belliard 2015.

[12] Nicolas MARC, « méthodologie de dimensionnement d'un véhicule hybride électrique sous contrainte de minimisation des émissions de CO₂ », thèse de doctorat, université d'Orléans, 2013.

[13] Denis CANDUSSO, « hybridation du groupe électrogène à pile à combustible pour l'alimentation d'un véhicule électrique », thèse de doctorat, institut National polytechnique de Grenoble ,2002.

[14] Souad ZEGHOUANI, Hicham SLIMANI « étude d'un véhicule électrique (PAC/supercondensateur) », mémoire master, université de Béjaïa, 2017/2018.

[15] Jérôme BERNARD, « véhicules hybride à pile à combustible : dimensionnement et stratégie de commande », thèse de doctorat, université de valenciennes et du Hainaut-Cambrésis ,2007.

[16] H BEN AHMED, B MULTON, G ROBIN, M RUELLAN, « le stockage de l'énergie dans les applications stationnaire », revue technologique-sciences et techniques industrielle, Mars 2005.

[17] I MOYSAN, « le stockage embarqué de l'hydrogène », 2004/2005.

[18] Alireza PAYMAN, « contribution à la gestion de l'énergie dans les systèmes hybrides multi-source, multi-charge », thèse de doctorat, l'institut national polytechnique de LORRAINE, 2009.

[19] Nicolas ALLALI, « Convertisseurs haut rendement à dimensionnement réduit pour batterie hybridée puissance/énergie de véhicule électrique : principe de source de courant contrôlée », thèse de doctorat, Centrale Lille, 2016

[20] Kamillia ABDELLAOUI, Saloua BELAID, « Etude de l'autopilotage d'une machine synchrone à aimant permanent », mémoire master, université de Bejaia, 2017/2018

[21] Toufik REKIOUA, « Contributions à la modélisation et la commande vectorielle des machines synchrones à aimants permanent », thèse de doctorat, Institut national polytechnique Lorraine, 1991

Références Bibliographique

- [22] Rezak ALKAMA, « Cours de stockage de l'énergie et pile à combustible », Université de Bejaia 2019/2020
- [23] F. AMROUCHE (USTHB), B. MAHMAH (CDER), H. BENMOUSSA, Université Hadj Lakhder, « Modélisation d'une pile à combustible PEMFC alimentée directement en hydrogène-oxygène et validation expérimentale », revue énergie renouvelable, 2005
- [24] Mathieu BRESSEL, « modèle dynamique de pile à combustible à membrane échangeuse de protons et identification paramétriques », article scientifique, institut UMR, université de Lille-Science technologie, 2015
- [25] D.REKIOUA, E.MATAGNE, « Optimization of photovoltaic power systems », Livre, Springer-Verlag London Limited, 2012
- [26] Z. MOKRANI, D. REKIOUA, N. MEBAREKI, T. REKIOUA, S. BACHA, « Proposed energy managment strategy in electric vehicule for recovering power excess produced by fuel cells », Article de presse, Laboratoire LTII, Département génie électrique, Université de Bejaia, 2017
- [27] Nasser Eddine, « Gestion en temps réel d'un système multi-sources à énergie renouvelable en fonctionnement autonome », thèse de doctorat, Département génie électrique, université de Bejaïa, 2019
- [28] <http://www.fiches-auto.fr/articles-auto/consommation/s-1980-differences-entre-les-cycles-nedc-et-wltp.php> ; date de consultation : 28/09/2020
-