

République algérienne démocratique et populaire
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
Université Abderrahmane Mira – Bejaia



Faculté de Technologie
Département génie électriques

MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du diplôme de

Master

Filière : électrotechnique

Spécialité : commande électrique

Thème

Étude Comparative des Différentes Stratégies de Gestion d'Énergie

Préparé par :

BOUANANI Youba

Encadré par :

Mr. MEBARKI Nasser-Eddine

Année universitaire: 2021/2022



Remerciement

A l'issue de ces années de travail, le moment est venu pour remercier sincèrement toutes les personnes qui m'ont entourée et qui ont participés, de près ou de loin, à la réalisation de ce modeste mémoire :

Nous remercions avant tout le dieu tout puissant qui nous a guidées sur le droit chemin durant toutes nos années d'études.

Je voudrai exprimer mes remerciements à mon encadreur Mr **MEBARKI Nacer-Eddine** pour les orientations et les conseils qu'il a su me prodiguer durant l'évolution de mon projet.

Je remercie les membres de jury qui ont présidé et 'examiné ce modeste travail.

Mes remerciements s'adressent aussi à tous les enseignants qui se sont donnés à fond, afin de nous assurer une bonne formation.

A tous et à toute, un grand merci !



Dédicace

Je souhaite de tout mon cœur, avec l'aide de Dieu tout puissant que ce mémoire soit à la hauteur.

Je dédie cet humble travail comme signe de reconnaissance :

En premier lieu à A mes très chers parents qui m'ont guidé durant les moments les plus pénibles de ce long chemin, Ma mère qui a été à mes côtés et ma soutenu durant toute ma vie, Et mon père qui a sacrifié toute sa vie afin de me voir devenir ce que je suis.

À mes deux très chères grand-mères.

À mon très cher grand-père.

À mon cher frère et sœurs.

À tous mes oncles et tantes, ainsi que mes Cousins et cousines sans oublier tous mes ami(e)s

Et mes ami(e)s de promotion (2017-2022) et tous les étudiants du département génie électrique.

Liste des symboles

I_{pac} : le courant de la pile à combustible

A_{cell} : la surface active d'une membrane

V_{act} : Polarisation d'activation

V_{ohm} : Polarisation ohmique

V_{conc} : Polarisation de concentration

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

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

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

$C_{O_2}^*$: Les concentrations de l'oxygène (mol/cm^3)

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

$\kappa_{H_2O}^{Sat}$: La fraction molaire de saturation de l'eau dans le gaz humidifié

P_{anode} : est la pression de l'hydrogène l'anode.

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

R_M : Est la résistance équivalente de la membrane à la conduction des protons

r_M : est la résistance spécifique de la membrane

I : est l'épaisseur de la membrane (μm)

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

J_{max} : est la densité de Courant maximale

E_s : la tension de (n) piles unitaires reliées en séries

V_{bat} : La tension de la batterie

I_{bat} : le courant de la batterie

E_b : la f.é.m. (force électromotrice) d'une cellule de la batterie

R_{bat} : Sa résistance interne

C_{bat} : la capacité de la batterie

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

Q_m : la quantité de charge manquante à la batterie

θ : Caractérise la position angulaire du rotor par rapport au stator

F_{tire} : Force de résistance au roulement

F_{aero} : Force résistante à la pénétration dans l'air

m : la masse totale du véhicule en 'kg'

g : la gravité en 'm/s²'

f_{ro} : la constante de la force de résistance due au déplacement

ρ_{air} : La densité de l'air en 'kg/m³'

A_f : la surface frontale du véhicule 'm²'

C_d : le coefficient de traînée aérodynamique

V_e : la vitesse du véhicule en 'm/s'

β : l'angle de pente de la route en 'rad'

F_r : force résistive

P_v : La puissance mécanique du véhicule électrique

T_r : le couple moteur

G : représente le gain du réducteur qui relie le moteur à l'axe

ϕ_{s0} : Le vecteur flux à l'instant $t = 0$

ϕ_s : Le flux statorique

θ_s : La position du vecteur flux statorique

T_e : le couple électromagnétique

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

PEMFC : piles à membrane échangeuse de protons.

ENernst : La tension instantanée de Nernst.

VEH : Véhicule électrique hybride

ME : Machine électrique

MAS : Machine Asynchrone

EPI : Train Epicycloïdal

MT : Moteur Thermique

Liste des figures

Fig. I. 1 : Voiture électrique « La Jamais contente ».....	04
Fig. I. 2 : Voiture hybride « La Semper Vivus».....	04
Fig. I. 3 : Structure d'une voiture électrique.....	05
Fig. I. 4: Principe architectures hybrides.....	06
Fig. I. 5 : Architectures hybrides moteur thermique/batterie.....	07
Fig. I. 6 : Architecture séries.....	08
Fig. I. 7 : Architecture parallèles.....	09
Fig. I. 8 : Architecture séries-parallèles.....	10
Fig. I. 9 : Hybride à dérivation de puissance type Toyota.....	11
Fig. I. 10: Structure mild-hybrid.....	12
Fig. I. 11 : Différents modes de fonctionnement d'une structure full-hybrid	13
Fig. II. 1 : Diagramme de Ragone.....	19
Fig. II. 2 : Principe de fonctionnement d'une pile à combustible PEMFC.....	21
Fig. II. 3 : Rendement de la pile à combustible.....	22
Fig. II. 4 : Schéma de principe de la pile à combustible PEM.....	23
Fig. II. 5 : Fonctionnement d'une batterie.....	25
Fig. II. 6 : EDC d'un VEHR utilisant une stratégie de contrôle de type déterministe.....	31
Fig. II. 7 : Fonctions et degrés d'appartenance de la logique floue.....	32
Fig. III.1 : schéma équivalent d'une PEMFC.....	35
Fig. III.2 : schéma équivalent de n_b éléments de la batterie.....	39
Fig. III. 3 : Présentation des axes statoriques et rotoriques.....	41
Fig. III.4 : Représentation des axes statorique et rotorique dans le repère (d, q).....	43
Fig. III. 5 : Représentation de la machine asynchrone dans repère biphasé [37].....	43
Fig. III. 6 : Représentation des forces agissant sur le véhicule.....	47
Fig. III.7 : Onduleur triphasé et sa charge.....	49
Fig. III.8 : Elaboration des vecteurs V_s (S_a, S_b, S_c) à partir de l'onduleur de tension.....	50
Fig. III.9 : Exemple de l'évolution de l'extrémité de ϕ_s pour $V_s=V_3$	50
Fig. III.10 : Schéma fonctionnel de la DTC	52
Fig. III.11 : bloc de simulation du système étudié.....	53
Fig. III.12 : L'organigramme de gestion d'énergie.....	54
Fig. III.13 : Profile de vitesse de référence en Km/h.....	55
Fig. III.14 : Profile de la puissance demandée.....	56

Fig.III.15 : Couple électromagnétique de la machine asynchrone.....	56
Fig.III.16 : Profile de toutes les puissances du système VE.....	57
Fig.III.17 .Etat de décharge des batteries.....	57
Fig.III.18 : Allure des courants statoriques triphasés.....	58
Fig.III.19 :Flux statorique dans le domaine temporel et circulaire.....	58

Liste des tableaux :

TAB. II.1 : Caractéristiques des différents types de PAC

TAB. II.2 : Résume les performances du super-condensateur et de la batterie

Tables des matières

Remerciements

Dédicaces

Liste des symboles

Liste des figures

Liste des tableaux

Table des matières

Introduction générale.....01

Chapitre I : Systèmes hybrides pour véhicules électriques

I.1.introduction

I-2- Technologie automobile : de la genèse aux innovations Technologiques..... 03

I-2-1 –véhicules électriques..... 05

I-2-2-véhicules électriques hybrides..... 06

I-2-2-1-généralités..... 06

I-2-2-2- La gestion de l'énergie dans les VEH..... 07

I-2-2-3- Les familles d'architectures de VEH..... 07

I-2-2-3-1-architecture série..... 08

I-2-2-3-2-Architecture parallèle..... 09

I-2-2-3 -3 -architecture mixte : série-parallèle..... 09

I-2-2-3-4- architecture dérivation de puissance..... 10

I-2-2-4-Classification des véhicules hybrides..... 11

I-2-2-4-1- Véhicule micro-hybrid..... 11

I-2-2-4-2-Véhicule mild-hybrid..... 12

I-2-2-4-3-Vehicule full-hybrid..... 13

I-2-2-4-4-Vehicule Plug-in hybrid..... 14

I-2-2-5-véhicule hybride à pile à combustible..... 14

I-2-2-6-Avantages et inconvénients de l'hybride pour véhicules électriques..... 14

I-2-2-6-1-avantages..... 14

I-2-2-6-2-inconvénients 14

Tables des matières

I.3.conclusion.....	15
---------------------	----

Chapitre II : stratégie de gestion d'énergie

II.1. Introduction.....	16
-------------------------	----

II.2. Sources d'énergie embarquée dans les véhicules hybrides électriques.....	16
--	----

II.2.1. Pile à combustible	19
----------------------------------	----

II.2.1.1 Généralités	19
----------------------------	----

II.2.1.2. Principe de fonctionnement.....	20
---	----

II.2.1.3. Caractéristique électrique de la pile à combustible.....	21
--	----

II.2.1.4. Rendement d'une pile combustible.....	21
---	----

II.2.1.5. La pile à combustible à membrane polymère (type PEM).....	22
---	----

II.2.1.6. Avantages et inconvénients de la Pile à combustible	23
---	----

II.1.6.1. Avantages	23
---------------------------	----

II.1.6.2. Inconvénients	24
-------------------------------	----

II.2. Accumulateurs	24
---------------------------	----

électriques

II.2.1. Stockage à long terme.....	24
------------------------------------	----

II.2.1.1. Batteries.....	24
--------------------------	----

a. Batterie Plomb-Acide.....	25
------------------------------	----

b. Batterie Lithium-ion.....	26
------------------------------	----

II.2.2. Stockage à court terme.....	26
-------------------------------------	----

II.2.2.1. Les super condensateurs	26
---	----

II.2.2.1.1. Généralités	26
-------------------------------	----

II.2.2.1.2. Principe de fonctionnement	27
--	----

II.2.3. Comparaison entre les batteries et le super condensateur.....	27
---	----

II.3. Problématique de gestion d'énergie dans les systèmes hybrides électriques.....	28
--	----

II.4. gestion d'énergie	28
-------------------------------	----

II.4.1. Stratégies de contrôle basées sur des règles	29
--	----

II.4.1.1.Approche déterministe	29
--------------------------------------	----

II.4.1.2. Approche par logique floue	31
--	----

II.5. conclusion	33
------------------------	----

Chapitre III : Modélisation et simulation du système étudié

III.1. Introduction.....	35
--------------------------	----

III.2. Modélisation de la pile à combustible type PEM	35
---	----

Tables des matières

III.2.1. Polarisation d'activation	36
III.2.2. Polarisation ohmique	37
III.2.3. Polarisation de concentration.....	38
III.3. Modélisation de la batterie	39
III.3.1. modelisation de la capacite C_{bat}	40
III.3.2. Équation de la tension de décharge	40
III.3.3. Équation de la tension de charge	41
III.4. Machine asynchrone.....	41
III.4. 1. Application de la transformée de Park à la machine asynchrone	42
III.4.2. Equations électriques de la machine asynchrone dans le repère α, β	45
III.5. Model mécanique du véhicule	46
III.6. La commande directe du couple	48
III.6.1. Contrôle du vecteur flux statorique	50
III.6.2. Contrôle du couple électromagnétique	51
III.6.3. Estimation du flux statorique	51
III.6.4. Estimation du couple électromagnétique	52
III.6.5. Élaboration des tables de commutation	52
III.6.6. Schéma général de la stratégie de contrôle DTC	52
III.7. simulation du système étudié	53
III.7.1. Organigramme de gestion d'énergie.....	54
III.7.2. Résultats de simulation	55
III.8. Conclusion.....	59
Conclusion générale.....	60
Bibliographie	

Tables des matières



Introduction générale

Sur notre planète, circulent aujourd'hui plus d'un milliard d'automobiles et les constructeurs produisent plus de 80 millions de nouveaux véhicules chaque année et cela, sans compter d'autres moyens de transport, dans leur quasi majorité, propulsés par des moteurs thermiques à énergie conventionnelle (essence et fioul)[1]. Imaginons un instant la quantité phénoménale de particules nocives de dioxyde de carbone dégagée, chaque jour, dans l'atmosphère, altérant notre mode de vie, modifiant sensiblement et négativement le climat.

Nous ne mettons pas l'accent, encore, sur les rejets industriels que la capacité de régénération de la Terre, considérable mais non infinie, ne peut absorber, si l'on rajoutait à ce sombre tableau, la tendance dans beaucoup de pays à couverture végétale, à une déforestation intensive, privant l'humanité d'une source de production naturelle d'oxygène. Face à cette situation, ce qui était hier une préoccupation secondaire, confortée par la volonté des États à améliorer toujours plus leurs taux de croissance et l'accès à une énergie relativement bon marché, la protection de l'environnement par un développement rationnel, durable qui tienne compte de la préservation de l'écosystème, devient alors une préoccupation prioritaire à l'échelle mondiale.[2]

Les opinions publiques, mieux informées des risques des changements climatiques par une littérature abondante, et la communauté scientifique s'émeuvent, se mobilisent, s'organisent et font pression sur les sphères décisionnelles politiques et économiques pour prendre les mesures adéquates pour contrecarrer cette menace et promouvoir la transition énergétique.

Les constructeurs automobiles ne sont pas en reste de cette évolution et anticipent déjà sur une demande considérable : ils investissent des sommes considérables dans la recherche et le développement de nouveaux prototypes de véhicules à traction énergétique hybride ou électrique. Des véhicules généraux « propres » voient le jour, sans cesse perfectionnés, utilisant deux ou plusieurs sources d'énergie.

Cette tendance, soutenue par les innovations technologiques et la mise au point de matériaux, combinant légèreté et sécurité de structure et de nouveaux supports de stockage et de production d'énergie (piles à combustible, condensateurs, batteries, convertisseurs, etc.), bénéficie d'un système embarqué de gestion de l'énergie électrique qui permet de rationaliser, de manière autonome, les flux d'énergie dans le véhicule en fonction des contraintes et des sollicitations auxquelles il doit s'adapter. Ce système de gestion de l'énergie constitue ainsi l'outil essentiel qui permet d'atteindre les performances attendues du véhicule hybride ou du système multi source, tout en puisant l'énergie électrique en circuit fermé, c'est-à-dire

minimiser les pertes énergétiques dues au fonctionnement du véhicule et optimiser l'apport des principales sources d'énergies disponibles.

L'objectif des travaux entrepris dans ce travail est de proposer une méthode de gestion de l'énergie adaptée aux systèmes multi-sources (notamment un véhicule hybride électrique) aptes à répondre à la demande d'énergie tout en respectant les différentes contraintes liées au fonctionnement de la chaîne énergétique du système et à la sécurité, afin de minimiser et d'optimiser la consommation de combustible par la source principale, permettant ainsi d'élever le niveau d'autonomie du système.

L'architecture de ce mémoire est structurée sur trois chapitres qui rendent compte successivement, du processus du déroulement des travaux. Le premier chapitre est consacré à l'histoire et à l'évolution des véhicules hybrides, les différents types de structure hybride mis au point et la stratégie de gestion de l'énergie développée pour chacun d'eux, ainsi que la classification des véhicules hybrides en fonction de son niveau d'hybridation qui dépend de l'importance de la partie électrique et de la façon dont elle est combinée avec le moteur thermique. A la fin on a présenté les différents avantages et inconvénients de l'hybride.

Dans le deuxième chapitre nous allons abordé les différentes Sources d'énergie embarquées dans les véhicules hybrides électriques dont la pile à combustible et les accumulateurs électriques la batterie et les super-condensateurs, après ça on a expliqué la problématique de gestion d'énergie embarqué dans les systèmes hybrides électriques ,Cet exposé nous permettra d'aborder, dans ce chapitre, les différentes approches de gestion de l'énergie, telles l'approche déterministe et l'approche par logique floue.

Le troisième chapitre sera consacré à la modélisation des éléments constituant le système étudié, qui comprend deux sources d'énergie de natures différentes (la pile à combustible et les batteries), la machine asynchrone et les éléments d'électronique de puissance, afin d'intégrer un organigramme de gestion d'énergie qui sert à alimenter la charge et maintenir les batteries en bon fonctionnement en appliquant la Commande Direct du Couple.

Une conclusion générale et quelques perspectives seront présentées en fin de cette ce mémoire.



Chapitre I :
**Systemes hybrides pour vehicules
électriques**

I-1.Introduction

Le premier chapitre est consacré à l'histoire et à l'évolution des véhicules hybrides, les différents types de structure hybride mis au point et la stratégie de gestion de l'énergie développée pour chacun d'eux, ainsi que la classification des véhicules hybrides en fonction de son niveau d'hybridation qui dépend de l'importance de la partie électrique et de la façon dont elle est combinée avec le moteur thermique. A la fin on a présenté les différents avantages et inconvénients des systèmes hybrides pour véhicules électriques.

I.2. Technologie automobile : de la genèse aux innovations Technologiques

La naissance puis le développement de la motorisation électrique et hybride remontent aux débuts de l'automobile ou les essais sur ce type de propulsion se sont avérés très prometteurs. Déjà en 1899, le record de vitesse a été atteint par une voiture électrique (105, 8 km/h), baptisée « La Jamais contente » (Fig. I.1). Cette voiture était alors équipée de deux moteurs de 25 kW, était alimentée par des batteries au plomb pour une autonomie totale de 85 km. Puis, fut mise au point la première voiture hybride associant une motorisation électrique et thermique dénommée « La SemperVivus » (Fig. I.2) qui utilisait un moteur électrique sur chacune des roues et dont la batterie est rechargée par une dynamo, elle-même alimentée par un moteur thermique. Malgré ces innovations majeures et leur potentiel technologique évident, ces premières voitures utilisant ce type de propulsion furent très vite délaissées et ne purent rivaliser avec les voitures à moteur thermique en raison de leur faible autonomie, de leur masse et de leur coût, alors qu'émergeait une nouvelle source d'énergie abordable, disponible et répandue, qui favorisa durablement la motorisation thermique.

Les efforts de recherche/développement se concentrèrent alors sur ce type de motorisation, d'autant plus que l'impact sur l'environnement des émanations polluantes générées par la combustion des hydrocarbures n'était pas, à l'époque, une préoccupation prioritaire comme elle allait le devenir à l'échelle mondiale des années plus tard.

Les choix industriels confortés par ces avantages se portèrent sur la motorisation thermique.

Il fallait surtout répondre à une demande en forte hausse : le parc automobile connaît alors un âge d'or qui n'est pas contrarié à ce jour alors même que l'attention des pouvoirs publics et de la société civile se focalise de plus en plus sur les dangers que la pollution de l'air fait peser sur notre fragile environnement. En outre, la forte dépendance du parc automobile au pétrole,

ressource limitée et non renouvelable conjuguée à sa cherté et l'épuisement progressive des gisements, exigeait des alternatives innovantes et à moindre impact sur le milieu naturel.

L'effort de recherche sur des motorisations moins nocives est devenu nécessaire pour reproduire, ce que l'esprit inventif de l'homme avait créé dès l'aube de l'automobile : la propulsion par l'énergie électrique et la propulsion hybride à plusieurs sources d'alimentation de puissance. C'est ainsi qu'apparait, à la fin des années 1980, une nouvelle génération de batteries plus performantes, de composants électroniques, de matériaux composites allégeant les véhicules et de techniques de gestion de la consommation de l'énergie, ce qui allait donner une impulsion dynamique à cette tendance au point où l'on prévoit de passer à une échelle industrielle, à l'instar de Toyota qui fait figure de précurseur dans ce domaine.

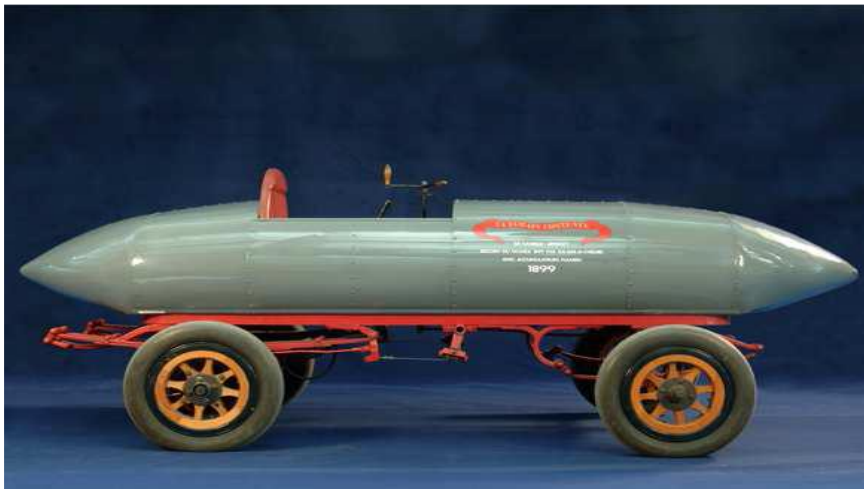


Figure I.1 : Voiture électrique « La Jamais contente »



Figure I. 2 : Voiture hybride « La Semper Vivus»

I.2.1. Véhicules électriques

Un véhicule électrique (Fig. I.3) possède un châssis spécifique dans lequel est logée une batterie de traction massive et de forte tension (FT) reliée à un chargeur, qui emmagasine l'énergie récupérée en vue de sa réutilisation. Ce chargeur comporte également des spécificités pour la transformation de l'énergie en force de propulsion, dont un convertisseur onduleur (convertisseur de puissance). Celui-ci reçoit les paramètres de multiples capteurs, des pédales d'accélérateur et de frein pour commander le moteur, et une batterie de 24 V (voire 48 V) nécessaire au bon fonctionnement des circuits de bord du véhicule, elle-même reliée par l'intermédiaire d'un convertisseur *DC/DC*. Ce convertisseur recharge la batterie au moyen de la batterie (FT) et alimente les dispositifs électriques. Le moteur du véhicule sert de convertisseur de l'énergie électrique en énergie mécanique lors des phases de traction et inversement, d'énergie mécanique en énergie électrique, lors des phases de freinage permettant ainsi la recharge de la batterie. Ce type de motorisation, au-delà du fait qu'il ne génère pas d'émissions polluantes, suppose que l'étape industrielle soit rentable et que soient réglés, au préalable, les problèmes inhérents aux coûts des véhicules, au recyclage des matériaux, de nouvelles chaînes de production, l'existence d'un marché attractif durable et d'un réseau étoffé de distribution d'énergie (bornes de recharge) à l'instar de celui en carburant pour les véhicules thermiques.

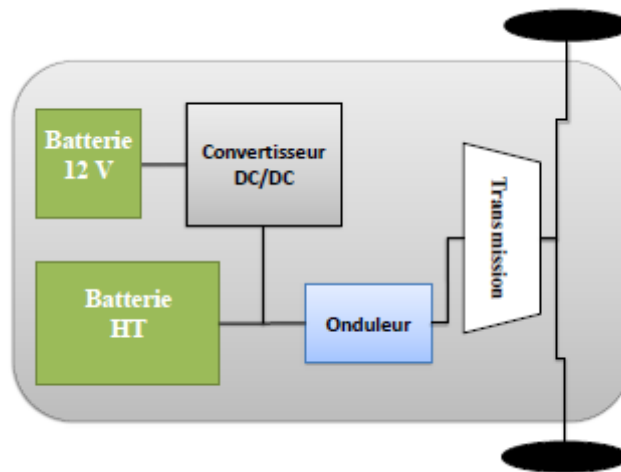


Figure I.3 : Structure d'une voiture électrique

Le choix porté pour ce moyen de transport semble toutefois irréversible tandis que se développe et se généralise simultanément une deuxième voie de recherche prometteuse axée sur l'utilisation non pas d'une seule source d'énergie mais de deux ou de plusieurs sources sur un même véhicule lui conférant ainsi un atout considérable : effectuer sans discontinuer des distances plus longues.

I.2.2.Véhicules électriques hybrides

I.2.2.1.Généralités

Un véhicule hybride est un véhicule équipé d'au moins deux sources différentes d'énergie (fig.I.4) Les véhicules hybrides les plus connus actuellement combinent un moteur thermique à essence et une motorisation électrique sans oublier que l'hybridation concerne aussi d'autres types carburants comme l'essence, le gazole, les biocarburants, le gaz naturel ou le GPL. Les véhicules utilisant alternativement des sources d'énergies différentes sont appelés bi-mode (ex : train diesel, électrique par caténaire). Généralement, au moins l'une des sources d'énergie est réversible et permettra de récupérer une partie de l'énergie cinétique s'il y a lieu. L'autre source d'énergie est souvent non réversible mais possède une forte capacité de stockage. Chaque source d'énergie est associée à un ou plusieurs transformateurs d'énergie lui-même réversible ou non. Dans ce manuscrit, nous traiterons majoritairement de véhicules hybrides associant un moteur thermique et son réservoir avec une batterie (BATT), et un ou plusieurs moteurs électriques (fig.I.5). D'autres sources peuvent cependant être utilisées, hydrogène (associé à une pile à combustible ou un moteur) ou gaz, par exemple pour la partie non réversible, des super-capacités (SC), un volant d'inertie ou un stockage pneumatique pour la source réversible. Cette source peut-elle même être hybride ; BATT+ SC par exemple.

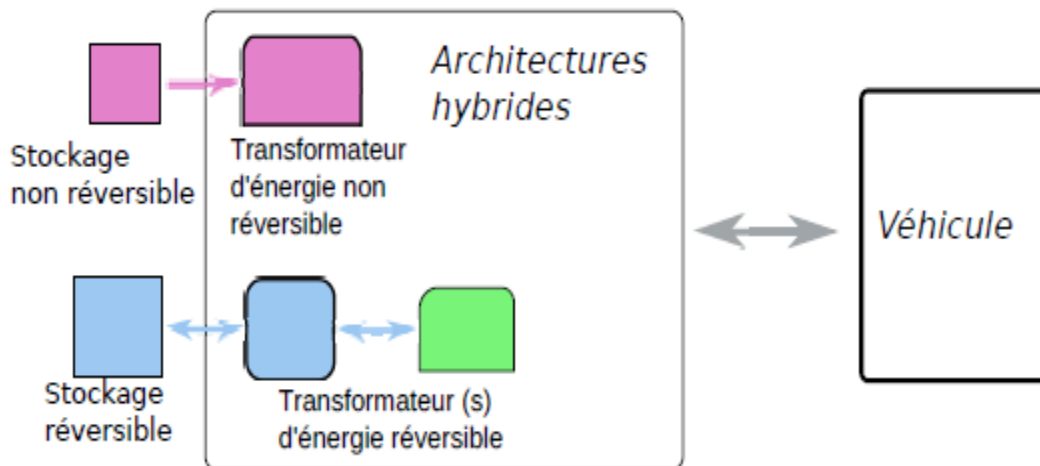


Figure I.4: Principe architectures hybrides

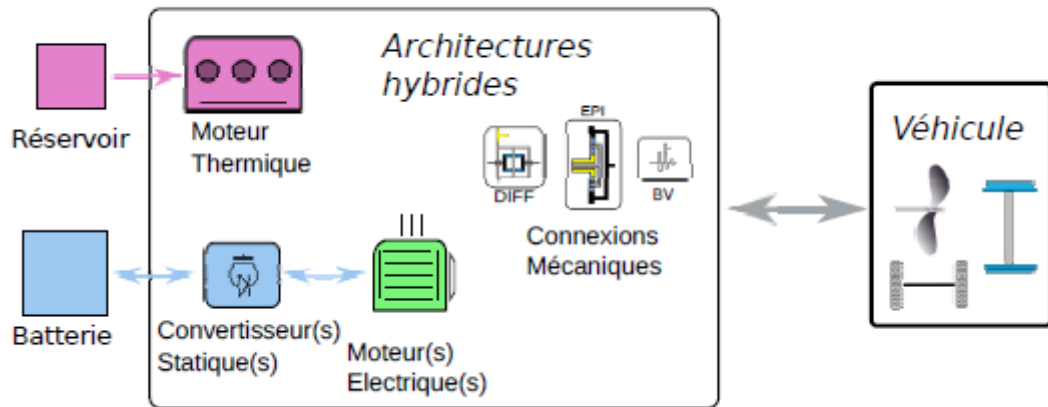


Figure I.5 : Architectures hybrides moteur thermique/batterie

I.2.2.2. La gestion de l'énergie dans les VEH

A partir du moment où au moins deux sources d'énergie peuvent être utilisées pour propulser un véhicule, plusieurs chemins de transfert d'énergie (flux d'énergie) existent. Ces sources peuvent être utilisées séparément ou simultanément et échanger ou non de l'énergie. Le choix des flux d'énergie est communément appelé gestion de l'énergie. Dans notre cas, il s'agit principalement de faire le choix entre les modes électriques ou hybrides (batterie et moteur thermique sont sollicités). Dans le mode hybride, il faudra, de plus, choisir la quantité d'énergie échangée entre batterie et moteur thermique. Dans certaines architectures, il faudra, de plus, faire le choix du mode hybride et/ou du point de fonctionnement du moteur thermique.

Les lois de gestion de l'énergie peuvent être formulées à base de règles ou de principes basés sur la commande optimale. Elles devront également gérer l'état de charge de la batterie pour garantir une certaine décharge de celle-ci sur un parcours ou un temps donné. Si la batterie ne se décharge globalement pas au cours du temps, nous aurons des véhicules hybrides non rechargeables (HEV), ce sera le cas dans tous les exemples de ce mémoire. Si la batterie se décharge au cours du temps nous parlerons alors d'hybrides rechargeables (PHEV). La batterie peut alors être rechargée grâce au réseau électrique, une autre source d'énergie que l'essence peut donc être utilisée.

I.2.2.3. Les familles d'architectures de VEH

Le terme d'architecture hybride décrit en général la manière dont les transformateurs d'énergies sont reliés entre eux et aux roues, couplage électrique et mécanique. On regroupe

généralement tous les types de véhicules hybrides en quatre grandes familles qui se différencient selon la manière d'agencer les différents organes de propulsion embarqués :

L'architecture série, l'architecture parallèle, l'architecture mixte dite série-parallèle et l'architecture dérivation de puissance. La différence entre ces trois architectures tient à la nature du point de jonction ou « nœud » entre les différentes chaînes de traction. Dans l'architecture série, le nœud est électrique, contrairement à l'architecture parallèle où le nœud est mécanique.

I.2.2.3.1. Architecture série

Dans les architectures hybrides série, le moteur thermique n'est pas mécaniquement relié aux roues (fig. I.6). Son point de fonctionnement, et notamment sa vitesse, peut donc être choisie indépendamment de la vitesse des roues. Cela se fait cependant au prix d'une chaîne de rendement (ME2, ME1, réducteur) souvent très défavorable par rapport à une transmission mécanique directe, du moins pour des utilisations dans des véhicules routiers particuliers. Ces architectures présentent cependant une grande souplesse au niveau "propulsion" qui est assurée par une ou plusieurs machines électriques. Par ailleurs, pour des applications où la consommation électrique à bord du véhicule est importante, voire prépondérante, le moteur thermique et sa machine électrique associée assurent aisément la fonction de groupe électrogène. On les retrouve dans les locomotives (alors appelées diesel électrique), certains bateaux et dans les véhicules dits électriques avec range-extender.

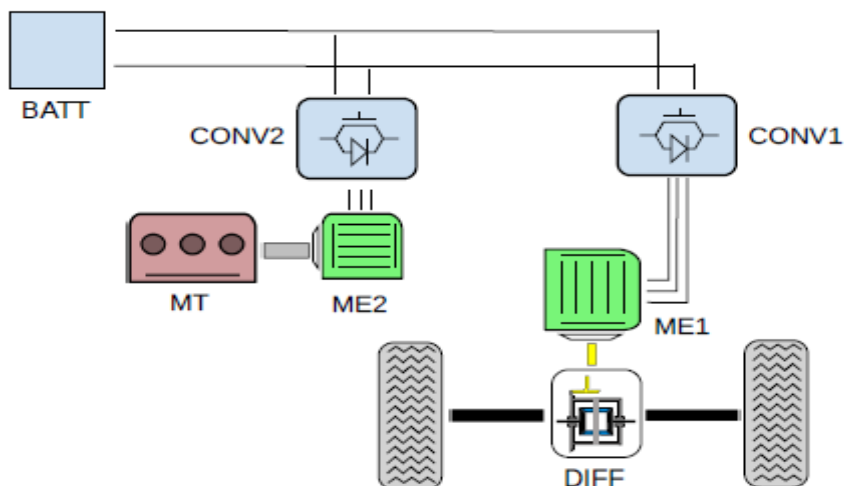


Figure I. 6 : Architecture séries

I.2.2.3.2. Architecture parallèle

La famille des hybrides parallèles (fig. I.7) décrit les architectures dont les transformateurs d'énergie (moteurs thermiques et électriques) sont mécaniquement reliés aux roues. Leur vitesse dépend donc directement de celles des roues par l'intermédiaire de rapports de réduction (réducteurs, coupleurs, boîte de vitesses ...). Elles possèdent, en général, un moteur thermique (MT) et une machine électrique (ME). Selon la position de cette machine électrique on parlera d'architecture de type P0 à P4 (fig. I.7). Ces machines peuvent être reliées aux roues ou à l'arbre de transmission par l'intermédiaire de coupleur (CPL) ou directement montées sur l'arbre (cas P3 sur la figure). Les hybrides parallèles dits "par la route" [2]. Font également partie de cette famille (architecture P4 sur la figure). Des architectures plus complexes avec une machine électrique connectée sur certains rapports de la boîte de vitesses ont également été brevetées ou étudiées. [3]

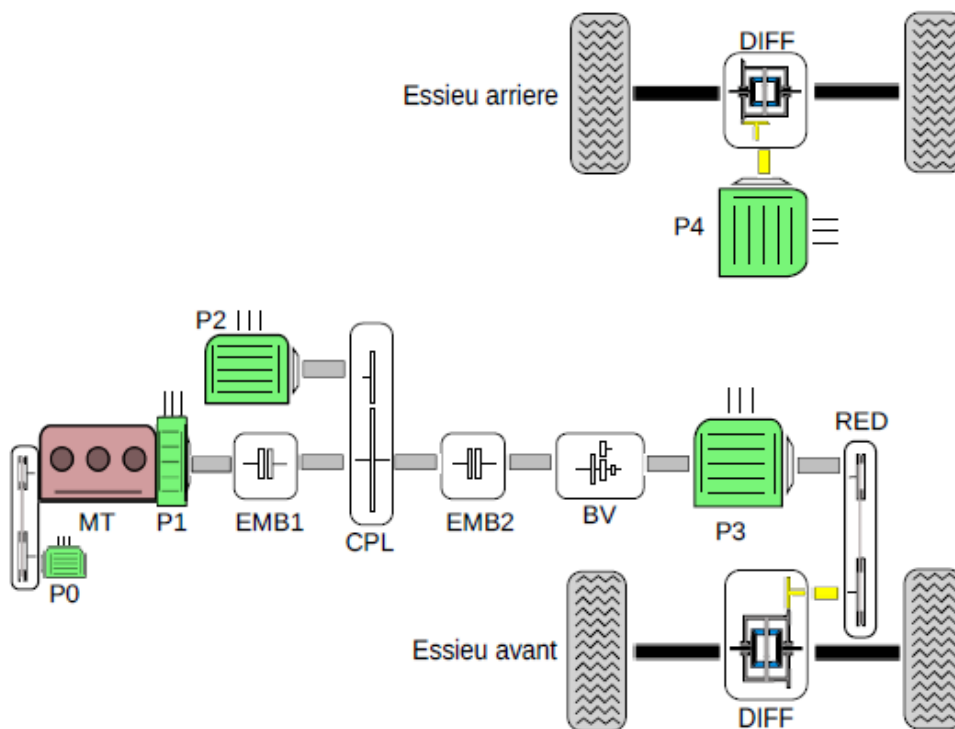


Figure I. 7 : Architecture parallèles

I.2.2.3.3. Architecture mixte : série-parallèle

La famille des Hybrides Séries Parallèles (HSP) [4], possède, dans sa version la plus simple, au minima un moteur thermique et deux machines électriques (fig. I.8). Un ou plusieurs organes de coupure (embrayages) permettent alors de faire fonctionner le véhicule soit en mode parallèle,

soit en mode série. (La figure I.8) présente la version la plus simple d'HSP (dite P2+P3), on peut y adjoindre des réducteurs ou boîtes de vitesses et placer les convertisseurs d'énergie à d'autres emplacements. Le choix précis de l'architecture (rapports de réduction, place des convertisseurs) devient alors un problème à part entière. Par ailleurs, les lois de gestion de l'énergie devront aussi faire le choix du mode de fonctionnement (parallèle ou série) et de la répartition de la puissance électrique entre les deux machines électriques.

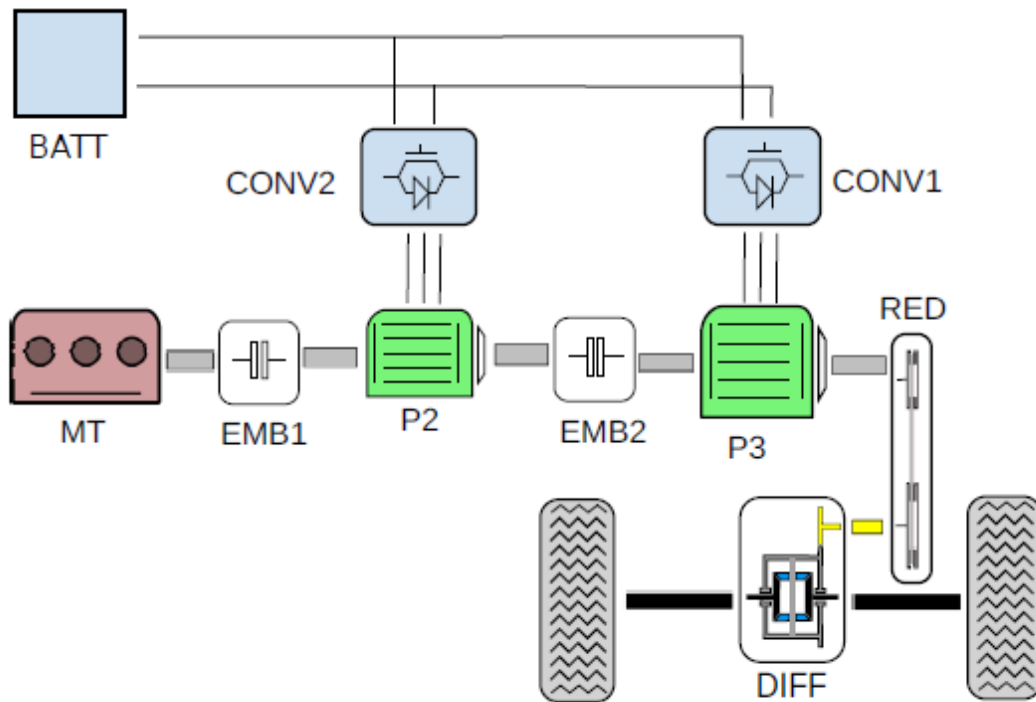


Figure I. 8 : Architecture séries-parallèles

I.2.2.3.4. Architecture dérivation de puissance

Ce type d'architecture [5] permet de faire transiter une partie de la puissance du moteur thermique de façon mécanique vers les roues et de dériver une partie de cette puissance par l'intermédiaire d'un train épicycloïdal (EPI) vers des machines électriques qui fonctionneront de manière duale, l'une en génératrice l'autre en moteur. (La figure I.9) représente la plus connue de ces architectures puisqu'elle équipe les véhicules de la marque Toyota. La dérivation de puissance, associée au train épicycloïdal permet comme dans un hybride série de choisir le point de fonctionnement du MT de façon quasi indépendante de celle des roues et donc de le faire fonctionner dans des zones de bon rendement. Cela nécessite cependant de faire passer une partie de la puissance dans une chaîne de rendement peu favorable (EPI, ME2, ME1). Là aussi, les lois de gestion de l'énergie devront réaliser le choix du point de fonctionnement en veillant à garantir

une bonne efficacité globale du système. Les architectures de type Electrical Variable Transmission, font aussi partie de cette famille et permettent la dérivation de puissance sans utilisation de train épicycloïdal en utilisant des machines électriques à "stator tournant" [6].

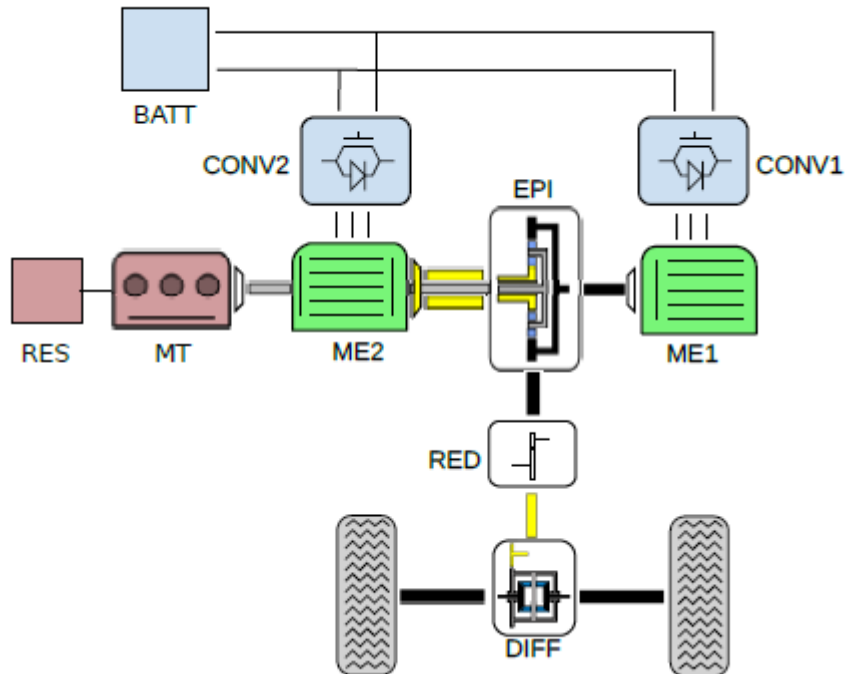


Figure I.9 : Hybride à dérivation de puissance type Toyota

I.2.2.4. Classification des véhicules hybrides

Cette classification est surtout utilisée par les constructeurs. Elle ne prend pas en considération l'architecture du véhicule mais plutôt les fonctionnalités qu'elle peut offrir en fonction de son niveau d'hybridation qui dépend de l'importance de la partie électrique et de la façon dont elle est combinée avec le moteur thermique.

Pour un véhicule hybride, le taux d'hybridation est égal au rapport de la puissance électrique sur la puissance totale. Actuellement sur le marché automobile, il existe quatre niveaux d'hybridation différents (Chan, 2007) : micro-hybrid, mild-hybrid, full-hybrid et plug-in-hybrid. [7]

I.2.2.4.1. Véhicule micro-hybrid

L'appellation « micro-hybrid » s'applique aux voitures utilisant le système « Stop-and-Start » qui correspond au niveau le plus faible d'hybridation. Il consiste à couper le moteur thermique automatiquement lors des arrêts, à un feu rouge par exemple. Le terme hybride est ici un peu usurpé malgré le fait que le redémarrage automatique, lors du relâchement de

l'embrayage, s'effectue grâce à l'électricité de la batterie qui enclenche le redémarrage du moteur. Le système « Stop-and-Start » se compose de deux éléments principaux : un alternateur réversible et un convertisseur alimenté par la batterie. Dans un véhicule thermique classique, l'alternateur fournit de l'électricité lorsque le moteur est en marche, ce qui est nécessaire au fonctionnement des équipements du véhicule, comme le tableau de bord, alors que dans un véhicule électrique, l'alternateur réversible sert aussi à produire de l'électricité après le démarrage du moteur et joue en plus le rôle d'un démarreur, offrant un temps de démarrage réduit (400ms). Ce système permet un gain de consommation de carburant surtout lors de la conduite en ville (Romm and Frank, 2006), d'environ 10% en cycle urbain, 6% en cycle mixte normalisé, et jusqu'à 16% pour des contextes à forte circulation. [7]

I.2.2.4.2.Véhicule mild-hybrid

Dans ce type de technologie, le terme hybride est plus approprié car l'énergie électrique sert à la propulsion du véhicule. En effet, il s'agit d'un petit moteur électrique de 15 à 30 kW qui vient augmenter la puissance du moteur thermique (Fig. I.10). L'économie en carburant est donc ici bien réelle puisque le moteur thermique n'a pas besoin de fournir plus de puissance pour arriver au même résultat qu'avec un propulseur thermique sans moteur électrique additionnel. En outre, la batterie n'est pas très volumineuse et ne diminue donc pas les capacités du coffre, ce qui représente un avantage indéniable.

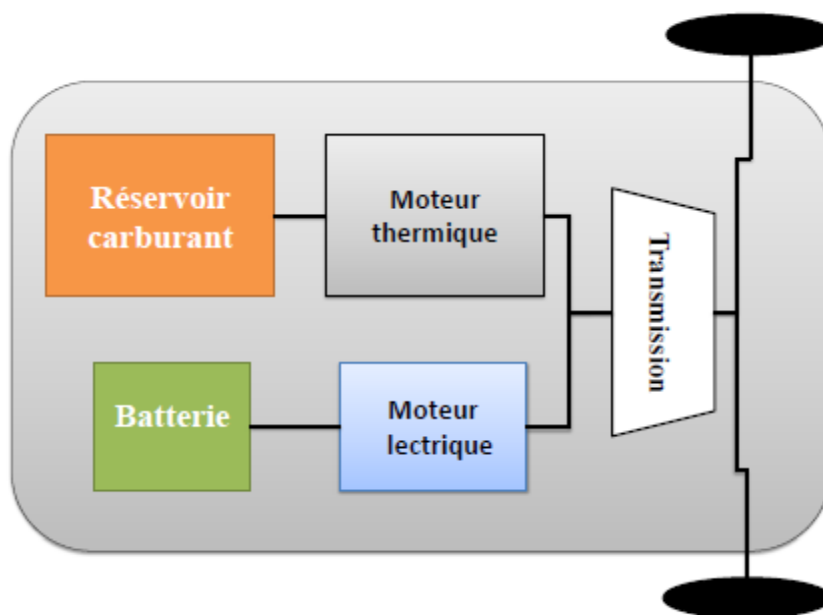


Figure I. 10: Structure mild-hybrid

I.2.2.4.3. Véhicule full-hybrid

Une voiture « full-hybrid » est équipée d'un moteur électrique suffisamment puissant pour entrainer à lui seul le véhicule pendant une durée limitée (Fig. I.11). La voiture la plus connue est la Toyota Prius qui roule en tout électrique à faible vitesse, ce qui est intéressant en circuit urbain du fait de son absence d'impact sur l'environnement. Lorsque les batteries sont déchargées, le moteur thermique prend alors le relais et recharge en même temps les batteries. La batterie peut fonctionner jusqu'à 8 ans ou 200.000 km environ, ce qui amortit largement son coût. Pour des profils urbains, le véhicule roule en tout électrique récupérant ainsi l'énergie du freinage pour recharger la batterie. Dès que la vitesse du véhicule augmente et dépasse les 50 km/h, le moteur thermique est actif et la puissance fournie par le moteur électrique s'additionne avec celle fournie par le moteur thermique pour satisfaire la demande globale de traction. Le moteur thermique sert aussi à recharger la batterie si celle-ci atteint un seuil minimum défini par le constructeur afin de maintenir son état de fonctionnement. Ceci montre un contrôle des sources à bases de règles qui n'optimise pas réellement la consommation du véhicule.

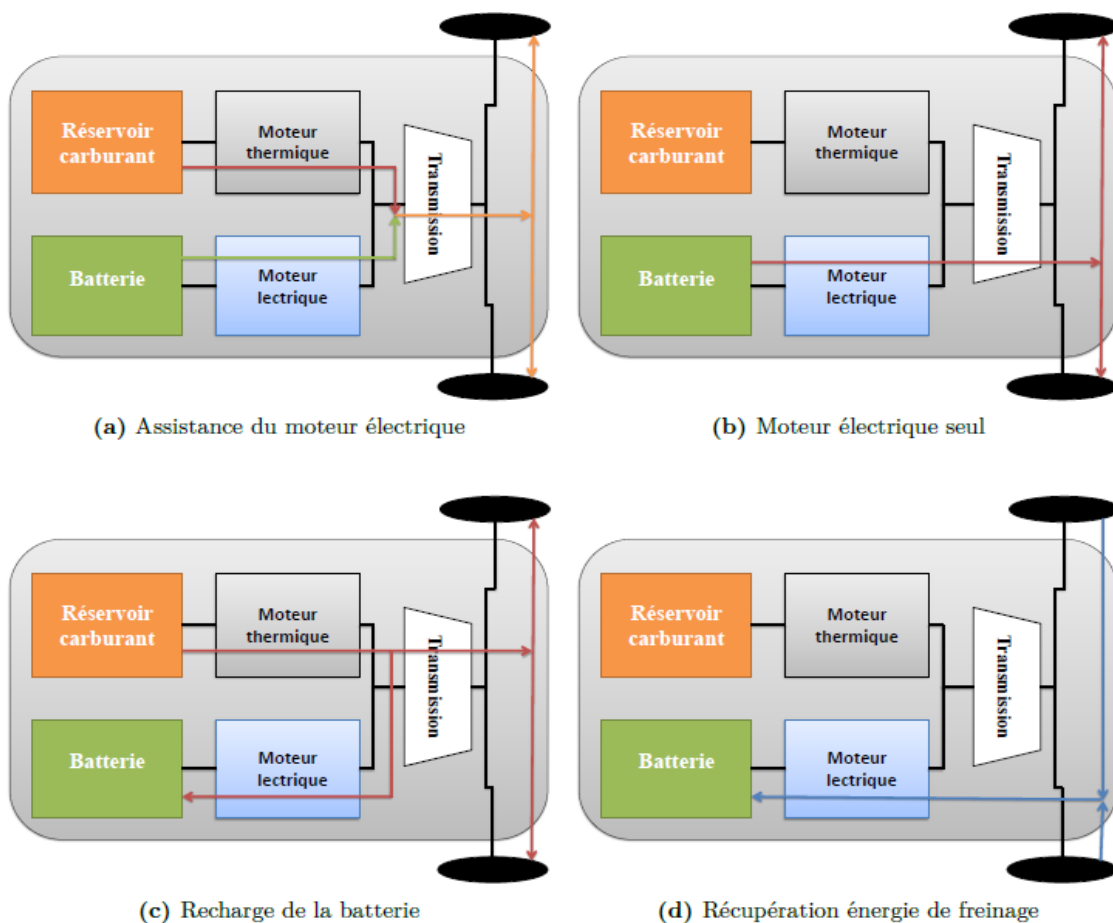


Figure I.11. Différents modes de fonctionnement d'une structure full-hybrid

I.2.2.4.4.Vehicule Plug-in hybrid

L'architecture « Plug-in hybrid » dite aussi hybride rechargeable, est semblable au « full-hybrid » avec une sortie de connexion au niveau de la batterie pour la recharge par une source d'énergie extérieure. Dans ce type d'architecture, la motorisation électrique, l'alternateur et la batterie sont considérablement puissants, et le système de commande empêche le fonctionnement du moteur thermique (mode tout électrique) tant que la batterie n'a pas atteint un niveau minimum. Si ce niveau est atteint, le système de commande passe alors en fonctionnement hybride. [7]

I.2.2.4.5.Véhicule hybride à pile à combustible

Un véhicule hybride à pile à combustible se classe dans la catégorie des véhicules à architecture d'hybridation série. De point de vue mécanique, il n'y a pas de différence entre le système de propulsion d'un véhicule hybride à pile à combustible et un VE. Les deux véhicules fournissent la puissance aux roues uniquement par le moteur électrique. Cependant, le système d'alimentation en énergie électrique est différent. En plus de la batterie, une pile à combustible représente une source principale pour fournir de l'énergie électrique. La pile à combustible génère de l'énergie électrique à partir de L'hydrogène (H_2) stocké dans le réservoir du carburant, et par la suite, la batterie sera rechargée par cette dernière. [7]

I.2.2.6.Avantages et inconvénients de l'hybride pour véhicule électrique

I.2.2.6.1.Avantages

- En dehors de la ville, sur la route, le moteur électrique n'est pas sollicité et la Consommation sera la même que sur une voiture conventionnelle.
- Le système « full-hybrid » a un impact très minime sur le milieu naturel et préserve la santé des populations en réduisant fortement les émissions de CO_2 dans l'atmosphère.
- L'hybride permet, certes, un gain réel en économie de carburant
- Cette stratégie procure certains avantages liés au cout réduit pour l'achat d'une voiture ou encore, de ne pas en faire une préoccupation majeure par rapport à la dure de vie des batteries.

I.2.2.6.2.Inconvénients

- la mise au point des sources énergétiques pour ce type de véhicule telles que la batterie ou la pile à hydrogène produit des rejets très nocifs.

- ce système de moteur thermique couple a un moteur électrique prend plus de place, diminuant ainsi les capacités du coffre.

Tout compte fait, les avantages l'emportent sur les inconvénients : cette nouvelle technologie Est appelée à un bel avenir.

I.3.Conclusion

Le principal objectif de ce premier chapitre est de présenter des généralités sur les véhicules électriques et hybrides et leurs différentes architectures ainsi que leur classification par niveau hybridation, avantages et inconvénients de l'hybride.

Dans le deuxième chapitre nous allons aborder la stratégie de la gestion d'énergie dans les véhicules électriques hybride.

A decorative graphic of a scroll, with the text centered on it. The scroll has a vertical edge on the left and a horizontal edge at the bottom, with rounded corners and a small circular detail at the top right corner.

Chapitre II :
Stratégie de la gestion d'énergie

II.1. Introduction

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

II.2. Sources d'énergie embarquées dans les véhicules hybrides électriques

Un système multi-sources ou hybride est composé d'au moins deux sources énergétiques reliées entre elles par des convertisseurs, permettant de contrôler la tension et le courant fourni par chacune des différentes sources. Ainsi, le choix de la source d'énergie à embarquer est une décision importante, car elle impacte d'une façon significative l'autonomie du système. Pour des raisons de poids, les sources énergétiques renouvelables telles que le solaire et l'éolien ne peuvent être utilisées sauf si elles sont ultralégères, ce qui n'est généralement pas le cas. D'un autre côté, les batteries, malgré leur masse et leur encombrement, ont néanmoins l'avantage pour l'instant de fournir un meilleur rendement et surtout d'être autonomes, contrairement au solaire et à l'éolien qui dépendent du climat. Grâce aux récentes avancées technologiques, l'utilisation des énergies chimiques sans composés carbonés (pile à combustible, batterie, super-condensateur) comme source de production ou de stockage pourrait constituer une alternative judicieuse. Cependant, le dimensionnement de ces sources des profils de mission que le véhicule est amené à réaliser. L'utilisation du diagramme de Ragone (Fig. II.1) donne une idée sur les performances des sources électriques en termes d'énergie spécifique par rapport à la puissance spécifique

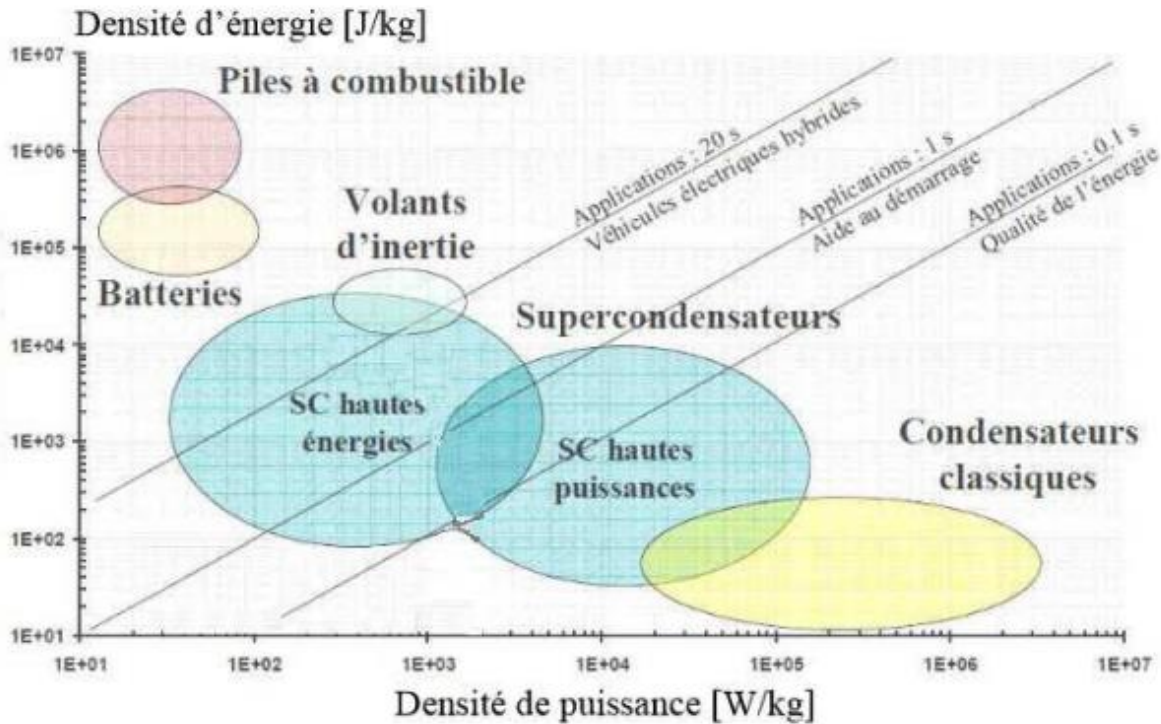


Figure II.1 : Diagramme de Ragone

II.1. Pile à combustible

II.1.1 Généralités

Actuellement les véhicules thermiques possèdent une autonomie très élevée contrairement aux voitures électriques. Une solution envisageable pour augmenter l'autonomie des véhicules électriques serait d'utiliser de nouvelles sources possédant des densités énergétiques élevées. Ceci justifie le développement de nouvelles générations de voitures à pile à combustible. L'ensemble des technologies d'hydrogène, de la production à l'utilisation en passant par les technologies de stockage, de transport et de distribution de ce vecteur énergétique de futur, est appelé à jouer un rôle essentiel dans l'émergence d'une filière hydrogène majeure. Essentiellement utilisé en tant que gaz dans des procédés de chimie industrielle, l'hydrogène est aujourd'hui envisagé comme vecteur énergétique de grande échelle ; on parle du côté de l'utilisation finale, il pourra être associé aux piles à combustible. [8]

Les piles à combustibles sont répertoriées en fonction de leurs températures de fonctionnement, de leurs électrolytes et de leurs plages de puissance. [9] Les principales technologies de pile à combustible ainsi que leurs caractéristiques sont données dans le tableau suivant :

Type	AFC	PEMFC	PAFC	MCFC	SOFC	DMFC
Electrolyte	Solution alcaline KOH	membrane échangeuse de protons (MEP)	Acide phosphorique H ₃ PO ₄	Mélange de Li ₂ CO ₃ K ₂ CO ₃ dans une matrice LiAlO ₂	Oxyde de zircon ZrO ₂ et yttrium Y ₂ O ₃ (céramique)	MEP ou H ₂ SO ₄
catalyseur	Platine	Platine	Platine	Nickel et oxyde de nickel	Cemet nickel zircon	platine
Charge mobile	OH ⁻	H ⁺	H ⁺	CO ₃ ²⁻	O ²⁻	H ⁺
Température fonctionnement (°C)	60-200	40-90	180-210	630-650	900-1000	70-100
Combustible	H ₂	H ₂ produit à partir d'hydrocarbures ou du méthanol	H ₂ produit à partir d'hydrocarbures	H ₂ produit à partir d'hydrocarbures CO ₂	H ₂ et CO produit à partir d'hydrocarbures	méthanol
Oxydants	O ₂	air/O ₂	air/O ₂	air/O ₂	air/O ₂	air/O ₂
Rendement %	60 – 70	35-40	40	60	50-70	20-45
Applications	NASA	Véhicules	Install. Stationnaires (cogénération)	Install. Stationnaires (cogénération)	Install. Stationnaires (cogénération)	véhicules

TAB. II.1 : Caractéristiques des différents types de PAC [9]

II.1.2. Principe de fonctionnement

Les piles à combustible à hydrogène sont constituées de deux électrodes : une anode et une cathode, qui sont séparées par un électrolyte qui bloque le passage des électrons mais permet aux ions de circuler (Hirschenhofer et al. 1998). Lorsqu'un faisceau d'hydrogène frappe l'anode, il est converti en ions H⁺, libérant des électrons capturés par l'anode. L'électricité est générée lors du transfert des ions H⁺ et des électrons vers la cathode pour former de l'eau à partir de l'oxygène (Figure II.2). La tension produite par cette réaction ne dépasse pas 0,7 V par cellule, alors connectez plusieurs cellules en série pour obtenir la tension souhaitée. Le principe de fonctionnement d'une pile à combustible est d'une simplicité trompeuse, mais son installation est complexe et coûteuse, environ 1 000 EUR/kW, car elle doit être entourée de composants et de sous-systèmes pour fonctionner (par exemple, des compresseurs d'air, des systèmes de refroidissement et d'humidification, des convertisseurs, etc.)

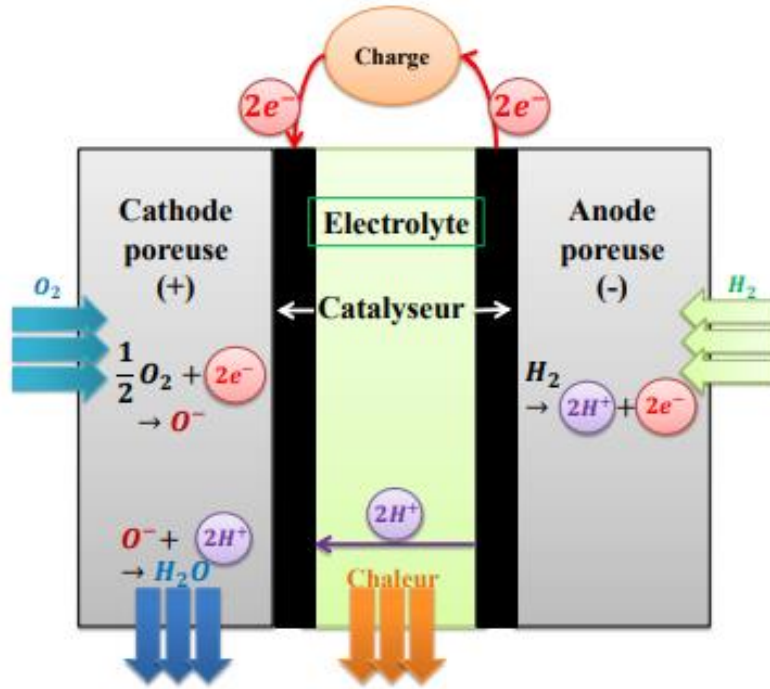


Figure II.2 : Principe de fonctionnement d'une pile à combustible PEMFC [7]

II.1.3. Caractéristique électrique de la pile à combustible

La tension en circuit ouvert d'une cellule est fonction du potentiel électrochimique de la réaction redox. Idéalement, ce potentiel électrochimique est de 1,23v (potentiel standard) dans des conditions de température et de pression standard (1 atm, 25°C). En fait, la tension en circuit ouvert est légèrement inférieure à 1v. La courbe de polarisation est une caractéristique électrique d'une pile à combustible qui représente la tension de la pile en fonction de la densité de courant et dépend de la température de fonctionnement, de la pression des réactifs et de l'humidité de la pile .La densité de courant I_{pac} (A/cm²) est défini par :

$$I_{pac} = \frac{i_{pac}}{a_{cell}} \tag{II.1}$$

Avec I_{pac} le courant de la pile à combustible et A_{cell} la surface active d'une membrane.

II.1.4. Rendement d'une pile combustible

Le rendement d'une pile à combustible seule peut atteindre les 90%, or celui du système complet avoisine les 45%. Malgré cela, ce rendement demeure supérieur à celui d'un moteur thermique estimé à 30%. Grâce à ses très bonnes performances, la pile dispose d'une autonomie satisfaisante et d'une énergie massique supérieure à celle des batteries. Cependant, pour faire

tourner un moteur électrique d'un véhicule, une puissance maximale de 70-100 kW est nécessaire, ce qui correspond à une consommation de 1, 1 kg d'hydrogène aux 100 km.

La quantité d'hydrogène à embarquer ne paraît donc pas irréaliste, ce qui permettrait de rouler dans d'excellentes conditions sur une longue distance.

Le cahier des charges élaboré par l'industriel permet de définir des contraintes ou des équations reflétant le fonctionnement et la capacité des sources énergétiques. Pour la pile à combustible, elle est caractérisée par sa puissance maximale (Eq. II.2) et sa courbe de rendement (Fig. II.3) qui permettent de calculer la consommation d'hydrogène à partir de la puissance fournie (Eq. II.3)

$$P_{fcs}^{\min} \leq P_{fcs} \leq P_{fcs}^{\max} \quad (\text{II.2})$$

$$P_h = \frac{P_{fcs}}{\eta_{fcs}(P_{fcs})} \quad (\text{II.3})$$

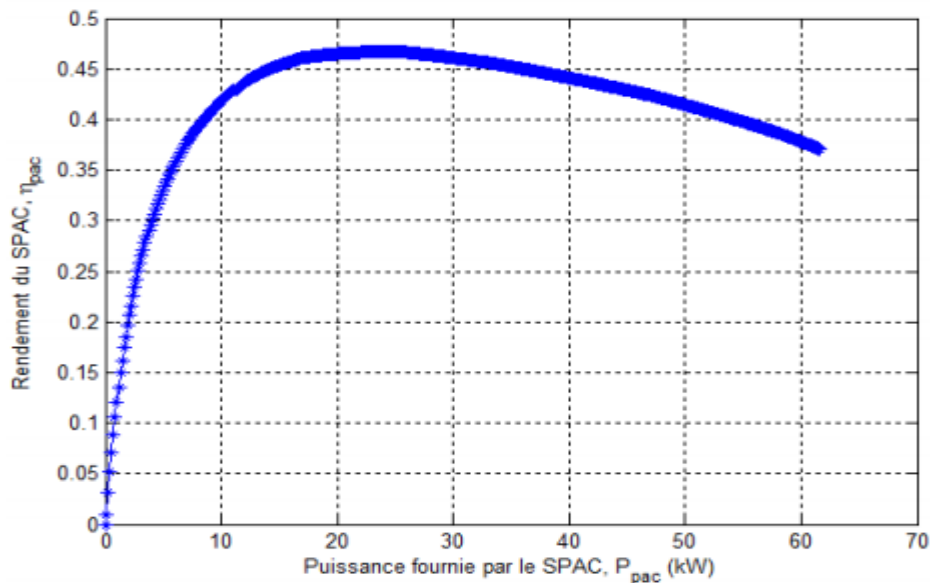


Figure II.3 : Rendement de la pile à combustible

II.1.5. La pile à combustible à membrane polymère (type PEM)

- principe de fonctionnement

La pile à combustible de type PEM convertit l'énergie chimique (l'hydrogène et oxygène) en énergie électrique. Cette réaction électrochimique est une électrolyse de l'eau inverse. 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 [10]. 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 sont les suivantes :

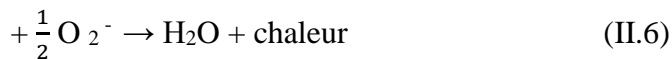
- Oxydation à l'anode



- Réduction à la cathode :



- En combinant (1.1) et (1.2), la réduction globale est :



L'électricité est produite par les 2 électrons libérés par la molécule d'hydrogène. Les protons d'hydrogène H^+ traversent la membrane séparant l'anode de la cathode et se recombinent à la cathode avec les électrons et les atomes d'oxygène. Idéalement, les seuls produits secondaires de la réaction sont de l'eau et de la chaleur. La figure(II.4) résume le principe de la pile à combustible PEM.

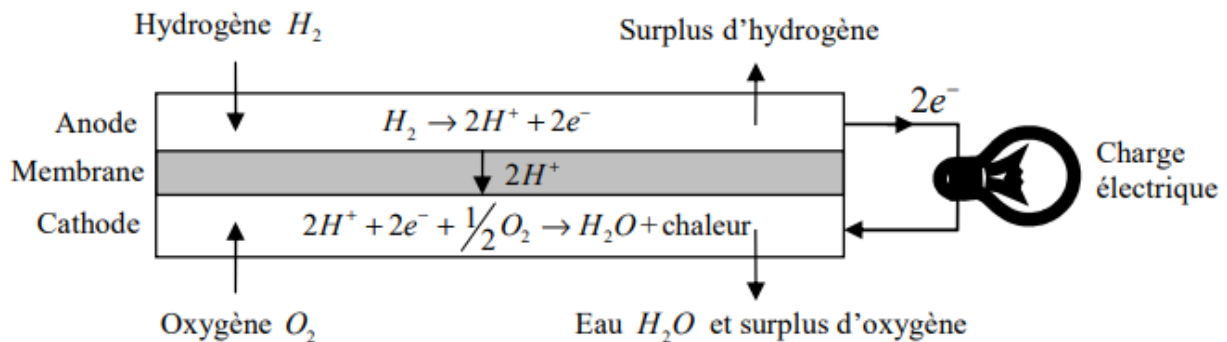


Figure II.4 : Schéma de principe de la pile à combustible PEM.

II.1.6. Avantages et inconvénients de la Pile à combustible

II.1.6.1. Avantages

- Un rendement énergétique bien plus élevé peut atteindre des rendements globaux de 85% à 90% [10]
- Un fonctionnement très silencieux

- Une réduction très forte des émissions polluantes, les piles à combustible produisent de faibles quantités de CO₂, de CH₄ et de CO.
- Une réduction significative de la consommation d'énergie par rapport à des solutions très traditionnelles.
- Des coûts de maintenance a priori très réduits
- Les Piles à combustible possèdent une large plage de températures de fonctionnement selon leurs types, ce qui permet de couvrir plusieurs domaines d'application.

II.1.6.2. Inconvénients

- Un coût très élevé à cause de l'utilisation des métaux nobles comme le platine au niveau des électrodes et à cause du prix de fabrication de la membrane et des plaques bipolaires.
- pour la durée de vie des piles à combustible, Les contraintes diffèrent selon l'application, selon pour l'utilisation automobile les piles à combustibles ne vie que quelques milliers d'heures
- Dans le cas des applications automobiles, il faut évacuer la chaleur générée par la pile, Cela impose donc un système de refroidissement.

II.2. Accumulateurs électriques

II.2.1. Stockage à long terme

II.2.1.1. Batteries [11]

La batterie, appelée aussi accumulateur électrochimique, est une source d'énergie réversible destinée à stocker l'énergie électrique pour une réutilisation future. Elle est essentielle pour tout système électrique autonome, utile au démarrage des moteurs et des groupes auxiliaires de puissance, et sert à garantir la puissance demandée par le moteur électrique (ou la charge) sans interruption du fonctionnement du système.

Son principe de fonctionnement est basé sur la conversion et la transformation de l'énergie chimique en énergie électrique par une réaction électrochimique. Elle est constituée d'une ou de plusieurs cellules montées en série, contenant chacune une électrode positive, une électrode négative, un séparateur et un électrolyte (Fig. II.5). [12]

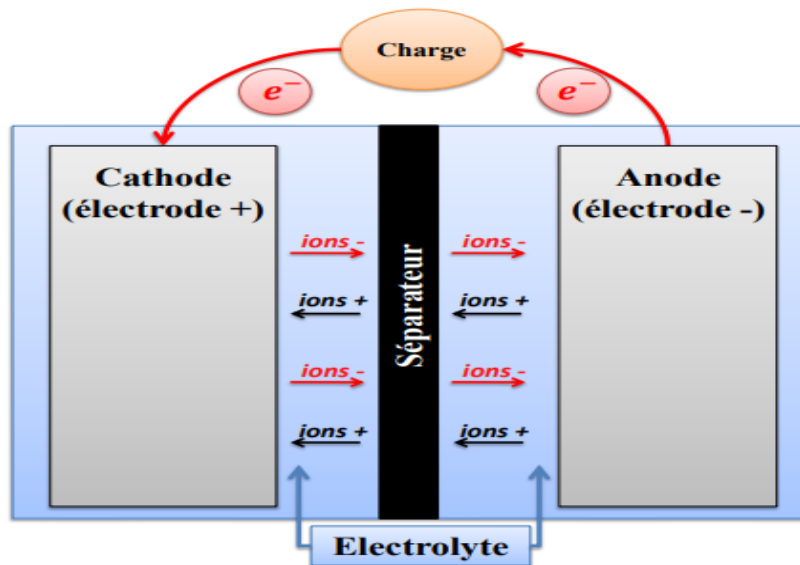


Figure II.5 Fonctionnement d'une batterie

Le type de batterie est caractérisé par la nature des électrodes qui la constitue. Plusieurs familles de batteries sont disponibles comme les batteries au plomb, les batteries Nickel Métal Hydride (Nimh), les batteries Nickel Cadmium (Ni-Cd) et les batteries lithium qui présentent des caractéristiques différentes et dont certaines sont mieux adaptées pour le transport.

a. Batterie Plomb-Acide

Elle est largement utilisée dans l'industrie automobile malgré le fait qu'elle possède la plus mauvaise énergie massique 35 Wh/kg et, cela en raison de son faible coût et de sa capacité à générer une grande intensité de courant nécessaire pour le démarrage électrique du moteur, à l'aide de batteries de 12 V pour les voitures en associant six cellules de 2,1 V, ou de batteries de 24 V pour les camions (association de 12 cellules). La batterie au plomb est caractérisée par un rendement énergétique variant entre 70 et 75%, le reliquat étant dissipé sous forme de chaleur lors des réactions chimiques. L'énergie électrique est produite ou emmagasinée en passant par deux principales réactions chimiques. Pendant la décharge, la batterie contient un excès d'électrons à sa plaque négative et un manque d'électrons à sa partie positive. La réaction électrochimique engendre le déplacement des électrons au travers du récepteur, créant ainsi le courant. Dans l'électrode positive, le dioxyde de plomb PbO_2 se transforme en sulfate de plomb $PbSO_4$ en libérant de l'oxygène O_2 en consommant des électrons. Cependant, dans l'électrode négative, le plomb fixe la partie sulfurée de l'acide pour donner du sulfate de plomb $PbSO_4$ et libère des électrons. La batterie ne débite plus de courant lorsque les deux plaques possèdent le même nombre d'électrons. Par contre, dans les phases de recharge, la batterie est réceptrice du courant fourni, provoquant ainsi une réaction chimique inverse et les plaques retournent

progressivement à leur état d'origine. Cette réaction se manifeste par un déplacement d'électrons. [11]

b. Batterie Lithium-ion

Actuellement les batteries Lithium-ion qui appartiennent à la famille des batteries Lithium sont parmi les solutions les plus répandues pour alimenter en électricité de nombreux produits de consommation disponibles sur le marché. Elles possèdent de très fortes densités énergétiques et une importante énergie massique 120 – 200 Wh/kg, ce qui favorise leur utilisation dans le secteur du transport et particulièrement pour les véhicules électriques qui nécessitent des batteries à grande capacité.

➤ **Principe de fonctionnement**

Elles utilisent le lithium sous une forme ionique et l'énergie électrique est fournie par la réaction chimique réversible des ions lithium entre les deux électrodes : une anode en graphite et une cathode en oxyde métallique lithié. Mais, une telle technologie n'est pas sans inconvénient car elle présente des risques d'incendie majeurs à cause de l'électrolyte liquide qui peut brûler lors d'un mauvais fonctionnement. Toutefois, pour pallier ces risques, sachant que ce type de batterie supporte mal les surcharges et les mauvaises recharges, un système de protection BMS (Battery Management System) (Garche and Jossen, 2000) est intégré lors de la fabrication. Une cellule lithium-ion possède une tension nominale de 3,6 V qui peut être accordée en série à l'effet d'obtenir la tension souhaitée et un meilleur rendement que sur les batteries au plomb, qui avoisine 100%. Actuellement, on distingue plusieurs familles de batteries, certaines nécessitent une technologie complexe d'autres pas, ce qui les différencie en matière de coûts de fabrication.

II.2.2. Stockage à court terme

II.2.2.1. Les super condensateurs

II.2.2.1.1. Généralités

Le développement de nouvelles générations de composants électrochimiques a donné naissance aux super-condensateurs qui possèdent une forte densité de puissance avec des durées de vie très importantes mais de faible densité énergétique

Un super-condensateur appelé aussi super-capacité ou condensateur à double couche, stocke l'énergie de manière électrostatique en polarisant une solution électrolytique. L'histoire de ce composant débute avec la découverte du phénomène capacitif par Hermann Von Helmholtz en 1853. Les premiers super-condensateurs étaient commercialisés par NEC dans les années 70, sous la dénomination de super-capacitor. [13]

II.2.2.1.2. Principe de fonctionnement

Leur principe de fonctionnement se repose sur la formation d'une double couche électrochimique à l'interface d'un électrolyte et d'une électrode polarisable de grande surface spécifique. L'application d'une différence de potentiel aux bornes du dispositif complet entraîne le stockage électrostatique de charges aux deux interfaces électrode-électrolyte. [14]

Le principe de fonctionnement peut être décomposé en fonction des 4 états différents du composant (déchargé, en charge, chargé, en décharge).

II.2.3. Comparaison entre les batteries et le super condensateur

Les caractéristiques électriques se différencient entre les batteries et les super condensateurs, en vue de temps de charge et de décharge, rendement, densité et durée de vie, le tableau suivant TAB. II.2 nous résume les différentes performances du super condensateur et de la batterie

	Super-condensateur	Batterie
Temps de charge t	De 1s à 30s	1 h à 5 h
Temps de décharge	De 1s à 30s	0.3 h à 3h
Rendement	entre 85% et 98%	entre 70% et 85%
Densité de la puissance (W/kg)	10^4	10^3
Densité d'énergie (Wh/kg)	entre 1 et 10	entre 10 et 100
Durée de la vie en nombres de cycles	10^6	10^3

TAB. II.2 : Résume les performances du super-condensateur et de la batterie

On déduit que le super-condensateur est un élément potentiel pour le stockage de l'énergie embarquée comme source pour la demande de fortes puissances pendant quelques secondes. Le super-condensateur a déjà pris place dans la voiture pour la récupération d'énergie et pas seulement dans les véhicules électriques. En effet, les super-condensateurs sont particulièrement efficaces pour répondre à ce besoin. Capable de se charger et se décharger très rapidement, le super-condensateur se présente comme une batterie ultra-rapide et fiable.

II.3. Problématique de gestion d'énergie dans les systèmes hybrides électriques

La maîtrise et l'utilisation dans les meilleures conditions des sources d'énergie constituent les points forts des programmes de recherche. En effet, comment concilier l'amélioration des performances des véhicules en optimisant la consommation d'énergie et s'engager simultanément sur des approches novatrices en matière de propulsion. Ces approches doivent être axées sur la préservation de l'environnement qui est le dénominateur commun de tous ces programmes que l'on peut définir sous la dénomination de lois de gestion de l'énergie. Dans ce contexte, différentes actions peuvent être menées.

Dans un véhicule hybride, le problème de propulsion est plus complexe que sur les véhicules à moteur thermique où il n'y a qu'une seule source d'alimentation principale, ce qui permet de la gérer plus facilement. Les véhicules hybrides qui combinent différentes sources d'énergie et de moyens de stockage, rendent plus complexe la maîtrise de ces flux. Le recours aux lois de gestion de l'énergie s'avère alors nécessaire pour optimiser la production, le stockage et la répartition de cette énergie entre les sources qui doivent être efficacement maîtrisées, de façon à obtenir un rendement global optimal, au moyen d'algorithmes et de stratégies de gestion d'énergie.

Le véhicule hybride est régi par une commande (UC ou Unité de Contrôle) elle-même connectée à tous les organes de fonctionnement (batterie, convertisseur, moteur électrique,...). Cette commande suppose, pour être opérationnelle, la connaissance préalable de tous les paramètres du véhicule notamment l'état de charge des batteries, la vitesse, l'état de fonctionnement des composants, etc. L'unité de contrôle permet aussi de traduire en termes de données la demande en puissance que souhaite obtenir le conducteur et réalise la gestion des flux d'énergie lors des arrêts, des accélérations et des démarrages du moteur, et la répartition de ces flux entre les différentes sources embarquées sur le véhicule. [11]

II.4. Gestion d'énergie

La littérature recense deux grands types de stratégies de gestion d'énergie pour les VEH : les stratégies basées sur des règles et les stratégies basées sur l'optimisation mathématique.

Les stratégies du contrôle basées sur des règles sont faciles à implanter et s'avèrent robustes en pratique. Elles sont basées sur l'expertise de l'ingénieur et l'analyse complète des caractéristiques du véhicule. Elles adoptent des règles simples qui sont indépendantes des caractéristiques du trajet effectué (ville, autoroute, niveau de trafic...) et, de ce fait, n'exploitent pas tout le potentiel

du véhicule en matière d'économie de carburant. Il existe deux stratégies de contrôle basées sur des règles : Les stratégies basées sur une approche déterministe et les stratégies basées sur la logique floue [15]

Les deux grandes familles de méthodes d'optimisation mathématique appliquées au contrôle des véhicules électriques hybrides sont l'optimisation globale et l'optimisation locale. Parmi les méthodes d'optimisation globale se retrouvent l'optimisation linéaire, la programmation dynamique et l'optimisation méta-heuristique. Elles permettent d'obtenir un optimum au sens mathématique mais requièrent la connaissance préalable du cycle de vitesse total. [16]

II.4.1. Stratégies de contrôle de puissance basées sur des règles

II.4.1.1. Approche déterministe

Les stratégies basées sur une approche déterministe utilisent la plupart du temps des machines d'état. Plusieurs modes de fonctionnement sont définis et chacun des modes est régi par une loi de contrôle imposant le partage de puissance généralement en fonction de la vitesse et du couple demandé. Les transitions entre les modes sont déclenchées par des événements qui peuvent être reliés à l'état de charge, la vitesse, le couple requis, la température du moteur ou même la commande de l'utilisateur pour le choix d'un mode. Pour un VEH, les règles gérant les modes de fonctionnement et les transitions sont choisies de manière à respecter les contraintes liées au maintien de l'état de charge et à la demande de l'utilisateur tout en satisfaisant au mieux l'objectif de minimisation de la consommation de carburant. Les stratégies les plus communes sont celles généralement appelées « thermostat » et « power follower » [17]. Elles font parties des premières stratégies de contrôle et sont encore utilisées aujourd'hui dans l'industrie. Ces stratégies sont basées sur l'expertise de l'ingénieur donc il existe une multitude de possibilités mais sa conception se base toujours sur une bonne compréhension du fonctionnement de la chaîne de propulsion. Ainsi nous retrouvons de manière générale, les considérations suivantes [16] :

- L'incapacité d'un moteur à combustion à propulser un véhicule à très basse vitesse sans l'aide d'un embrayage le rend très inefficace dans cette plage de fonctionnement.
- L'incapacité d'un moteur à combustion à propulser un véhicule à très basse vitesse sans l'aide d'un embrayage le rend très inefficace dans cette plage de fonctionnement.
- Pour un VEH, l'état de charge doit évoluer à l'intérieur d'une plage centrée sur une valeur constante. Si l'état de charge ne se trouve pas hors de cette zone, alors il est possible de

faire fonctionner le moteur à combustion dans sa zone d'efficacité optimale afin de réduire sa consommation.

- Si l'état de charge est dangereusement bas, alors la sécurité de la batterie est en jeu et l'objectif de réduction de consommation devient secondaire. Il devient alors nécessaire de recharger la batterie à l'aide du MCI. Par conséquent, le MCI peut éventuellement dévier de son point de fonctionnement optimal.
- Si l'état de charge est trop, haut alors la batterie doit être déchargée. En effet, on cherche à utiliser au maximum l'énergie disponible dans la batterie afin de minimiser la consommation. Il est alors préférable d'utiliser le moteur électrique pour propulser le véhicule et le moteur à combustion peut éventuellement être éteint.

Hors ces considérations, plusieurs autres considérations qu'on peut avoir parfois comme la température des moteurs par exemple, qui pourrait dicté la commande des deux moteurs.

Les stratégies déterministes se basent seulement sur l'instant présent dans la prise de décision et non la totalité du cycle de vitesse à effectuer; ainsi elles possèdent un handicap par rapport aux algorithmes d'optimisation globale. C'est la deuxième raison pour laquelle il est difficile d'atteindre l'optimalité en utilisant ces stratégies. Lors de l'étude des stratégies déterministes, Pisu et al. Montrent que la consommation augmente de 8% à 24%, selon les conditions de route considérées, par rapport à la consommation minimale atteignable [18].

Contrairement aux VEH, les véhicules rechargeables permettent une décharge importante de la batterie au cours d'un trajet. Ainsi les stratégies déterministes pour VEHR diffèrent de celles des VEH afin de tirer profit de la charge disponible dans la batterie et ainsi diminuer la consommation. Certains auteurs proposent des stratégies déterministes pour VEHR en adaptant celles pour les VEH [19]. Ces stratégies visent dans un premier temps à décharger la batterie rapidement en utilisant presque exclusivement le moteur électrique pour la propulsion. La figure II.8 montre l'évolution qualitative de l'état de charge de la batterie au cours du temps :

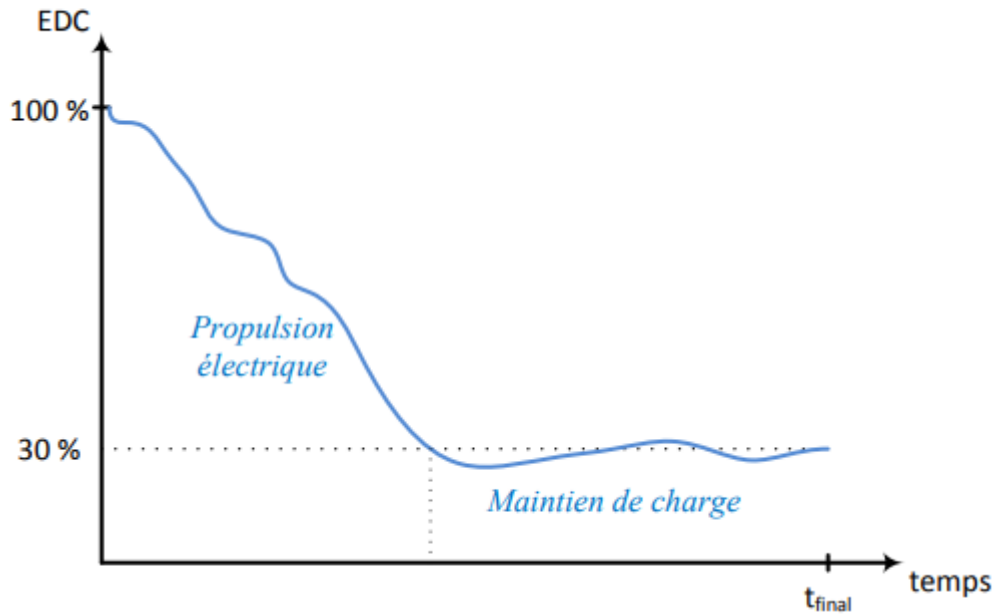


Figure II.6. EDC d'un VEHR utilisant une stratégie de contrôle de type déterministe [16]

La simplicité et la fiabilité sont les atouts principaux de ces stratégies de contrôle mais en contrepartie elles ne sont généralement pas optimales du point de vue consommation. En effet, elles privilégient une forte décharge suivie d'une phase de maintien de charge.

II.4.1.2. Approche par logique floue

Cette stratégie a été largement utilisée pour la conception de stratégies de contrôle pour VEH. Elle est utilisée la plupart du temps dans le but de contrôler le partage de puissance entre les deux moteurs en se basant sur l'état de charge comme variable d'entrée principale et sur d'autres variables d'entrée telles que le couple requis, la puissance requise, la vitesse du véhicule, son accélération ou encore la vitesse des moteurs [20]. Dans de plus rares cas, la logique floue est utilisée pour la décision du choix d'un mode de fonctionnement. L'application de la logique floue au contrôle des VEHR est plus rare et propose des stratégies de décharge de type « tout électrique » semblables aux stratégies déterministes. [21]

Dans la logique floue, les variables d'entrée et de sortie sont caractérisées par des termes linguistiques « flous » (ex : faible, moyen, fort) auxquels sont attribuées des fonctions d'appartenance. Contrairement à la logique déterministe qui effectue une classification binaire et stricte suivant la valeur de la variable, les fonctions d'appartenance de la logique floue permettent d'attribuer aux variables d'entrée et de sortie, un degré d'appartenance aux classes (les termes linguistiques flous) suivant leur valeur. Ces degrés d'appartenance peuvent prendre n'importe

quelle valeur entre 0 et 1. Typiquement, l'approche déterministe pourrait par exemple associer plusieurs classes à la variable EDC et utiliserait des seuils fixes pour déterminer la classe à laquelle appartient la variable à l'instant considéré. L'état de charge est considéré comme trop bas en dessous de 22 %, acceptable entre 22 % et 38 % et trop haut au-dessus de 38 % [16].

Ainsi en considérant les règles déterministes suivantes :

- forcer la recharge de la batterie lorsque l'état de charge est trop bas.
- imposer un partage de puissance de manière à maximiser le rendement lorsque l'état de charge est trop haut.

Les valeurs de 21,9 % et 22,1 % entraînent des comportements complètement différents alors qu'elles sont en réalité très proches l'une de l'autre.

La logique floue permet d'éviter ce genre de situation en utilisant les fonctions et degrés d'appartenance. Sur la figure II.9 l'état de charge 21,9 % est classé dans la catégorie « trop bas » avec un degré d'appartenance de 0,65 et dans la catégorie « acceptable » avec un degré d'appartenance de 0,29. L'état de charge 22,1 % est classé dans la catégorie « trop bas » avec un degré d'appartenance de 0,64 et dans la catégorie « acceptable » avec un degré d'appartenance de 0,30. Ainsi pour des valeurs proches, les degrés d'appartenance restent proches. La figure II.9 nous montre les fonctions et les degrés d'appartenance de la logique floue :

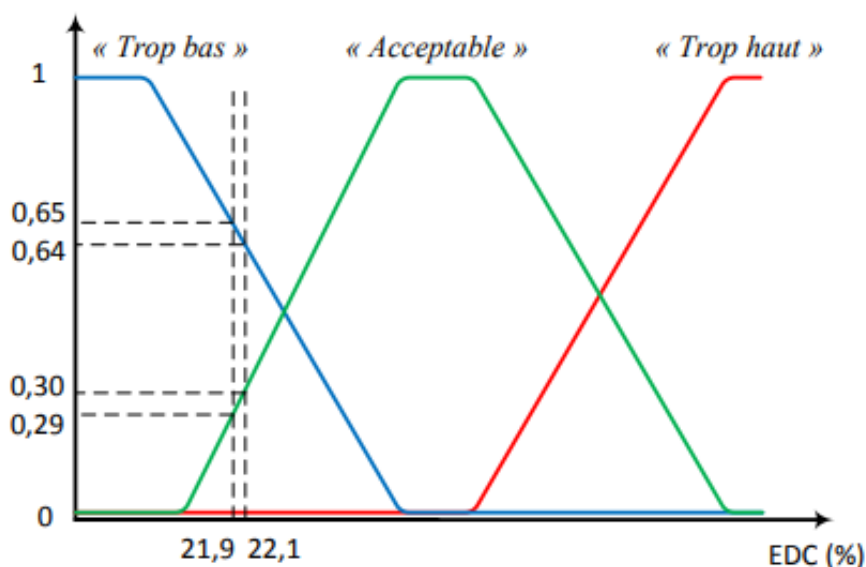
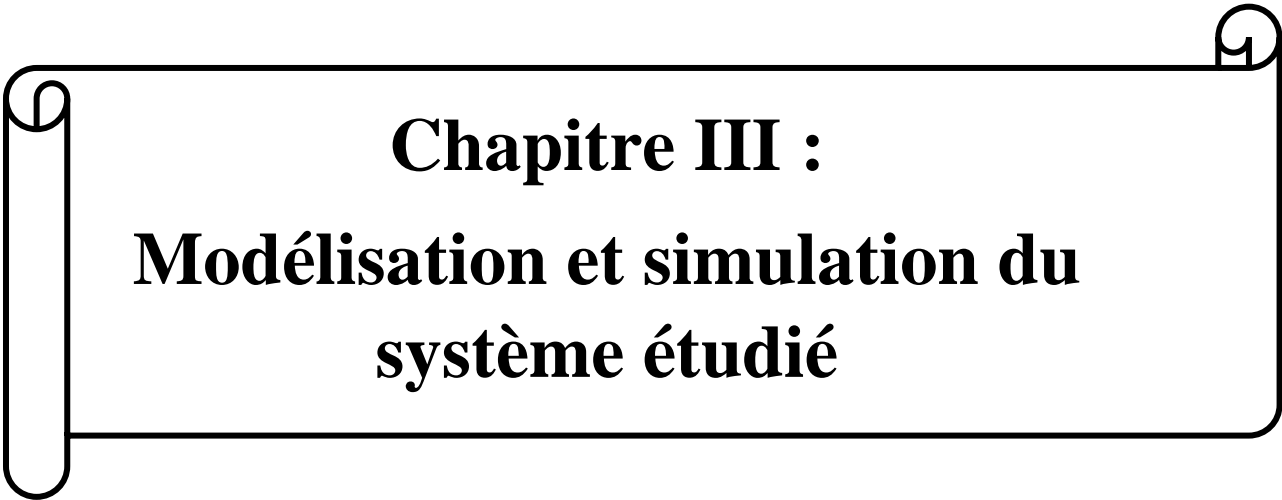


Figure II.7. Fonctions et degrés d'appartenance de la logique floue [16]

Tout comme les stratégies déterministes, la logique floue utilise des règles. À la différence des stratégies déterministes, la structure des règles et le degré d'appartenance sont utilisés afin d'établir un degré de satisfaction différent pour chaque règle et variant suivant la valeur des variables d'entrée. Ainsi plusieurs règles peuvent être satisfaites à des degrés différents.

II.5. conclusion

L'objectif de ce chapitre est d'abordé les différentes Sources d'énergie embarquées dans les véhicules hybrides électriques dont la pile à combustible ,les accumulateurs électriques, les batterie et les super-condensateurs, après ça nous a rend compte à la problématique de gestion d'énergie embarqué dans les systèmes hybrides électriques ,Cet exposé nous permettra d'aborder, dans ce chapitre, les différentes approches de gestion de l'énergie, telles l'approche déterministe et l'approche par logique floue.

A decorative frame resembling a scroll, with a vertical bar on the left and a horizontal bar at the top and bottom. The corners are rounded and feature scroll-like flourishes.

Chapitre III :
Modélisation et simulation du
systeme étudié

Tout comme les stratégies déterministes, la logique floue utilise des règles. À la différence des stratégies déterministes, la structure des règles et le degré d'appartenance sont utilisés afin d'établir un degré de satisfaction différent pour chaque règle et variant suivant la valeur des variables d'entrée. Ainsi plusieurs règles peuvent être satisfaites à des degrés différents.

II.5. conclusion

L'objectif de ce chapitre est d'abordé les différentes Sources d'énergie embarquées dans les véhicules hybrides électriques dont la pile à combustible ,les accumulateurs électriques, les batterie et les super-condensateurs, après ça nous a rend compte à la problématique de gestion d'énergie embarqué dans les systèmes hybrides électriques ,Cet exposé nous permettra d'aborder, dans ce chapitre, les différentes approches de gestion de l'énergie, telles l'approche déterministe et l'approche par logique floue.

III.1. Introduction

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

Cette partie est consacrée à l'étude et la modélisation ainsi que la simulation du système étudié.

III.2. Modélisation de la pile à combustible type PEM

Cette modélisation a pour but de réaliser un modèle mathématique d'une pile à combustible de type PEM, son schéma équivalent est sur la figure suivante :

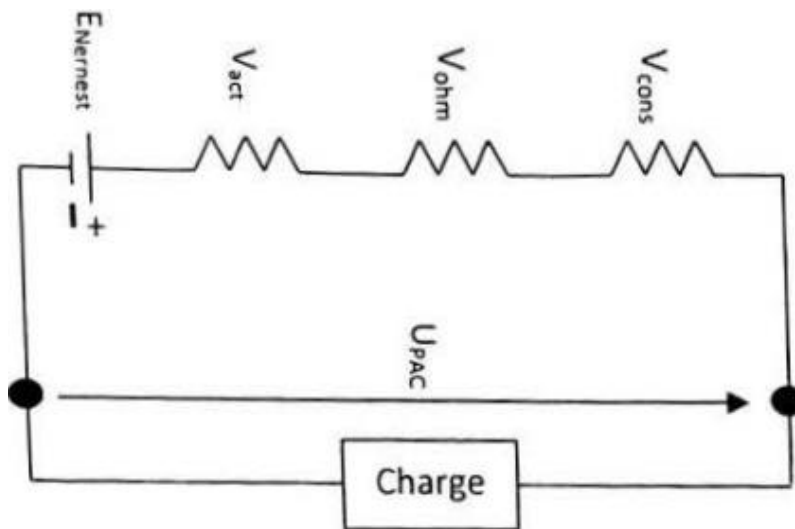


Fig.III.1 : schéma équivalent d'une PEMFC

$$\text{On a : } U_{pac} = E_{Nernst} - V_{act} - V_{ohm} - V_{conc} \quad (\text{III.1})$$

V_{act} : Polarisation d'activation

V_{ohm} : Polarisation ohmique

V_{conc} : Polarisation de concentration

$$E_{Nernst} = 1.229 - 0.85 \times 10^{-3} \times (T - 298.15) + 4.31 \times 10^{-5} \times [\ln(P_{H_2}^*) + \frac{1}{2} \ln(P_{O_2}^*)] \quad (\text{III.2})$$

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

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

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

III.2.1. Polarisation d'activation

Les pertes d'activations sont dues au démarrage des réactions chimiques, ils sont essentiellement dus aux réactions cathodiques.

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

$$V_{act} = \varepsilon_1 + (\varepsilon_2 \times T) + (\varepsilon_3 \times T) \times \ln(C_{O_2}^*) + \varepsilon_4 \times T \times \ln(I_{PAC}) \quad (\text{III.3})$$

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

$\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3, \varepsilon_4$: Sont des coefficients paramétriques appropriés à chaque modèle physique de la pile à combustible PEMFC.

$$C_{O_2}^* = \frac{P_{O_2}^*}{\left(5.08 \times 10^6 \times e^{\left(-\frac{498}{T}\right)}\right)} \quad (\text{III.4})$$

$C_{O_2}^*$: représente les concentrations de l'oxygène (mol /cm³) dissout dans un film d'eau à l'interface de la membrane gaz/liquide sur la surface catalytique de la cathode, elle est exprimée en fonction de sa pression par la loi de Henry [22]

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

$$P_{O_2}^* = P_{cath} \times (1 - \nu_{H_2O}^{Sat}) \quad (\text{III.5})$$

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

$\kappa_{H_2O}^{Sat}$: La fraction molaire de saturation de l'eau dans le gaz humidifié est supposée \approx à 50 %, on obtient alors :

$$P_{O_2}^* = P_{cath} \times \left(\frac{1}{2}\right) \quad (III.6)$$

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

$$P_{H_2}^* = P_{anode} \times \left(1 - \frac{1}{2}\kappa_{H_2O}^{sat}\right) \quad (III.7)$$

P_{anode} : est la pression de l'hydrogène l'anode.

$$P_{H_2}^* = P_{anode} \times \left(\frac{3}{4}\right) \quad (III.8)$$

III.2.2. Polarisation ohmique

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

$$V_{ohm} = I_{pac} \times (R_M + R_C) \quad (III.9)$$

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

$$R_M = \frac{I x r_M}{A} \quad (III.10)$$

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

$$r_M = \frac{181.6 \times [1 + 0.03 \times \left(\frac{I_{pac}}{A}\right) + 0.062 \times \left(\frac{T}{303}\right)^2 \times \left(\frac{I_{pac}}{A}\right)^{2.5}]}{\left[\frac{H_2O}{SO_3} - 0.634 - 3 \times \left(\frac{I_{pac}}{A}\right)\right] \times \exp\left[4.18 \times \left(\frac{T-303}{T}\right)\right]} \quad (III.11)$$

Le terme : $\frac{181.6}{\left(\frac{\delta_{H_2O}}{SO_3} - 0.634\right)}$ représente la résistance spécifique de la membrane ($\Omega \cdot cm$) 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 celle 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. Est A la surface active de la pile (cm)²

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

$$V_{ohm} = \frac{I_{pac}}{A} \left[\frac{181.6 \times \left[1 + 0.03 \times \left(\frac{I_{pac}}{A} \right) + 0.062 \times \left(\frac{T}{303} \right)^2 \times \left(\frac{I_{pac}}{A} \right)^{2.5} \right]}{\left[\frac{\delta_{H_2O}}{SO_3^-} - 3 \times \left(\frac{I_{pac}}{A} \right) \right] \times \exp \left[4.18 \times \left(\frac{T-303}{T} \right) \right]} \times I + A \times R_C \right] \quad (III.12)$$

III.2.3. Polarisation de concentration

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

$$V_{conc} = -B \left(1 - \frac{J}{J_{max}} \right) \quad (III.13)$$

Où B est une constante empirique qui dépend du type de pile et de son état de fonctionnement, J est la densité de courant du fonctionnement permanente (A/cm²), J_{max} est la densité de Courant maximale. Par conséquent, la tension (E_s) de (n) piles unitaires reliées en série formant un assemblage :

$$E_s = n \times E_{pac} \quad (III.14)$$

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

$$U_{pac} = 0.2817 - 0.85 \times 10^{-3} (T - 298.15) + 4.3081 \times T \left[\ln \left(\frac{3}{4} P_{anode} \right) + \frac{1}{2} \ln \left(\frac{1}{2} P_{cath} \right) \right] + \left[2.86 \times 10^{-3} + 2 \times 10^{-4} \ln(A) + 4.3 \times 10^{-5} \ln \left(\frac{0.75 P_{anode}}{1.091 \times 10^6 \times \exp \left(\frac{77}{T} \right)} \right) \right] T + 7.6 \times$$

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

$$I_{pac} \left[\frac{181.6 \left[1 + 0.03(I_{pac}) + 0.062 \left(\frac{T}{303} \right)^2 \left(\frac{I_{pac}}{A} \right)^{2.5} \right]}{A \left[\frac{\delta_{H_2O}}{503} - 0.0634 - 3 \left(\frac{I_{pac}}{A} \right) \right] \exp\left[4.18 \left(\frac{T-303}{T} \right) \right]} l + R_C \right] + B \left(1 + \frac{J}{J_{max}} \right) \quad (III.15)$$

III.3. Modélisation de la batterie

Il existe plusieurs modèles de batterie au plomb et leur mise en œuvre n'est pas aisée du fait de la prise en compte de plusieurs paramètres, suivant les applications et les contraintes auxquelles elles sont soumises, les batteries réagissent différemment, et donc on ne trouve pas de modèle unique qui soit exact dans toutes les circonstances. Notre choix s'est porté sur le modèle dit « CIEMAT » relativement complet, malgré quelques imperfections comme le saut de tension lorsqu'on passe d'un cycle de charge à un cycle de décharge, ce modèle est basé sur le schéma suivant (fig.III.2) où la batterie est décrite par seulement deux éléments, une source de tension et une résistance interne, dont les valeurs dépendent d'un certain nombre de paramètres. [23]

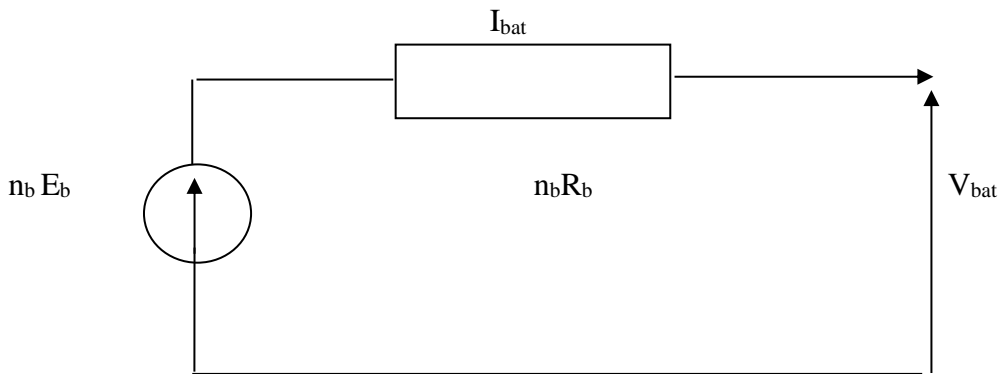


Fig. III.2 schéma équivalent de n_b éléments de la batterie

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

$$V_{bat} = n_b E_b + n_b R_b I_{bat} \quad (III.16)$$

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

III.3.1. modelisation de la capacite C_{bat}

Le modèle de la capacité C_{bat} donne la quantité d'énergie que peut restituer la batterie en fonction du courant moyen de décharge $I_{bat.moy}$ cette capacité est donnée par l'équation suivante :

$$C_{bat} = I_{10} \frac{1.67 \times C_{10}}{1 + 0.67 \times \left(\frac{I_{bat.moy}}{I_{10}}\right)^{0.9}} (1 + 0.005\Delta T) \quad (III.17)$$

Avec :

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

$I_{bat.moy} = 5A$

C_{10} : capacité nominale de la batterie (en Ah) en régime de décharge a courant constant durant 10 heures. Elle est donnée par le constructeur et elle est telle que :

$$C_{10} = 10 \times I_{10} \quad (III.18)$$

ΔT : L'échauffement de la batterie par rapport à la température ambiante de $25^{\circ}C$. Il est supposé identique pour tous les éléments de la batterie. $\Delta T = (T - T_a)$ et $T = 50^{\circ}C$

L'état de charge de la batterie EDC est en fonction de la capacité C_{bat} et de la quantité de charge manquante à la batterie Q_m . L'évolution temporelle de cette dernière dépend du mode de fonctionnement de la batterie, elle est définie par l'équation (III.19):

$$Q_m = I_{bat} \times t \quad (III.19)$$

Où t est la durée de fonctionnement de la batterie avec un courant I_{bat} , l'expression de l'État de charge de la batterie EDC est donnée par (III.20):

$$EDC = 1 - \frac{Q_m}{C_{bat}} \quad (III.20)$$

III.3.2. Équation de la tension de décharge

En régime de décharge, la f.é.m. et la résistance interne sont déterminée par (III.21) et (III.22) :

$$E_{b-dech} = 1.965 + 0.12EDC \quad (III.21)$$

$$R_{b-déch} = R_{bec} = \frac{1}{C_{10}} \left(\frac{4}{1 + I_{bat}^{0.8}} + \frac{0.27}{EDC^{1.5}} \right) \quad (III.22)$$

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

$$V_{bat-déch} = n_b [1.965 + 0.12EDC] - n_b \frac{I_{bat}}{C_{10}} \left(\frac{4}{1 + I_{bat}^{0.8}} + \frac{0.27}{EDC^{1.5}} + 0.02 \right) (1 - 0.007\Delta T) \quad (III.23)$$

III.3.3. Équation de la tension de charge

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

$$E_{b-char} = 2 + 0.16 EDC \quad (III.24)$$

$$R_{b-char} = R_b = \frac{1}{C_{10}} \left(\frac{6}{1+I_{bat}^{0.86}} + \frac{0.48}{(1-EDC)^{1.2}} + 0.036 \right) (1 - 0.025 \cdot \Delta T) \quad (III.25)$$

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

$$V_{b-char} = n_b [2 + 0.16 \cdot EDC] + n_b \frac{I_{bat}}{C_{10}} \left(\frac{6}{1+(I_{bat})^{0.86}} + \frac{0.48}{(1-EDC)^{1.2}} + 0.036 \right) (1 - 0.025 \cdot \Delta T) \quad (III.26)$$

Tel-que : $n_b = 6$

III.4. Machine asynchrone

Les enroulements des trois phases statoriques et des trois phases rotoriques dans l'espace peuvent être représentés, comme indiqué sur la figure ci-après. Les phases rotoriques sont court-circuitées sur elles-mêmes. Pour chacun d'eux, nous pouvons écrire d'après Faraday la loi suivante:

$$v = R \cdot i - e = R \cdot i - \frac{d\theta}{dt} \quad (III.27)$$

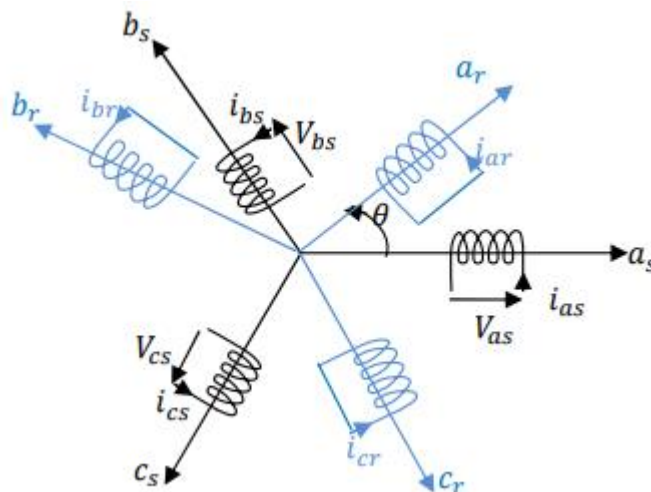


Fig. III. 3. Présentation des axes statoriques et rotoriques

L'angle θ caractérise la position angulaire du rotor par rapport au stator.

Nous résumons les trois phases statoriques et rotoriques par l'écriture matricielle suivante:

Pour le stator nous avons :

$$[Vabcs] = R_s[Iabcs] + \frac{d}{dt}[Qabcs] \quad (III.28)$$

Et pour le rotor :

$$[Vabcr] = R_r[Iabcr] + \frac{d}{dt}[Qabcr] = 0 \quad (III.29)$$

Chaque flux comporte une interaction avec les courants de toutes les phases y compris la sienne (notion de flux / inductance propre):

$$\begin{bmatrix} Q_{as} \\ Q_{bs} \\ Q_{cs} \\ \dots \\ Q_{ar} \\ Q_{br} \\ Q_{cr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [Q_s] \\ \dots \\ [Q_r] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [M_{ss}] & [M_{sr}(\theta)] \\ [M_{rs}(\theta)] & [M_{rr}] \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \\ \dots \\ i_{ar} \\ i_{br} \\ i_{cr} \end{bmatrix} \quad (III.30)$$

III.4. 1. Application de la transformée de Park à la machine asynchrone

Les modèles des machines électriques les plus utilisés sont basés sur la théorie unifiée des machines électriques. Cette théorie est basée sur la transformation de Park, qui rapporte les équations électriques statoriques et rotoriques à un système cartésien d'axes (dq) [24]. La modélisation de la machine asynchrone passe par la transformation d'un système triphasé à un système biphasé et inversement, avec la création d'un champ électromagnétique tournant avec des forces magnétomotrices égales. Les trois enroulements du stator peuvent être remplacés par deux enroulements fictifs déphasés de $\pi/2$ dans l'espace et alimentés par des courants déphasés aussi de $\pi/2$ dans le temps. Les deux enroulements virtuels sont disposés sur les axes d et q. Ayant toujours l'axe as comme référence, on définit les angles θ_r , θ_s et θ_{sr} comme dans la figure (III.4).

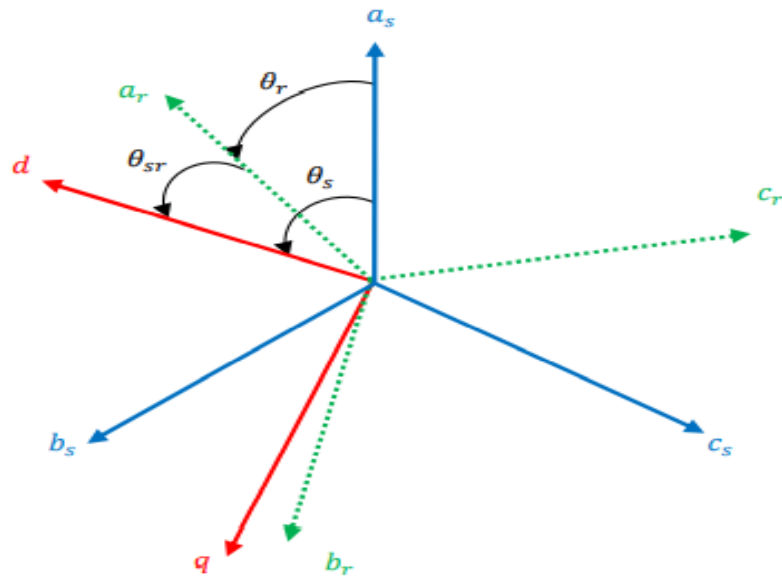


Fig. III.4. Représentation des axes statorique et rotorique dans le repère (d, q).

La figure (III.5) illustre la disposition des enroulements statoriques et rotoriques dans le repère fictif (d, q).

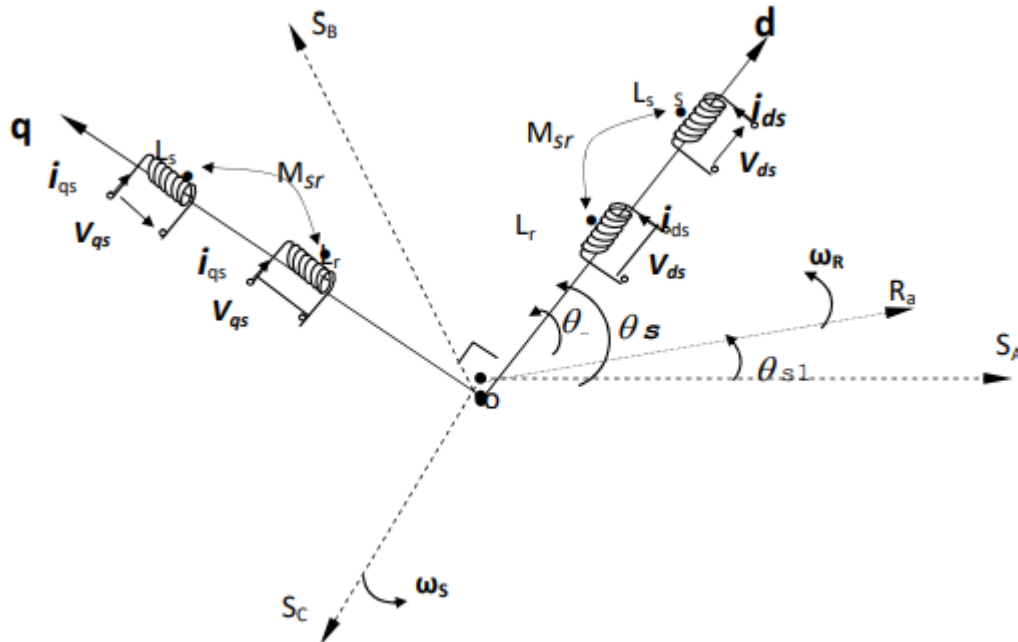


Fig. III. 5. Représentation de la machine asynchrone dans repère biphasé

Pour passer du système triphasé, abc, au système biphasé, dq, (et réciproquement) il faut utiliser les transformations de Park [24] [25]:

$$[P(\theta i)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta i) & \cos(\theta i - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta i + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta i) & -\sin(\theta i - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta i + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{III.31})$$

$$[P(\theta i)]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta i) & -\sin(\theta i) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta i - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta i - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta i - \frac{4\pi}{3}) & -\sin(\theta i - \frac{4\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{III.32})$$

Le changement de variable relatif aux courants, aux tensions et aux flux est :

$$\begin{bmatrix} x_d \\ x_q \\ x_h \end{bmatrix} = [P(\theta i)] \cdot \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} \text{ et } \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} = [P(\theta i)]^{-1} \cdot \begin{bmatrix} x_d \\ x_q \\ x_h \end{bmatrix} \quad (\text{III.33})$$

Où θi représente l'angle entre l'axe "d" et l'axe de référence dans le système triphasé. Dans le cas d'une alimentation sinusoïdale équilibrée, les composantes homopolaires sont nulles.

Lorsque la valeur zéro est attribuée à l'angle θi (c'est-à-dire le système d'axes triphasé est immobile par rapport au système d'axes biphasé), la transformation de Park ainsi particularisée, porte le nom de la transformation de Concordia [T] pour la conservation des puissances, et la transformation de Clarke [C] pour la conservation des amplitudes. Les axes sont habituellement désignés par α , β .

Les matrices de passage direct et indirect sont respectivement :

$$[T] = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}; \quad [T]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{III.34})$$

$$[C] = \frac{2}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}; \quad [C]^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{III.35})$$

Ces transformations seront utilisées dans le contrôle direct du couple de la machine asynchrone. Dans le système $(\alpha \beta)$, on a toujours des grandeurs électriques alternatives, mais les équations de la machine asynchrone sont fortement simplifiées. On a choisi le coefficient $2/3$ pour la matrice Park afin de conserver l'amplitude pendant le passage entre les deux référentiels.

III.4.2. Equations électriques de la machine asynchrone dans le repère α, β

Les équations de la machine asynchrone dans le référentiel $(\alpha \beta)$ sont : [24] [26] [27]

$$\frac{d}{dt} \Phi_{s\alpha} = -R_s \cdot i_{s\alpha} + v_{s\alpha} \quad (\text{III.36})$$

$$\frac{d}{dt} \Phi_{s\beta} = -R_s \cdot i_{s\beta} + v_{s\beta} \quad (\text{III.37})$$

$$\frac{d}{dt} \Phi_{r\alpha} = -\omega_r \cdot \Phi_{r\beta} - R_r \cdot i_{r\alpha} \quad (\text{III.38})$$

$$\frac{d}{dt} \Phi_{r\beta} = \omega_r \cdot \Phi_{r\alpha} - R_r \cdot i_{r\beta} \quad (\text{III.39})$$

$$C_{em} = \frac{3}{2} p (i_{s\beta} \Phi_{s\alpha} - i_{s\alpha} \Phi_{s\beta}) \quad (\text{III.40})$$

Les relations entre les courants et les flux sont données ci-dessous :

$$\Phi_{s\alpha} = L_s \cdot i_{s\alpha} + M \cdot i_{r\alpha} \quad (\text{III.41})$$

$$\Phi_{s\beta} = L_s \cdot i_{s\beta} + M \cdot i_{r\beta} \quad (\text{III.42})$$

$$\Phi_{r\alpha} = L_r \cdot i_{r\alpha} + M \cdot i_{s\alpha} \quad (\text{III.43})$$

$$\Phi_{r\beta} = L_r \cdot i_{r\beta} + M \cdot i_{s\beta} \quad (\text{III.44})$$

A partir d'expressions [II.43] et [II.44], on déduit les expressions des courants rotoriques:

$$i_{r\alpha} = \frac{1}{L_r} \Phi_{r\alpha} - \frac{M}{L_r} i_{s\alpha} \quad (\text{III.45})$$

$$i_{r\beta} = \frac{1}{L_r} \Phi_{r\beta} - \frac{M}{L_r} i_{s\beta} \quad (\text{III.46})$$

En introduisant [II.45] et [II.46] dans [II.43] et [II.44], on obtient les composantes du flux statorique :

$$\Phi_{s\alpha} = \sigma \cdot L_s \cdot i_{s\alpha} + \frac{M}{L_r} \Phi_{r\alpha} \quad (\text{III.47})$$

$$\Phi_{s\beta} = \sigma \cdot L_s \cdot i_{s\beta} + \frac{M}{L_r} \Phi_{r\beta} \quad (\text{III.48})$$

Où : $\sigma = 1 - \frac{M^2}{L_s \cdot L_r}$ est le coefficient de dispersion.

Enfin, en remplaçant les composantes du flux statorique et celles du courant rotorique, on obtient le modèle mathématique de la machine asynchrone utilisé pour le contrôle direct de couple :

$$\sigma L_s \frac{d}{dt} \Phi_{s\alpha} = -R_s \cdot i_{s\alpha} - \frac{M}{L_r} \frac{d}{dt} \Phi_{r\alpha} + v_{s\alpha} \quad (\text{III.49})$$

$$\sigma L_s \frac{d}{dt} \Phi_{s\beta} = -R_s \cdot i_{s\beta} - \frac{M}{L_r} \frac{d}{dt} \Phi_{r\beta} + v_{s\beta} \quad (\text{III.50})$$

$$\frac{d}{dt} \Phi_{r\alpha} = -\frac{R_r}{L_r} \cdot \Phi_{r\alpha} - \omega_r \cdot \Phi_{r\beta} + \frac{R_r \cdot M}{L_r} i_{s\alpha} \quad (\text{III.51})$$

$$\frac{d}{dt} \Phi_{r\beta} = -\frac{R_r}{L_r} \cdot \Phi_{r\beta} - \omega_r \cdot \Phi_{r\alpha} + \frac{R_r \cdot M}{L_r} i_{s\beta} \quad (\text{III.52})$$

$$C_{em} = \frac{3}{2} p (i_{s\beta} \Phi_{s\alpha} - i_{s\alpha} \Phi_{s\beta}) \quad (\text{III.53})$$

III.5. Model mécanique du véhicule

Le véhicule électrique est un système complexe, constitué de composant très variés et de nature différente (mécanique, électrique, électrochimique...). Afin de pouvoir modéliser le véhicule électrique, il faut déterminer le bilan des efforts appliqués au véhicule. Les équations utilisées sont directement issues des théories de la mécanique et de l'aérodynamique. Elles sont applicables à des véhicules routiers à quatre roues à traction.

Les différentes forces agissant sur le véhicule électrique avec un masse total m, en mouvement au long d'une pente sont représentées sur la figure (III.6) Nous avons trois principales forces [28] [29] :

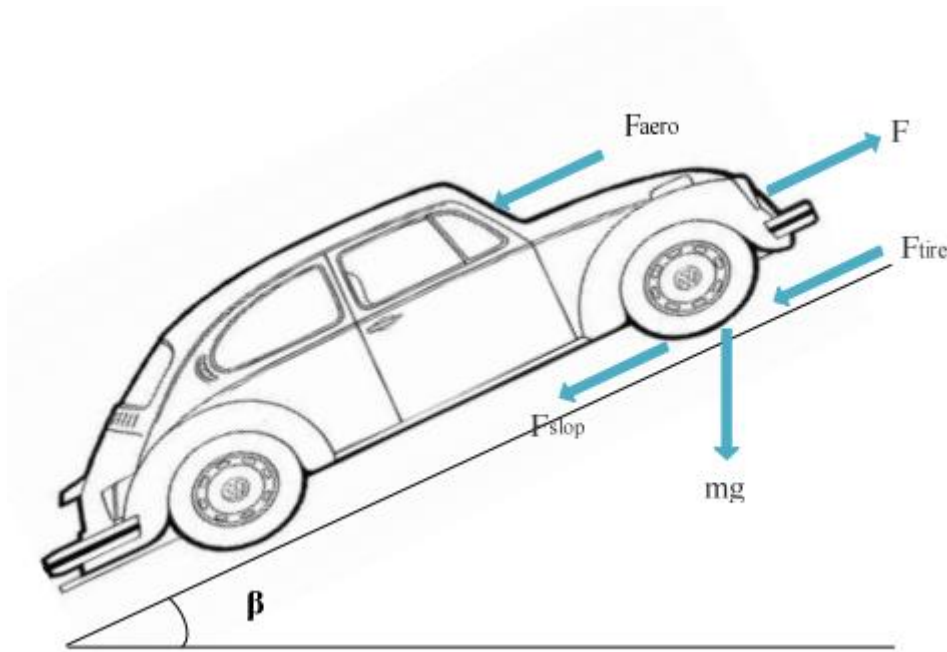


Fig. III. 6. Représentation des forces agissant sur le véhicule

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

$$F_{tire} = m \cdot g \cdot f_{ro} \cos(\beta) \quad (III.54)$$

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

$$F_{aero} = \frac{1}{2} \rho_{air} A_f C_d V_e^2 \quad (III.55)$$

- $F_{slope} = m g \sin(\beta) \quad (III.56)$

Avec :

m : la masse totale du véhicule en 'kg'

g : la gravité en 'm/s²'

f_{ro} : la constante de la force de résistance due au déplacement ;

ρ_{air} : La densité de l'air en 'kg/m³'

A_f : la surface frontale du véhicule 'm²'

C_d : le coefficient de trainée aérodynamique

V_e : la vitesse du véhicule en 'm/s'

β : l'angle de pente de la route en 'rad'.

La force résistive totale est donnée par la formule suivante :

$$F_r = F_{tire} + F_{aero} + F_{slope} \quad (III.57)$$

Le moteur électrique assure la force de traction du véhicule 'F' électrique. L'équation du mouvement est alors donné par :

$$m \frac{dV_e}{dt} = F - F_r \quad (III.58)$$

La force (F-F_r) accélère (respectivement décélère) le véhicule si la différence est positive (respectivement négative).

La puissance mécanique du véhicule électrique est donnée par l'expression suivante :

$$P_v = F_r \cdot V_e \quad (III.59)$$

En fin, le couple du moteur est donné par l'expression suivante :

$$T_r = F_r \cdot \frac{r}{G} \quad (III.60)$$

Où 'r' est le rayon de la roue et 'G' représente le gain du réducteur qui relie le moteur à l'axe.

III.6. La commande directe du couple

La commande DTC d'une machine asynchrone est basée sur la détermination directe des séquences de commande appliquées aux interrupteurs d'un onduleur de tension à partir des valeurs calculées du flux statorique et du couple. Donc l'état des interrupteurs est lié directement à l'évolution de l'état électromagnétique du moteur asynchrone. Les deux variables contrôlées sont : le flux statorique et le couple électromagnétique qui sont commandées par des comparateurs à hystérésis [30]. Il s'agit de maintenir les grandeurs du flux statorique et le couple électromagnétique à l'intérieur de ces bandes d'hystérésis. La sortie de ces régulateurs détermine

le vecteur de tension optimal à appliquer à chaque instant de commutation [31]. Avant de déterminer une stratégie de contrôle de flux en s'inspirant d'une stratégie de commande directe de couple (DTC) utilisant des tables de commutations, un modèle de l'onduleur doit être établi.

La figure (III.7) montre le schéma électrique simplifié d'un onduleur de tension classique alimentant une charge triphasée supposée équilibrée, connectée en étoile avec un neutre mis à la terre.

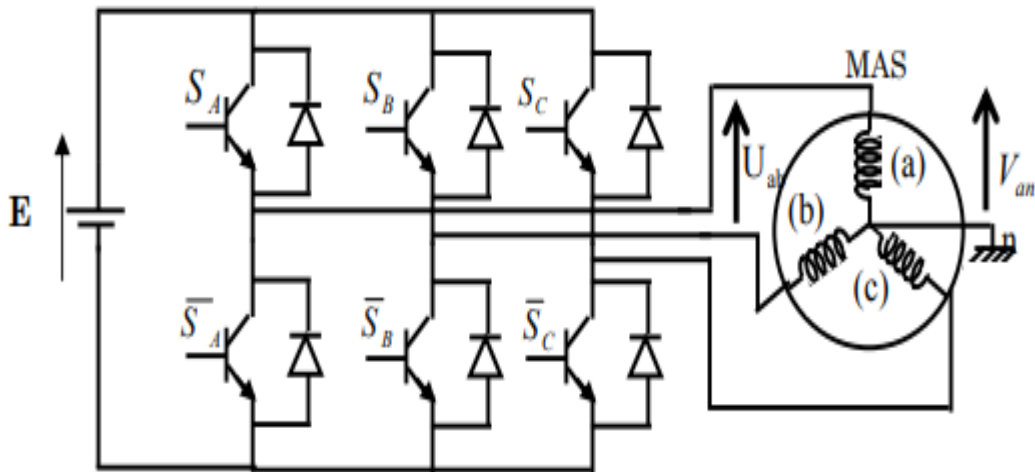


Figure.III.7 Onduleur triphasé et sa charge.

D'après l'équation (III.60) l'onduleur génère un vecteur de tension qui est directement lié aux grandeurs de commandes (S_i). La combinaison de ces grandeurs permet d'obtenir huit vecteurs de tensions représentés dans le plan par la (figure (III.8) dont, deux sont nuls (V_0 et V_7).

$$V_s = \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot E \cdot [S_a + S_b \cdot e^{j2\pi/3} + S_c \cdot e^{j4\pi/3}] \quad (\text{III.60})$$

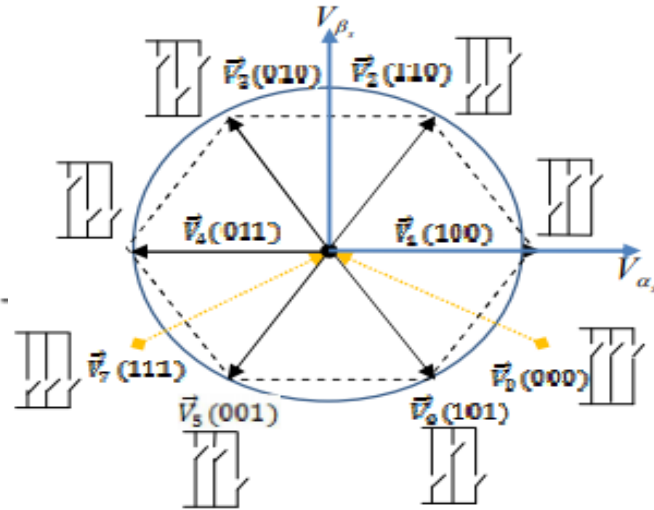


Fig.III.8. Elaboration des vecteurs V_s (S_a, S_b, S_c) à partir de l'onduleur de tension

III.6.1. Contrôle du vecteur flux statorique

À partir du modèle de la machine asynchrone dans un repère lié au stator et de l'expression de la tension statorique, le flux statorique est estimé à partir de la relation suivante [32] :

$$\phi_s(t) = \int_0^t (\vec{V}_s(t) - R_s \vec{i}_s(t)) dt \tag{III.61}$$

Sur un intervalle périodique de contrôle $[0, T_e]$ correspondant à une période d'échantillonnage T_e les commandes (S_a, S_b, S_c) sont fixés, ainsi, on peut écrire :

$$\phi_s(t) = \phi_{s0} + V_s \cdot T_e \tag{III.62}$$

Où ϕ_{s0} : est le vecteur flux à l'instant $t = 0$, et avec l'hypothèse que la résistance R_s reste constante. Pour simplifier notre étude, on considère le terme $R_s \cdot i_s$ comme négligeable par rapport à la tension V_s (ce qui se vérifie lorsque la vitesse de rotation est suffisamment élevée). L'extrémité du vecteur flux statorique ϕ_s se déplace sur un cercle dont la direction est donnée par la figure (III.9)

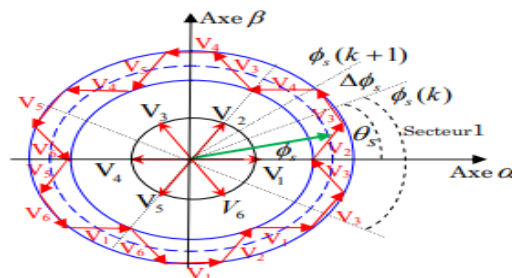


Fig.III.9. Exemple de l'évolution de l'extrémité de ϕ_s pour $V_s = V_3$

La composante radiale de vecteur de tension agit sur l'amplitude du vecteur flux et la composante tangentielle agit sur la position du vecteur flux.

III.6.2. Contrôle du couple électromagnétique

Le couple électromagnétique est exprimé par [33] :

$$T_e = \frac{3}{2} \cdot P \cdot \frac{M}{\sigma \cdot L_s \cdot L_r} \phi_s \cdot \phi_r \cdot \sin \delta \quad (\text{III.63})$$

Si les deux grandeurs, flux statorique et rotorique sont maintenues constantes, le couple peut être commandé par la variation de l'angle de charge δ . Dans la DTC, le vecteur tension, pour contrôler l'angle de charge et imposer le couple électromagnétique, est généré à partir d'une table selon la position du flux statorique. Dans le cas des onduleurs deux niveaux, le choix du vecteur est simple (six vecteurs).

III.6.3. Estimation du flux statorique

Les composantes du vecteur tension sont obtenues à partir de la mesure de la tension d'entrée de l'onduleur et les états des interrupteurs, on applique, la transformée de Clarke nous, obtenons [33] :

$$V_{s\alpha} = \frac{2}{3} V_{DC} \left(S_A - \frac{1}{2} (S_B + S_C) \right) \quad (\text{III.64})$$

$$V_{s\beta} = \frac{2}{3} V_{DC} \left(\frac{\sqrt{3}}{2} S_B - \frac{\sqrt{3}}{2} S_C \right) \quad (\text{III.65})$$

Les vecteurs du flux statorique (composantes) sur les axes α et β :

$$\begin{cases} \phi_{s\alpha}(t) = \int (V_{s\alpha}(t) - R_s \cdot i_{s\alpha}(t)) dt \\ \phi_{s\beta}(t) = \int (V_{s\beta}(t) - R_s \cdot i_{s\beta}(t)) dt \end{cases} \quad (\text{III.66})$$

Le module du flux statorique s'écrit :

$$\phi_s = \sqrt{\phi_{s\alpha}^2 + \phi_{s\beta}^2} \quad (\text{III.67})$$

La position du vecteur flux statorique s'écrit :

$$\theta_s = \tan^{-1} \frac{\phi_{s\beta}}{\phi_{s\alpha}} \quad (\text{III.68})$$

Ces équations représentent les étapes de calcul nécessaire à l'estimation de l'amplitude et la position du vecteur flux statorique.

III.6.4. Estimation du couple électromagnétique

Le couple électromagnétique peut se mettre sous la forme suivante :

$$T_e = \frac{3}{2} \cdot p \cdot (\phi_{s\alpha} i_{s\beta} - \phi_{s\beta} i_{s\alpha}) \tag{III.69}$$

À Partir de cette équation, l'estimateur du couple utilise seulement des grandeurs statoriques, flux $\phi_{s\alpha}$, $\phi_{s\beta}$ et courants $i_{s\alpha}$, $i_{s\beta}$.

III.6.5. Élaboration des tables de commutation

Un seul vecteur peut être générer pour ajuster le flux et le couple. Le choix de ce vecteur dépend des sorties des régulateurs du couple et du flux ainsi que la position du flux statorique.

III.6.6. Schéma général de la stratégie de contrôle DTC

Afin d'examiner la commande DTC, un modèle MATLAB/SIMULINK a été développé.

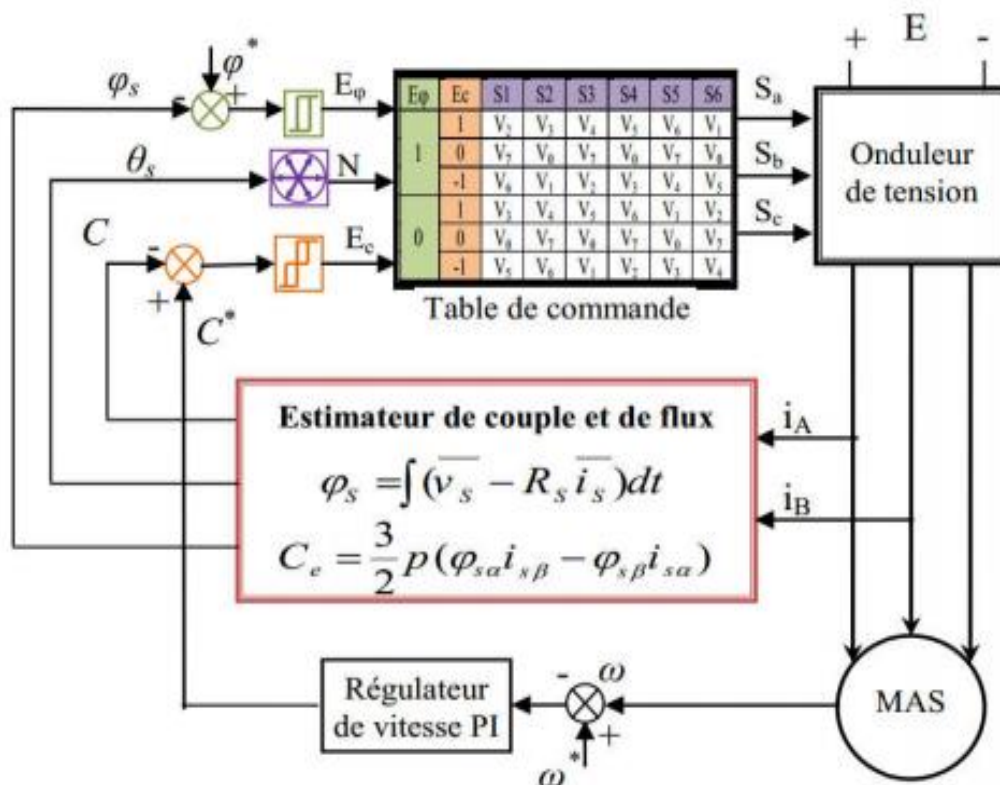


Fig. III.10. Schéma fonctionnel de la DTC. [23]

III.7. simulation du système étudié

La figure suivante représente le système globale modélisé sous matlab / Simulink

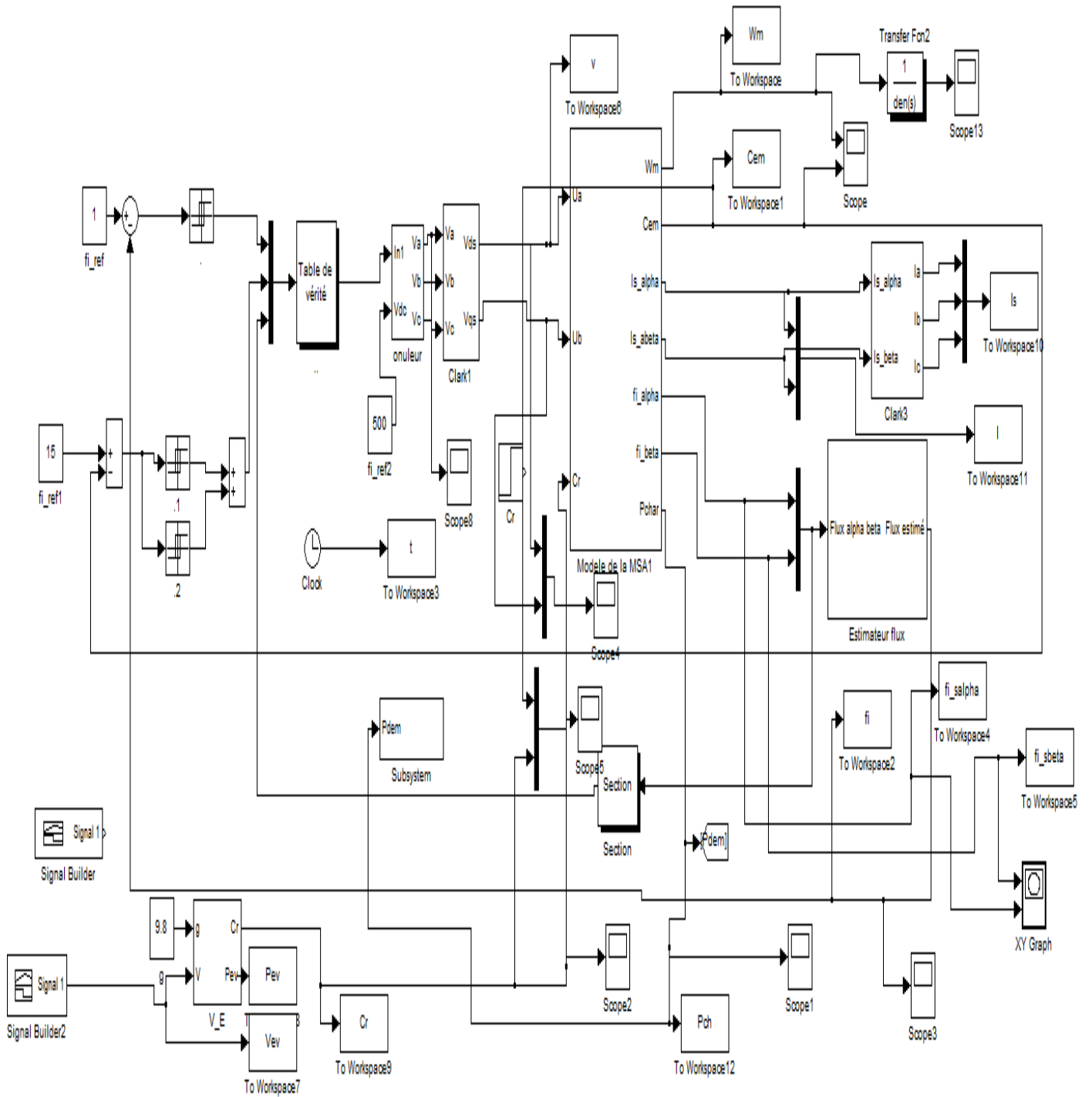


Fig. III.11 : bloc de simulation du système étudié

III.7.1 : Organigramme de gestion d'énergie

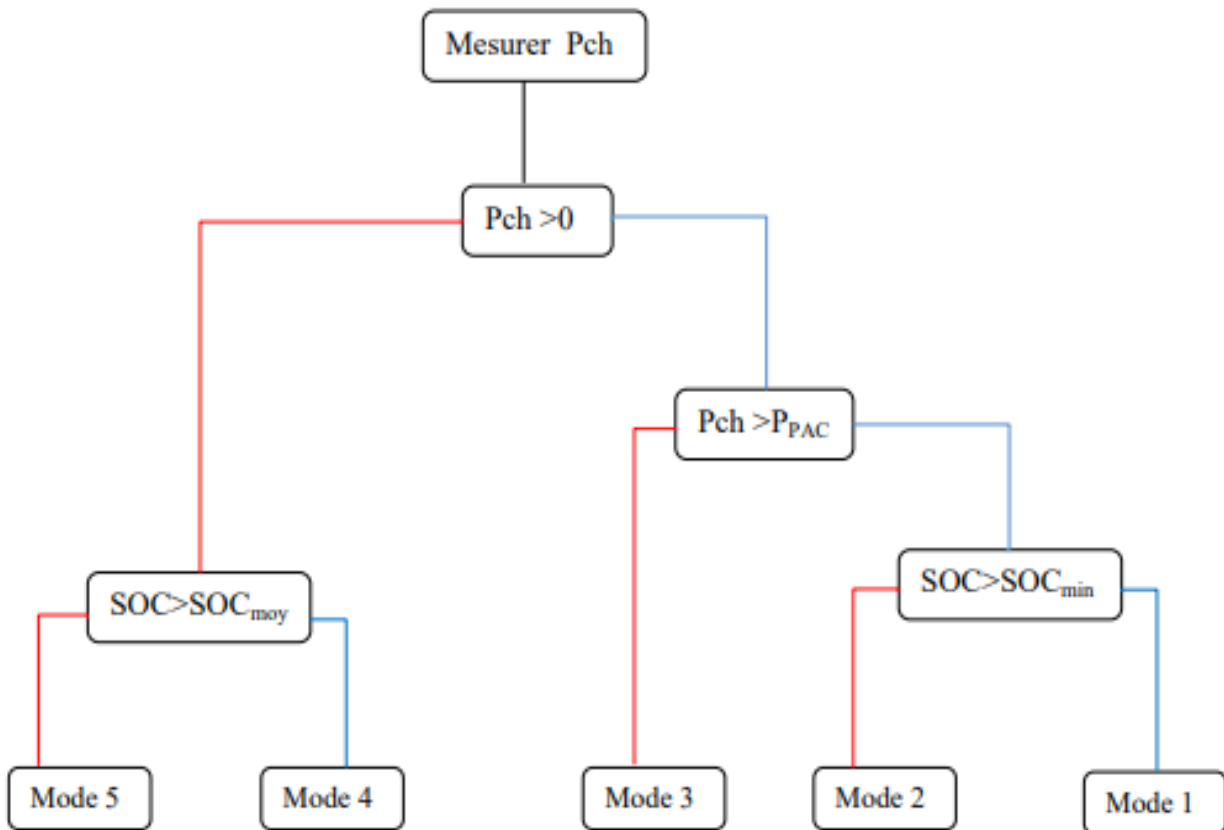


Fig. III.12 :L'organigramme de gestion d'énergie

Lorsque la puissance demandée est supérieur à zéro, nous avons trois modes:

Mode 1: les deux sources (la pile à combustible et les batteries) assurent l'alimentation de la charge variable ($P_{ch}=P_{PAC}+P_{BAT}$).

Mode 2: La première source (la pile à combustible) alimente la charge, malgré la puissance demandée est supérieure a celle de la pile à combustible ($SOC < SOC_{min}$).

Mode 3: La puissance demandée est assurée par la pile à combustible.

Mode 4: La puissance demandée par la charge est égale à zéro, et l'état de charge est inférieur à la moyenne. La pile à combustible charge les batteries.

Mode 5: Aucun flux d'énergie (Mode d'arrêt).

III.7.2 : Résultats de simulation

Le modèle est testé sur un cycle de 5 secondes pendant le fonctionnement à des vitesses différentes selon un profile, la stratégie de gestion d'énergie proposée a été simulé en utilisant le modèle dynamique du véhicule développé dans l'environnement matlab/ Simulink, On appliquant un profil de vitesse sur le système global on récupère les différentes allures qu'on a obtenu pour l'analyse :

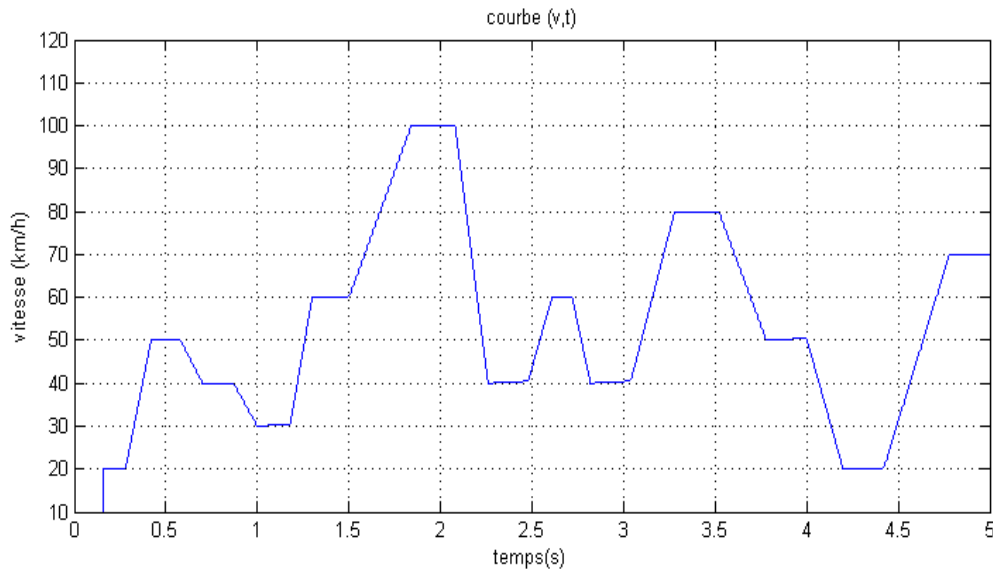


Fig. III.13 Profile de vitesse de référence en Km/h

La (Fig. III.13) montre l'allure de la vitesse du véhicule en km/h, on a choisi un profil de vitesse qui va nous permettre de voir les différents modes de fonctionnement du véhicule à savoir la traction, le freinage, et l'arrêt. Ce profile aussi va imposer l'allure du couple et de la vitesse du moteur car le modèle mécanique du véhicule est basé sur sa vitesse V et sur l'accélération g .

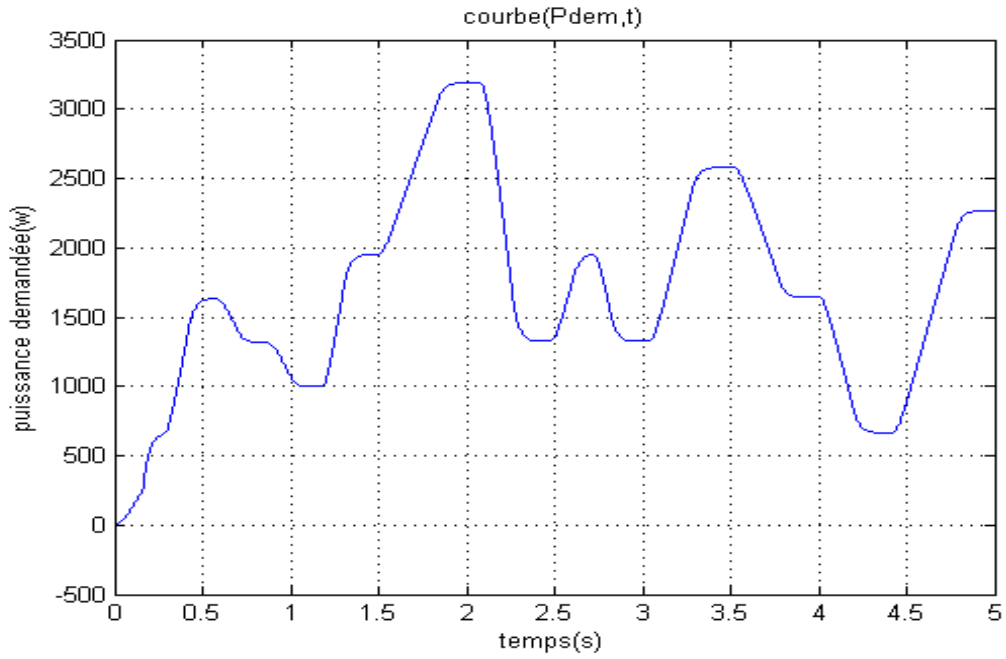


Fig.III.14 Profile de la puissance demandée

Le couple électromagnétique tend à suivre le couple de charge issu des forces appliquées au véhicule électrique.

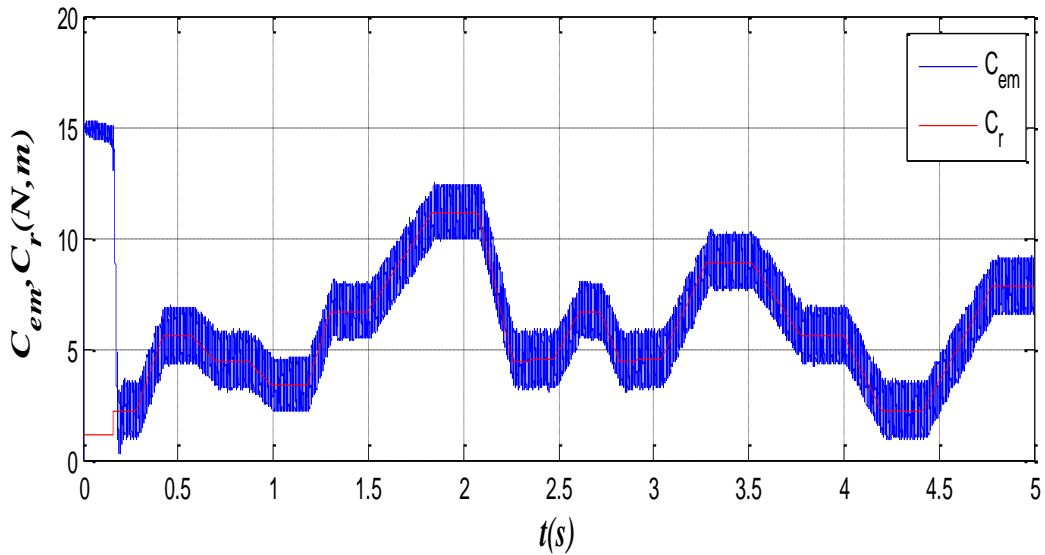
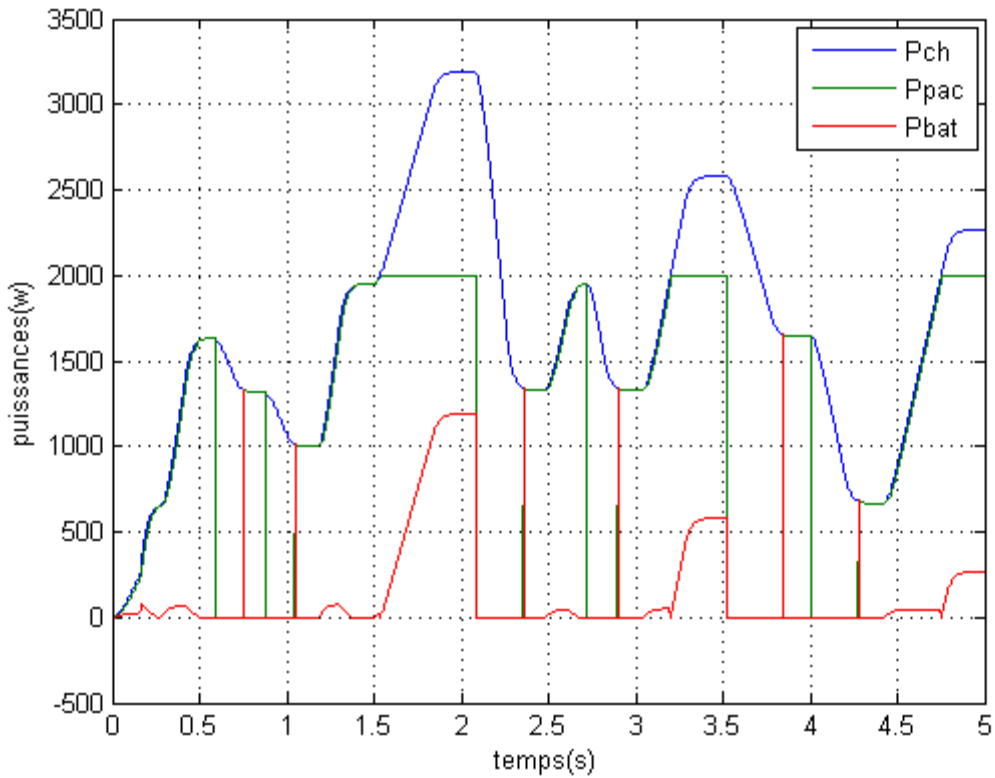


Fig.III.15 Couple électromagnétique de la machine asynchrone



III.16. Profile de toutes les puissances du système VE

La puissance demandée par la charge (véhicule électrique), est assurée par les deux sources d'énergies, la pile à combustible et les batteries selon l'équation suivante :

$$P_{ch} = P_{bat} + P_{pac} \quad (III.70)$$

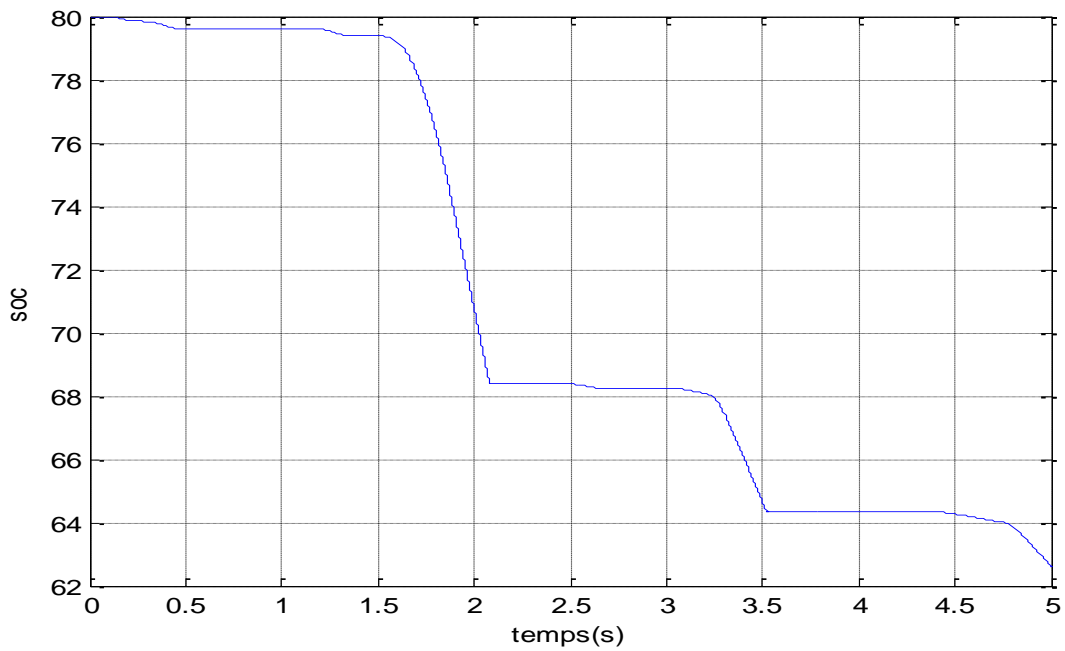


Fig.III.17.Etat de décharge des batteries

Les batteries débitent sur la charge lorsque la puissance demandée supérieure à celle de la source principale (la pile à combustible) afin de vérifier l'état de charge à chaque instant.

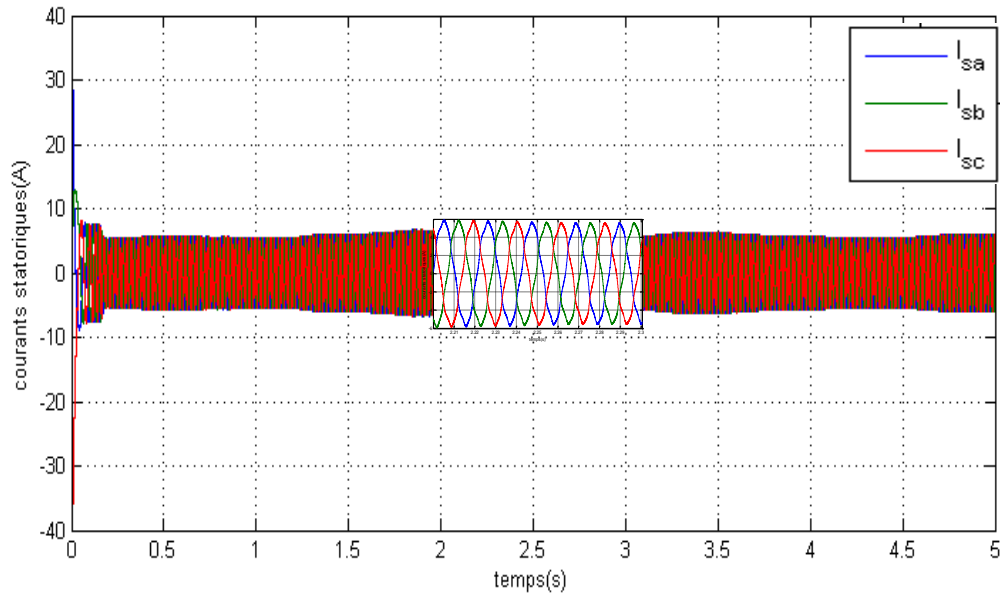


Fig. III.18 Allure des courants statoriques triphasés.

L'allure du courant statorique à la figure (III.18) est sinusoïdale et répond aux variations du couple par une augmentation ou diminution selon le couple de charge.

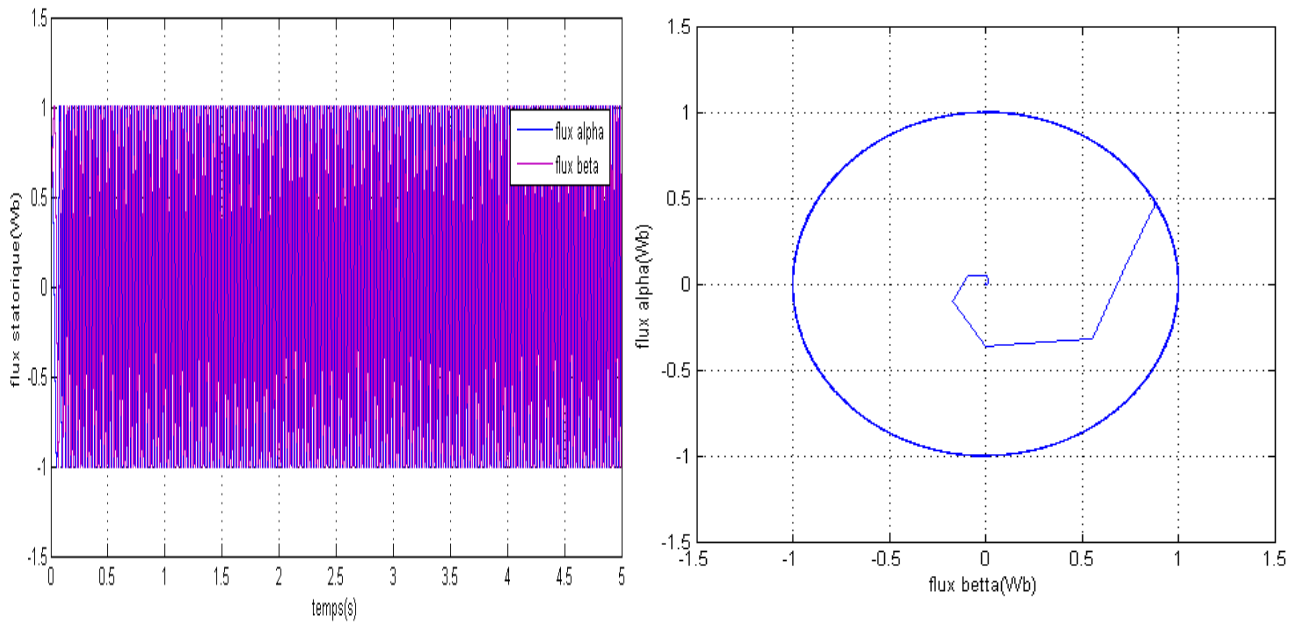


Fig. III.19. Flux statorique dans le domaine temporel et circulaire

III.8.Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté la structure de la source hybride utilisée, où nous avons défini et modélisé ses différentes sources qui sont la pile à combustible et les batteries. On constate l'intérêt de la gestion de puissance dans un système hybride qui permet de gérer les sources d'énergies et charger le système de stockage, et d'assurer le fonctionnement du système sans interruption.



Conclusion générale

Conclusion générale

Ce travail est pour objectif l'étude et la gestion de puissance d'un système hybride pour véhicules électrique constitué de deux sources : la principale est la pile à combustible de type PEMFC; la secondaire est les batteries, alimentant la machine asynchrone par la commande DTC.

D'après les résultats obtenus, nous concluons que :

- La source hybride permet de satisfaire les demandes en puissance de la charge.
- Le principal avantage de la pile à combustible est son excellente efficacité énergétique, particulièrement en tenant compte les préoccupations environnementales actuelles (alternative aux énergies fossiles). Outre le respect des spécificités physiques de la pile (temps de réponse, défaillances temporelles...),
- L'utilisation d'un moteur asynchrone dans la traction électrique autorise une souplesse considérable tant au niveau de l'extension de l'espace couple/vitesse.



Bibliographie

Bibliographie

1. [En ligne] www.ec.gc.ca/indicateurs-indicators. .
2. E.Vinot. *Time reduction of the dynamic programming computation in the case of hybrid vehicle*. s.l. : International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 2017. 53(2):213-227.
3. E.Vinot, V.Reinbold, and R.Trigui. *Global optimized design of an electric variable transmission*. 2016 : Vehicular Technology. 65(8):1-5.
4. A.Devie, E.Vinot, S.Pelissier and P.Venet. *Real-world battery duty profile of a neighbourhood*. s.l. : Emerging Technologies, 2012. 25:122-133.
5. E.Venit, J.Scordia, R.Trigui. *Model simulation, validation and case study of the 2004 ths of toyota prius*. s.l. : International Journal of Vehicle Systems Modelling, 2008. 3(3):139-167.
6. G. Donnier-Valentin, P. Tixador, and E. Vinot. *t. Considerations about hts superconducting transformers*. s.l. : Applied Superconductivity,, 2001. 11(1) :1498–1501.
7. Gaoua, Yacine. *modèles mathématiques et techniques d'optimisation non lineaire et combinatoire* . Toulouse : l'Institut National Polytechnique de Toulouse (INP Toulouse), 2014.
8. T.AZIB. *Contribution à l'Etude d'Electro-générateurs à pile à combustible conceptions d'architecture et de leurs commandes* . Décembre 2020.
9. Mosdale, R. *Véhicules électriques à pile à combustible*. s.l. : Techniques de l'Ingénieur, 2003. no.D 5570.
10. KHAMTACHE Hamza, KHAMTACHE Hamza. *Gestion de puissance d'un Système hybride*. univ Béjaia : s.n., 2017.
11. Y.GAOUA. *modèles mathématiques et techniques d'optimisation non linéaire* . université toulouse : s.n., 2014.
12. NEFFATI, A. *Stratégies de gestion de l'énergie électrique d'un système multi-source*. université toulouse : s.n., Avril 2013.
13. Lassègues, J. C. *Super condensateurs*. s.l. : d. Techniques Ingénieu, 2001.
14. Lachaize, J. *Etude des stratégies et des structures de commande pour le pilotage des systèmes énergétiques à pile à combustible destiné a la traction*. toulouse : Laboratoire d'Électrotechnique et d'Électronique Industrielle, 2004.

15. Wirasingha, S. G. et Emadi, A. *Classification and Review of Control Strategies for plug-in hybrid electric vehicles*. s.l. : IEEE Transactions on, , 2011. 1, p. 111-122. .
16. DENIS, Nicolas. *SYSTÈME DE GESTION D'ÉNERGIE D'UN VÉHICULE ÉLECTRIQUE HYBRIDE RECHARGEABLE À TROIS ROUES*. Sherbrooke (Québec) Canada : s.n., Mai 2014.
17. Salmasi, F. R. *Control strategies for hybrid electric vehicles: evolution, classification , comparaison, and futur trends*. s.l. : IEEE Transactions on Vehicular, 2007. 5, p. 2393-2404. .
18. Pisu, P. et Rizzoni, G. *A Comparative Study Of Supervisory Control Strategies of hybrid electric vehicles*. s.l. : American Control conference, 2007. 3, p. 506-518..
19. Liqing Sun, Ruchuan Liang et Qingcai Wang. *The control strategy and system preference of plug-in HEV*. 2008. 08. IEEE, p. 1-5. .
20. Denis, N., Dubois, M. R. et Desrochers, A. *Fuzzy-based blended control for the energy management of a parallel plug-in hybrid electric vehicle*. s.l., 2014.
21. Li, S. G., Sharkh, S. M., Walsh, F. C. et Zhang, C. N. *Energy and Battery Management of a Plug-In Series Hybrid Electric Vehicle Using Fuzzy Logic*. s.l. : IEEE Transactions, 2011. 8, p. 3571-3585. .
22. J. Amphlett, R.M. Baumert, R.F. Mann, B.A. Peppley, P.R. Roberge and A. Rodrigues. *Parametric Modelling of the Performance of a 5 kW Proton-Exchange Membrane*. s.l. : Journal of Power Sources, 1994. 49, pp. 349 - 356.
23. Mebarki, Nacer Eddine. *un système multi-sources à énergies renouvelables en fonctionnement autonome*. Béjaia : Université Béjaia, 2019.
24. Ziane, D. *Optimisation de la Commande de la Machine Asynchrone Double Etoile en Fonctionnement normal et dégradé*. Bejaia : Université de Bejaia, 2015.
25. Lefebvre, G. *Commande de machine asynchrone sans capteur de vitesse : application à la traction ferroviaire*. l'université de lyon : s.n., 2016.
26. Bode, Bimal K. *Modern Power Electronics and AV Drives*. s.l. : P. Hall, Edition: Prentice Hall, 2002.
27. Metidji, B. *Commande Robuste des Moteurs à courant Alternatif Alimentés par un Convertisseur Matriciel*. Université de Béjaia : Thèse de doctorat en Electrotechnique, 2013.
28. Z. Mokrani, D. Rekioua, T. Rekioua. *Modeling, Control and Power Management of Hybrid Photovoltaic Fuel Cells with Battery Bank Supplying Electric Vehicle »*. s.l. : International Journal of Hydrogen Energy, 2014. no. 27, pp. 15178-15187.

29. Nouh, A. *Contribution au Développement d'un Simulateur pour les Véhicules Electriques Routiers*. Université de Belfort-Montbéliard : Thèse de doctorat en Science pour l'ingénieur- Génie électrique, 2008.
30. Rumzi, N. *Direct torque control of induction machines with constant switching frequency and reduced torque ripple*. 2004. Vol.51, N04,.
31. G. Buja, D. Casadei, G. Serra. *Direct stator flux and torque control of an induction motor: theoretical analysis and experimental results* . s.l. : Proceedings of the 24th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 1998. '98, Vol. 1, pp.T50-T64.
32. F. Tazerart, N. Taïb, T. Rekioua, D. Rekioua, A. Tounzi. *Direct Torque Control Optimization with Loss Minimization of Induction Motor*. Tunis : Conférence Internationale en Sciences Technologies Electriques au Maghreb-CISTEM , 2014.
33. TAZERART, Farid. *Étude, Commande et Optimisation des Pertes d'Énergie d'une Machine à Induction Alimentée par un Convertisseur Matriciel*. uniersité Béjaia : s.n., 24 Janvier 2016 .

ANNEXE

Les paramètres de la Machine asynchrone triphasée

Paramètres	Symboles	Valeurs
Puissance	P_u	3kW
Nombre de paire de pole	P	2
Résistance Statorique	R_s	1.76Ω
Résistance Rotorique	R_r	1.95Ω
Inductance Mutuelle	M	0.183H
Inductance Statorique et Rotorique	$L_s=L_r$	0.194H
Moment Inertie	J	0.02 kg.m ²
Frottement	f	0.001 N.m.s ²

Les paramètres du Véhicule Electrique

Paramètres	Symboles	Valeurs
Masse du véhicule	m	150kg
Rayon de la roue	r	0.23m
Surface frontale du véhicule	A_f	1 m ²
Constante de la force de résistance due au déplacement	f_{ro}	0.015
Densité de l'air	ρ_{air}	1.2 kg/m ²
Coefficient de trainée aérodynamique	C_d	0.25