

République Algérienne Démocratique
Ministre de l'Enseignement Supérieur et de Recherche Scientifique

UNIVERSITE MOULOUD MAMMARI DE TIZI-OUZOU



Facultés de Génie Electrique et Informatique
Département d'Electrotechnique

Mémoire de fin d'Etude
De MASTER ACADEMIQUE
Domaine : science et technologie.
Filière : électrotechnique.
Spécialité : Machines électriques.

Présentée par :
BOUKELA Amar.
AISSIOUENE Sabrina.

Mémoire dirigé par M^r OTMANE-CHERIF Tahar.

Thème :

**Etude des sources d'énergies associées au véhicule
électrique.**

Mémoire soutenu publiquement le 04 juillet 2018 devant le jury composé de :

M^r SEDDIKI Hamid.
Professeur, UMMTO, President.

M^r OTMANE-CHERIF Tahar.
Professeur, UMMTO, Encadreur.

M^r AMROUCHE Bessam.
Docteur, Université A.MIRA Bejaïa, Co-encadreur.

M^r BECHOUCHE Ali.
M.C.A, UMMTO, Examineur

M^r MESBAH Koussaila.
M.A, UMMTO, Examineur

Promotion: 2017/2018.

Remerciements

A Monsieur OTMANE-CHERIF, notre encadreur,

Nous vous sommes extrêmement reconnaissants d'avoir accepté de nous encadrer. Nous avons eu la chance de bénéficier de vos conseils éclairés pour la réalisation de notre travail. Nous vous adressons ici nos sincères remerciements et nous vous prions de croire en notre plus haute considération.

Aux membres du jury,

Nous tenons à vous remercier d'avoir accepté d'être membre de notre jury. Nous sommes sensibles à l'attention que vous avez bien voulu porter à ce travail. Nous vous exprimons ici l'assurance de notre profond respect.

A toute personne ayant contribué au bon déroulement de notre travail,

Nous tenons à vous remercier d'avoir été à nos côtés. Nous sommes reconnaissants pour le temps que vous nous avez consacré. Nous vous présentons ici nos sincères remerciements.

En particulier à monsieur **Amrouche Bissam**.

Dédicaces

A mes parents,

Que dieu vous donne santé et longue vie, je vous remercie pour votre continuel soutien et vos sacrifices.

A mes frères,

Que dieu soit à vos côtés pour illuminer vos chemins, je vous remercie pour vos conseils et encouragements.

A tous mes amis(es),

A toute ma famille.

Amar

Dédicaces

A ma mère,

Je dédie ce modeste travail à celle qui m'a donné la vie. Le symbole de tendresse qui s'est sacrifiée pour mon bonheur et ma réussite.

A mon père,

Ecole de mon enfance, qui a été mon ombre durant toutes les années d'études, et qui a veillé tout au long de ma vie à m'encourager, à me donner l'aide et à me protéger.

Que dieu les garde et les protège.

A mes frères, à mes amis(es),

A tous ceux qui me sont chères. A tous ceux qui m'aiment. A tous ceux que j'aime.

Sabrina

Sommaire

Introduction générale	1
Chapitre 1: Etat de l'art du véhicule électrique	2
Introduction.....	2
I. Définition d'une voiture électrique.....	2
II. Historique.....	2
II. 1. Les Années 1830 – 1890.....	2
II. 2. Les Années 1890 – 1935.....	3
II. 3. Les Années 1935 – 1990.....	4
II. 4. Les Années 1990 - Aujourd'hui.....	5
III. Les différents types de voitures électriques.....	6
III. 1. La voiture tout électrique.....	6
III. 1.2. Principe de la voiture tout électrique.....	6
III. 1.3. Avantages.....	6
III. 1.4. Inconvénients.....	7
III. 1.5. Conclusion.....	7
III. 2. La voiture hybride.....	8
III. 2.1. Principe de l'hybride.....	8
III. 2.2. Avantages.....	9
III. 2.3. Inconvénients.....	10
III. 2.4. Conclusion.....	10
III. 3. Voiture à l'hydrogène.....	10
III. 3.1. Principe de la pile à combustible à l'hydrogène.....	10
III. 3.2. Avantages.....	11
III. 3.3. Inconvénients.....	12
III. 3.4. Infrastructures.....	12
III.3.5. Conclusion.....	12
IV. Architecture des véhicules électriques.....	12
V. Les composants nécessaires au fonctionnement du véhicule électrique.....	16

V. 1. La batterie.....	16
V. 2. Le moteur.....	16
V. 3. Le supercondensateur.....	17
V. 4. Convertisseur réversible.....	18
V. 5. Le Hacheur DC/DC.....	18
V. 6. Le calculateur.....	19
VI. Les infrastructures de recharge.....	20
VII. Points forts et points faibles.....	21
VII. 1. Les points forts.....	21
VII. 2. Les points faibles.....	22
VIII. Domaine d'utilisation.....	23
IX. Exemples de quelques véhicules électriques récents.....	26
IX. 1. PSA: Full Hybrid Peugeot 3008.....	26
IX. 2. La Tesla Model S.....	28
IX. 2.1. Caractéristique de la Tesla Model S.....	29
IX. 3. La Honda Clarity.....	30
X. Conclusion.....	32

Chapitre 2 : Présentation et représentation des différents organes d'un véhicule hybride.....	34
Introduction.....	34
I. Le Modèle hybride parallèle.....	34
II. Les différents sous-systèmes.....	35
II.1.Le sous-système électrique.....	35
II.1.2. La machine électrique.....	36
II.1.3. Les convertisseurs.....	36
II.1.4. La Batterie électrique.....	38
II.1.4.1. Définition.....	38
II.1.4.2. Fonctionnement.....	38
II.1.4.3.Caractéristiques des batteries.....	39

II.1.4.4 Les accumulateurs au plomb.....	40
II.1.4.5 Les accumulateurs nickel-cadmium.....	41
II.1.4.6.Les accumulateurs nickel-hydrure métallique.....	42
II.1.4.7. Les accumulateurs au lithium.....	43
II.1.4.8. Comparaison.....	45
II.1.5. le Super condensateur.....	45
II.1.5.1. principe de fonctionnement.....	45
II.1.6. La pile à combustibles.....	47
II.1.6.1.Différents types des piles à combustibles.....	48
II.1.6.2.Architecteur d'une PAC.....	49
II.2. Le sous-système mécanique.....	51
II.2.1. Le Moteur thermique.....	51
II.2.2. Boîte de vitesse.....	52
III. Conclusion.....	53
Chapitre 3 : Modélisation des différents organes d'un véhicule hybride.....	54
Introduction.....	54
I. Modélisation de la machine synchrone en vue de sa commande.....	54
I .1. Mis en équation électrique de la MSAP en triphasé (modèle en abc).....	54
I .2. Modélisation de la MSAP dans le repère de Park.....	56
I .2.1.Transformation de Park.....	56
I .3. Mise en équation de la MSAP en diphasé (modèle vectorielle).....	58
II. Modélisation des convertisseurs.....	59
II. 1. Modélisation de l'onduleur.....	59
II. 1.1. Onduleur de tension.....	59
II. 2. Modélisation du hacheur.....	61
II. 2.1. Hacheur élévateur.....	61
II .2.2. Hacheur abaisseur.....	63
III. Batterie électrique.....	64

IV.	La pile à combustible.....	65
	IV. 1. Caractéristique électrique de la pile à combustible.....	65
V.	Super condensateur.....	69
IV.	Conclusion.....	70

Chapitre 4 : Commande et simulation du véhicule hybride parallèle à simple

arbre.....	71
Introduction.....	71
I. Stratégie de commande de la MSAP.....	71
I.1 Commande vectorielle de la MSAP.....	72
I.1.1 Mise en équation du découplage par retour d'état.....	73
I.1.2. Dimensionnement et calcul du régulateur classique (PI).....	75
II. Commande des systèmes d'électronique de puissance.....	80
II.1 Commande de l'onduleur par la technique MLI triangulo-sinusoïdale.....	80
II.2 Commande du convertisseur DC/DC.....	81
III. Unité de contrôle	83
III.1. Présentation de la méthode de gestion.....	83
III.2. Différents modes d'opérations du groupe motopropulseur dans un VH.....	84
III.3. L'organigramme de gestion d'énergie.....	85
III.4. Mode fonctionnement du système.....	86
IV. Simulation.....	88
IV.1. Simulation générale appliqué au système global de véhicule.....	88
IV.2. Résultats de la simulation.....	90
V. Conclusion.....	97
Conclusion générale.....	98
Annexe.....	99
Bibliographie.....	105

Notations et abréviations

USD: United States Dollar.

CAA: Clean Air Act.

RD & D: Research, development and Demonstration.

CO₂ : Dioxyde de carbone.

H₂ : gaz de l'hydrogène.

O₂ : gaz d'oxygène.

H₂O : molécule de l'eau.

PHEBUS : Propulsion Hybride Electrique Bi-mode pour Usages urbains.

CAN: Controller Area Network.

Ch: chevaux.

Matlab : Matrix Laboratory logiciel de simulation numérique.

R.W.E: Rheinisch-Westfälisches Elektrizitätswerk Aktiengesellschaft.

E.D.F : Électricité de France.

F : Franc Français.

NEDC : Nouveau cycle européen de conduite.

EuroNCAP: European New Car Assessment Program.

NHTSA: National Highway Traffic Safety Administration.

MCI : Moteur à combustion interne.

ME : moteur électrique.

PAC : pile à combustible.

MSAP : Machine synchrone à aimant permanent.

DC : Courant Direct [A].

AC : Courant Alternatif [A].

ASI : alimentations sans interruption.

VRLA: Valve Regulated Lead-Acid.

AGM : Absorbent Glass Mat.

Ni-Cd : Nickel-Cadmium.

Ni-MH : Nickel-Hydrure Métallique.

Li-ion : Lithium-ion.

Cd: Cadmium.

Li-Po : Lithium Polymère.

ϵ_0 : La permittivité du vide.

ϵ_r : La permittivité relative du diélectrique.

S : La surface.

E : L'énergie emmagasinée dans le condensateur.

V : la différence de potentiel entre les électrodes.

EME: Electrode-Membrane-Electrode.

ω_r : La vitesse des roues.

C_r : Le couple appliquée à l'arbre des roues.

C_m : Couple fournie par le moteur à l'arbre primaire [Nm].

ω_m : Couple de sortie de boîte applique à l'arbre des deux roues [Nm].

Ω_m : Vitesse de rotation de l'arbre primaire [tr/min].

Ω_r : Vitesse de rotation de l'arbre des roues [tr/min].

« **abc** » : Notation du modèle réelle de la machine triphasé.

ϕ_f : Flux engendré par les aimants.

ϕ_{sf} : Valeur crête (constante) du flux crée par l'aimant à travers l'enroulement statorique.

$X_{a,b,c}$: Composante réel dans le repère abc.

$I_{a,b,c}$: Courants suivant les phases triphasées.

R_S : Résistance statorique.

L_S : Inductance statorique.

θ : Angle électrique.

Ω : Vitesse de rotation mécanique.

J : Moment d'inertie [Kg.m²].

f : Coefficient de frottement [Nm.S].

C_e : Couple électromagnétique [Nm].

C_r : Couple résistant [Nm].

p: Nombre de paires de pôles.

P_a : La puissance absorbée par le moteur en [Watt].

n_s : LA vitesse du champ tournant en [tr/min].
 « **d-q** » : repère du modèle de Park.
 ω : Pulsation électrique.
 $[\mathbf{P}(\boldsymbol{\theta})]$: La matrice de passage direct de Park.
 $[\mathbf{P}(\boldsymbol{\theta})]^{-1}$: La matrice de passage inverse de Park.
 i_d : Courant statorique sur l'axe d.
 i_q : Courant statorique sur l'axe q.
 L_d : Inductance statorique sur l'axe d.
 L_q : Inductance statorique sur l'axe q ;
 R_q : Résistance statorique sur l'axe q.
 R_d : Résistance statorique sur l'axe d.
 V_d : Tension statorique sur l'axe d.
 V_q : Tension statorique sur l'axe q.
 α : Rapport cyclique.
 V_{bus} : Tension de bus [A].
PWM: pulse with modulation.
PFM: pulse frequency modulation.
 V_{bat} : Tension au borne de la batterie [V].
 $E0$: Tension à vide de la batterie[A].
 R_b : Résistance interne de la batterie[Ω].
 i_b : Courant de la batterie [A].
SOC : Etat de charge.
Sign(x) : Signe d'une valeur quelconque.
 \mathbf{K} : Constante de polarisation ou résistance de polarisation.
 i^* : Courant dynamique à basse fréquence [A].
 i : Courant de batterie [V].
 i_t : Capacité extraite [A].
 \mathbf{Q} : Capacité maximum de batterie [Ah].
 \mathbf{A} : Tension exponentielle.
 \mathbf{B} : Capacité exponentielle.

PEMFC : Protons Exchange Membrane Fuel Cell.

E_0 : Tension à vide d'une cellule PàC (V).

V_{act} : Chute de tension due aux réactions chimiques dans la PàC (V).

V_{ohm} : Chute de tension due à la résistance interne de la PàC (V).

V_{conc} : Polarisation de concentration.

R_m : Résistance totale de la PàC (Ω).

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

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

C_{bus} : Capacité du bus continu(F).

C_{sc} : Capacité du supercondensateurs (F).

E_L : Force électromotrice de la charge.

V_{bus}^* : Tension de référence du bus continu(V).

V_{bus} : Tension du bus continu (V).

v_{fc} : Tension de la pile à combustible(V).

v_{sc} : Tension du supercondensateurs (V).

i_{fc} : Courant de la pile à combustible(A).

i_{sc} : Courant du supercondensateurs (A).

L_{fc} : Inductance de la pile à combustible(H).

L_{sc} : Inductance du supercondensateurs (H).

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

e_d et e_q : Termes de découplages ;

F.E.M : forces électromotrices.

PI : proportionnel intégrale.

m : indice de modulation.

r : Taux de modulation.

T_p: La période du signale de la porteuse.

V_p: Tension de la porteuse.

PV : photovoltaïque.

SSE : source secondaire d'énergie.

Liste des figures

Figure 1 : schéma fonctionnel d'une voiture tout électrique.....	6
Figure 2 : schéma fonctionnel d'une voiture hybride.....	8
Figure 3 : Système de fonctionnement d'une voiture à hydrogène.....	11
Figure 4 : Exemple de 'moteur hub' réalisé par la société Alstom Transport pour la traction d'un Tramway.....	14
Figure 5 : Véhicule hybride Peugeot 3008.....	26
Figure 6 : La Tesla Model S.....	28
Figure 7 : La Honda Clarity.....	31
Figure 8 : schéma et composants Honda Clarity.....	32
Figure 9 : Architecture hybride parallèle à simple arbre.....	34
Figure 10 : Flux de puissance dans le modèle parallèle à simple arbre.....	35
Figure 11 : Schéma de principe du système électrique.....	35
Figure 12 : Principe de fonctionnement d'un hacheur bidirectionnel.....	38
Figure 13 : Principe d'un accumulateur électrochimique.....	39
Figure 14 : Photographie d'une batterie classique.....	41
Figure 15 : Batterie VRLA.....	41
Figure 16 : Vue éclatée d'une batterie nickel-cadmium Ni-Cd industrielle.....	41
Figure 17 : Accumulateur nickel-hydrure métallique Ni-MH en géométrie cylindrique.....	43
Figure 18 : Comparaison des différents types des batteries.....	45
Figure 19 : condensateur plan.....	46
Figure 20 : (a) : Condensateur, (b) : Super condensateur.....	47
Figure 21 : fonctionnement d'une pile à combustible.....	48
Figure 22 : Les différents types de pile à combustible (ion traversant l'électrolyte, température De fonctionnement et applications typiques).....	49
Figure 23 : Vue d'ensemble du stack PAC.....	49
Figure 24 : système PAC pour le transport automobile.....	51
Figure 25 : Schéma de principe du système thermique.....	51
Figure 26 : Boite de vitesse.....	52

Figure 27 : Différentiel.....	53
Figure 28 : Schéma de la MSAP dans le repère abc.....	55
Figure 29 : Schéma équivalent de la MSAP dans le repère (d, q).....	57
Figure 30 : Schéma d'un onduleur de tension.....	60
Figure 31 : Schéma de principe d'un convertisseur DC/DC élévateur.....	61
Figure 32 : modèle de la batterie.....	65
Figure 33 : Courbe de polarisation d'une cellule de pile à combustible PEMFC.....	69
Figure 34 : Schéma électrique équivalent d'un super condensateur.....	69
Figure 35 : Model de MSAP commandé en tension	73
Figure 36 : Description de couplage entre l'axe d-q	74
Figure 37 : Schéma de bloc de la commande vectorielle avec compensation des F.E.M.....	75
Figure 38 : Structure interne d'un régulateur « PI ».....	76
Figure 39 : Boucle de régulation de la composante directe « i_d ».....	76
Figure 40 : Boucle de régulation de la composante en quadrature « i_q ».....	77
Figure 41 : Schéma structurel du système à régler.....	78
Figure 42 : Schéma structurel du système en boucle fermée.....	78
Figure 43 : Fonction de transfert en boucle ouverte.....	78
Figure 44 : Schéma fonctionnel d'une réalisation analogique d'une MLI.....	81
Figure 45 : Structure de la commande par deux boucles de contrôle.....	82
Figure 46 : Schéma de principe de la régulation du courant par hystérésis.....	83
Figure 47 : L'organigramme de gestion d'énergie.....	86
Figure 48 : Flux énergétiques au sein du groupe motopropulseur.....	88
Figure 49 : Schéma globale de simulation.....	89
Figure 50 : Vitesse du véhicule électrique.....	90
Figure 51 : Le courant direct.....	91
Figure 52 : Le courant quadratique.....	91
Figure 53 : Couple électromagnétique.....	92
Figure 54 : Profil de la puissance demandé.....	93
Figure 55 : Tension au niveau du bus continu.....	94
Figure 56 : Tension du supercondensateur.....	95

Figure 57 : Tension de la batterie.....	95
Figure 58 : état de charge des SCs et la batterie.....	96
Figure 59 : conservation des puissances.....	97

Introduction
générale

La voiture électrique n'est pas une invention récente. Du 19^{ème} à la fin du 20^{ème} siècle, de variables prototypes ont été essayés et ont tenté de faire face aux véhicules thermiques. Mais à chaque rendez-vous le résultat se fut le même, un échec cuisant, et cela à cause des mêmes raisons. Du manque de capacité des batteries et donc une faible autonomie de ces véhicules comparée à celle des véhicules thermiques. Ainsi qu'à d'autres paramètres tels que les tarifs à l'achat et à l'entretien qui sont plus élevés et aussi au manque d'infrastructures de recharge pour ces véhicules électriques. Et cela a démontré que la polyvalence et l'autonomie étaient les enjeux majeurs du développement des véhicules électriques. Les avancées technologiques et surtout dans le domaine de l'électronique de puissance (la commande) ainsi que dans le domaine du stockage de l'énergie électrique fait aujourd'hui l'objet d'un fort engouement. Et cela c'est répercuter sur le marché de l'automobile, où les ventes de véhicules électriques particuliers ont augmenté d'environ 140 % en 2014 par rapport à 2013. Lors du Mondial de l'auto en 2014 à Paris, près d'une trentaine de constructeurs automobiles, dont des marques de luxe, ont fait découvrir de nouveaux modèles de véhicules électriques et hybrides rechargeables au public. À la fin août 2014, près de 22 500 véhicules particuliers et près de 13 500 véhicules utilitaires étaient immatriculés et ce rien qu'en France. Les voitures dites à énergie verte ou propre, sont en effet devenues un enjeu de société à cause de la hausse en force des préoccupations environnementales, de la flambée du prix des carburants fossiles et de la forte exposition médiatique des véhicules tous électriques. Et depuis de nombreuses années, les gouvernements ont fait du sujet une priorité en mettant en œuvre des plans de soutien et en mettant en place des groupes de réflexion sur le sujet. Le progrès des projets concernant le véhicule électrique peut s'expliquer, premièrement, par les buts environnementaux fixés dans les cadres mondiaux pour lutter contre le changement climatique, et diminuer les émissions de CO₂. Deuxièmement, l'industrie auto est en phase d'impasse au plan européen et a besoin de renouveau. Le véhicule électrique se voit alors comme un levier de relance et de modernisation. Enfin, le progrès technologique de la batterie lithium-ion, du super condensateur et de la pile à combustible ouvre des brèches pour le développement à grande échelle du véhicule électrique.

Pour bien présenter notre travail, nous avons structuré notre mémoire comme suit :

- Le chapitre 1 portera sur des généralités sur la voiture électrique.
- Le chapitre 2 présentera les organes et les sources d'énergies dans la voiture électrique.
- Le chapitre 3 portera sur la modélisation des sources d'énergies dans la voiture électrique.
- Le chapitre 4 portera sur la commande des différents composants de la voiture électrique et permettra de présenter les résultats de la simulation de l'ensemble.

CHAPITRE 1

***Etat de l'art du véhicule
électrique.***

Introduction :

Une voiture électrique est une voiture qui ne compte que sur ses capacités de stockage d'électricité pour aller d'un point X à un point Y. L'énergie emmagasinée provient du réseau électrique, cette dernière est convertie par un moteur électrique pour être ensuite transmise aux roues. Les batteries envoient du courant au moteur électrique qui actionne les roues. Les éléments constituant la chaîne de traction sont conçus de la même manière que celui des véhicules à moteur thermique à combustible [1]. Équipée d'un ou plusieurs moteurs électriques dont la puissance globale peut aller de quelques dizaines jusqu'à des centaines de kilowatts et cela selon l'usage, le type et performances recherchées et la taille du véhicule. Les premiers véhicules électriques à voir le jour furent en Europe au début du 19^{ème} siècle à cette époque, le moteur électrique était un concurrent direct pour les moteurs à essence et à vapeur, puis à la moitié du 20^{ème} siècle les véhicules à essence ont fini par mettre de côté les véhicules électriques de la course. Et ce n'est qu'au début du siècle suivant que renaît l'idée d'utiliser ce type de véhicules dans le but de diminuer les effets négatifs des véhicules conventionnels. [2]

I. Définition d'une voiture électrique :

Une voiture électrique est propulsée par un ou plusieurs moteurs électriques, alimentés soit par une batterie d'accumulateurs, ou par une pile à combustible. Ces sources fournissent de l'énergie électrique provenant de la recharge par câble depuis une source électrique extérieure, ou bien de la récupération d'énergie lors de la décélération du véhicule ou comme frein moteur lors des descentes, dans ce cas le moteur électrique passe en mode générateur. Les éléments constituant la chaîne de traction sont conçus de la même manière que celui des véhicules à moteur thermique à combustible. De nos jours les voitures électriques atteignent une autonomie allant de cent à cinq cents kilomètres et nécessitent des temps de recharge directement proportionnels à la dimension de la batterie et du chargeur embarqué. [3]

II. Historique :

Dans ce passage on citera par ordre chronologique l'évolution du véhicule électrique à travers le temps.

II. 1. Les Années 1830 – 1890 :

La première pierre angulaire de l'évolution des véhicules électriques a déjà été définie au début de l'industrie automobile. Déjà dans les années 1830, les scientifiques et les ingénieurs sont venus avec une série de percées différentes dans la technologie de l'alimentation électrique des

Véhicules. En ce moment-là, il y avait plusieurs innovations dans certains pays comme les Pays-Bas, La Hongrie et les États-Unis, qui ont inventé les premiers modèles réduits de Véhicules. Le tout premier véhicule électrique fonctionnel a été développé vers 1832 par l'inventeur britannique Robert Anderson [4]. Le premier véhicule électrique aux États-Unis a été introduit à la fin du 19^{ème} siècle par l'inventeur William Morrison dans l'Iowa et l'intérêt général grandissait. Jusqu'à la fin du siècle et toujours au début de la suivante, les chevaux restent le principal mode de transport. Cependant, en termes de véhicules personnels, trois technologies de propulsion distinctes ont émergé, à savoir l'essence, la vapeur et alimenté électriquement. Le moteur à vapeur n'a pas trouvé une utilisation très pratique dans les véhicules personnels, à cause de son démarrage difficile par fois, surtout dans les mois d'hiver froids, ou il fallait attendre près de 45 minutes, et le fait de remplir l'eau dans le réservoir était un autre facteur limitant la portée du véhicule. Le facteur de gamme était déjà beaucoup mieux géré avec le moteur à combustion interne à essence. Quoi qu'il en soit, le conducteur ici était toujours obligé de changer de vitesse en conduisant, le démarrage du moteur du véhicule devait être effectué par une manivelle.

II. 2. Les Années 1890 – 1935 :

Le moteur électrique, en revanche, n'a fait face à aucune de ces luttes mentionnées ci-dessus. Les voitures électriques ont tenu l'avantage significatif de l'opération facile dans le début du 20^{ème} siècle il devint en plus d'autres facteurs populaire parmi les femmes. Comparé au moteur à essence, le prochain avantage était le non polluant et il est devenu parfait pour le trafic de la ville à courte distance. Ces faits ont eu un effet sur le marché et les voitures électriques sont entrées dans le nouveau siècle avec un marché de 28% de couverture, en termes de véhicules routiers aux États-Unis [5]. Les innovateurs de cette époque ont évidemment pris note de cela et en l'année 1891, le bien connu fondateur d'une entreprise à succès du même nom, Ferdinand Porsche introduit son modèle de voiture P1. Ce modèle particulier était la première voiture de l'entreprise et était entraîné électriquement. En 1914, Thomas Edison et Henry Ford se sont réunis pour coopérer sur le développement d'un véhicule électrique à faible coût pour les grandes masses, qui malheureusement pour la voiture électrique, n'a pas fonctionné aussi bien [6]. La première voiture produite en série possédant un moteur à combustion interne, la Ford Model T, entra dans le chemin de la voiture électrique déjà en 1908. Elle représentait une très abordable automobile adaptée à la grande masse, avec un prix de 650 USD, alors que l'électrique roadster de l'époque avait un prix presque triple de 1750 USD. De plus, en 1912, le démarreur électrique a été développé, ce qui a fait le grand désavantage de la manivelle qui

disparaîtra et a stimulé les ventes de voitures à essence. Les plus grands développements sur le marché, principalement aux États-Unis, étaient la baisse des prix de l'essence et la croissance du réseau de stations-service dans le pays dans les années 1920. D'autre part, l'électricité était toujours pas accessible dans la plupart des zones rurales à cette époque-là et, finalement, vers 1935, les voitures électriques ont finalement été battues par les voitures à combustion et ont disparu pendant une longue période du marché. [4]

II. 3. Les Années 1935 - 1990 :

Pour les 30 prochaines années, la domination des moteurs à combustion conduit au non développement la technologie du moteur électrique et dans l'ensemble, l'accent était mis sur la combustion. Les prix bas du pétrole et l'avancée de la technologie de combustion a laissé l'électrique dans le foncé.

En 1970, le CAA a été créé, qui a mis la responsabilité sur tout américain pour atteindre certains objectifs de qualité de l'air. Plus tard dans les années 1970, les prix mondiaux ont commencé à monter en flèche et les ressources pétrolières commençaient enfin à être considérées comme limitées. Aux Etats-Unis, le prix du pétrole a culminé en 1973 avec l'embargo pétrolier arabe et l'accent a été redirigé vers la réduction de la dépendance vis-à-vis des ressources pétrolières étrangères et rechercher des ressources locales de pétrole. Seulement trois ans plus tard, le gouvernement a accepté le véhicule électrique et hybride. La loi sur la recherche, le développement et la démonstration de 1976, dans le but de rechercher d'autres possibilités de carburant. [4]

Suite à une situation similaire du prix du pétrole et au développement en Europe, la France a établi le programme "PREDIT" pour favoriser l'accélération de la RD & D des véhicules électriques en 1976 ainsi que [5]. À cette époque, deux entreprises ont dominé la voiture électrique vraiment petite mais existante sur le marché. Le premier et le plus réussi était un producteur basé en Floride, Sebring-Vanguard, qui a produit plus de 2 000 "City Cars" dans les années 1970. Le second était encore moins populaire, c'était le modèle d'Alcar Corporation. La City Car est restée la voiture électrique la plus vendue aux États-Unis jusqu'à l'apparition de Tesla Roadster en 2006. Comme par exemple en Europe, le constructeur automobile allemand BMW a tenté sa chance lors des Jeux Munich en 1972, où ils ont présenté leur modèle 1602 E. Cette voiture a été alimentée par 42 chevaux de puissance, avec un moteur entièrement électrique. Cependant, outre son utilisation pendant les Jeux Olympiques, la voiture avec son

moteur électrique n'a jamais atteint la production de masse [7]. Jusqu'au début des années 1990, il y avait peu d'enthousiasme pour les véhicules électriques.

II. 4. Les Années 1990 - Aujourd'hui :

Grâce à l'adoption de la modification de la Clean Air Act de 1990 et la loi de la politique énergétique de 1992, plus les règlements sur les émissions de transport en Californie, l'intérêt pour les véhicules électriques aux États-Unis ont augmenté. Le Conseil de ressources aériennes en Californie a exigé aux producteurs de voitures d'introduire et de vendre des voitures à zéro émission afin de se placer sur le marché de l'état. [7]

General Motors a révélé à cette époque son modèle EV1, étant le premier de son genre par l'entreprise. Il est devenu le véhicule électrique le plus vendu sur le marché américain et le premier de son ère, produite par un constructeur automobile majeur. Sa principale contribution en termes de voitures électriques c'est qu'il est le premier à avoir suscité l'enthousiasme du public et l'enthousiasme pour les véhicules électriques. C'est devenu le véhicule pionnier sur son segment et lors de sa première année de production en 1996, il a vendu 1117 unités, cependant, General Motors n'était pas en mesure de rendre sa voiture électrique rentable pour l'entreprise et ils l'ont fait disparaître du marché en 2001. [8]

Une autre pierre angulaire et une réponse du marché japonais a été lorsque Toyota a présenté sa Prius en 1997. C'était le premier véhicule électrique hybride produit en série, les ventes mondiales ont commencé en 2000. Il est devenu la voiture hybride la plus vendue de la première décennie du 21ème siècle. En 2006, une nouvelle start-up est apparue dans la Silicon Valley, s'appelant Tesla Moteurs, avec leur première voiture, un modèle entièrement électrique Tesla Roadster. En raison de leurs ressources limitées, la voiture était basée sur la plate-forme déjà existante d'un autre constructeur automobile, la Lotus Elise. La situation financière de la société a changé de façon spectaculaire, lorsque le département de l'énergie a fourni à Tesla Motors un prêt de 465 millions de dollars, ils étaient en mesure de rembourser intégralement déjà en 2013. L'argent a été consacré à la construction de leur Giga-usine qui a fait de Tesla le plus grand constructeur automobile en Californie. [4]

En raison du grand succès de Tesla, les véhicules électriques ont inspiré d'autres grands constructeurs automobiles, de sorte qu'en 2010 Chevrolet présente son modèle hybride Volt et Nissan son all Electric. En 2013, BMW a présenté son véhicule entièrement électrique i3 et l'hybride i8. La tendance dominante des véhicules électriques dans les dernières années se

trouve être la technologie hybride plug-in, installé dans le modèle de tous les grands constructeurs automobiles.

III. Les différents types de voitures électriques :

III. 1. La voiture tout électrique :

III. 1.2. Principe de la voiture tout électrique :

Une voiture électrique est une voiture qui ne compte que sur ses capacités de stockage d'électricité pour aller d'un point A à un point B. L'énergie stockée provient du réseau électrique, cette dernière est transformée via un moteur pour être ensuite transmise aux roues. [1] Les batteries envoient du courant au moteur électrique qui actionne les roues [8]. Les éléments constituant la chaîne de traction sont organisés sur le même principe que celui des véhicules thermiques. [1]

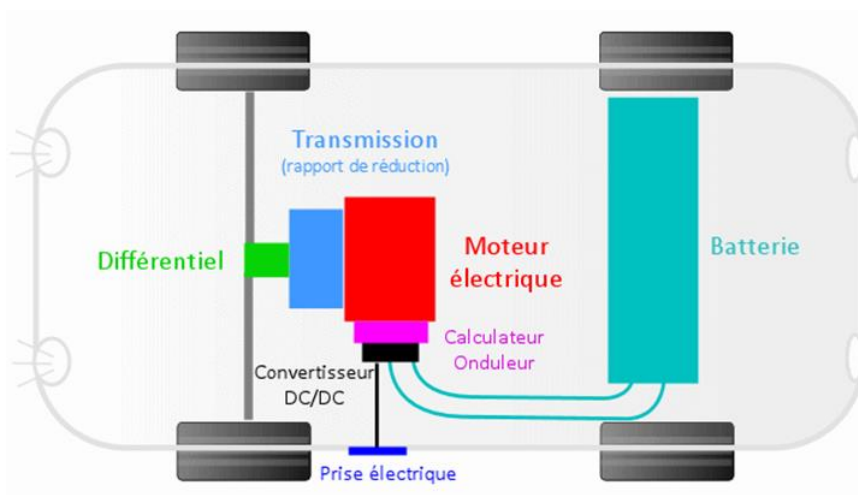


Figure 1 : schéma fonctionnel d'une voiture tout électrique. [18]

III. 1.3. Avantages :

Nous observons une économie de consommation conséquente. En effet, nous comptons 1,5 à 2€ pour 100 km. Nous observons également l'absence d'émission CO₂ et d'autres particules fines. [S8] Toutefois, il est probable de causer indirectement l'émission de gaz à effet de serre et d'autres particules en fonction de l'électricité du réseau et de la production. L'usure se voit aussi réduite grâce à l'absence de pièces en mouvement alternatif (billes, pistons, ...). De plus, les coûts d'entretien diminuent de 30 à 40% comparativement à un véhicule à combustion. De

surcroît, nous notons une nette réduction de la pollution sonore [8]. L'efficacité d'un véhicule électrique dans la consommation de son énergie est généralement nettement plus efficace que celle d'un véhicule à combustion classique. Cette hausse d'efficacité est due au freinage régénératif, à l'élimination du moteur qui tourne à l'arrêt et à une meilleure efficacité en mouvement [9]. Par ailleurs, le rendement énergétique des moteurs électriques varie de 80 % à 90 %. De même, l'électronique de puissance utilisée pour piloter atteint pratiquement 100% de rendement [1]. Les moteurs électriques présents dans les voitures actuelles sont issus de moteurs industriels. Ils sont faciles à utiliser et extrêmement fiables. Conçus pour fonctionner en continu pendant des années sans entretien, ils nécessitent seulement des visites de contrôle.

III. 1.4. Inconvénients :

Les inconvénients de ce type de véhicules sont liés essentiellement à l'autonomie limitée, qui ne répond pas encore aux besoins de tous, et à la recharge, dont le temps peut varier et l'emplacement de prises adéquates qui peut être difficile à situer [9]. Nous comptons de nombreux types de prises. Il est important de pousser pour plus d'homogénéité afin de pouvoir implanter des infrastructures adaptées et rapides au niveau national et international. (Annexe 1 - 2) Le nombre de places et la capacité du coffre posent également souvent problème, car les batteries prennent de la place. Le système de location des batteries est un obstacle aux ventes, car même après l'achat, il reste un contrat de location. Ce système peut être vu comme bénéfique par les utilisateurs, car il garantit toujours une batterie fonctionnelle. La batterie reste une pièce extrêmement onéreuse du véhicule, c'est pourquoi un système de location a été mis en place. La question du prix et de la valeur résiduelle à la vente se pose également, sans oublier les émissions indirectes de ce genre de véhicules. En effet, les émissions indirectes représentent avec les émissions de production, un problème clé souvent dissimulé. Finalement, l'impossibilité de tracter est perçue de manière restrictive [8]

III. 1.5. Conclusion :

Pour conclure, l'autonomie de 150km ne limite pas ce type de véhicule à la ville. En effet, la moyenne belge parcourue par exemple est de 50km par jour, ce qui nous permet de croire au potentiel des voitures électriques. La problématique actuelle est liée aux batteries et la problématique future au chargement [8]. Par ailleurs, il est crucial de tenir compte des externalités négatives comme les émissions liées à la charge ou la production.

III. 2. La voiture hybride :

III. 2.1. Principe de l'hybride :

Les véhicules hybrides combinent un moteur électrique avec un moteur thermique, qu'il soit essence ou diesel. Les moteurs peuvent fonctionner de manière simultanée ou séparée en fonction du type d'hybride. En théorie, ce type de véhicule permet d'économiser de 10 à 50% en émissions [8]. En effet, à comparaison équivalente, sur 20 000 km une Toyota Prius rejettera une tonne de CO₂ de moins. Pour les autres polluants, comme l'oxyde d'azote (Nox) et l'hydrate de carbone (HC), les émissions sont inférieures à celles de n'importe quelle autre voiture à essence.

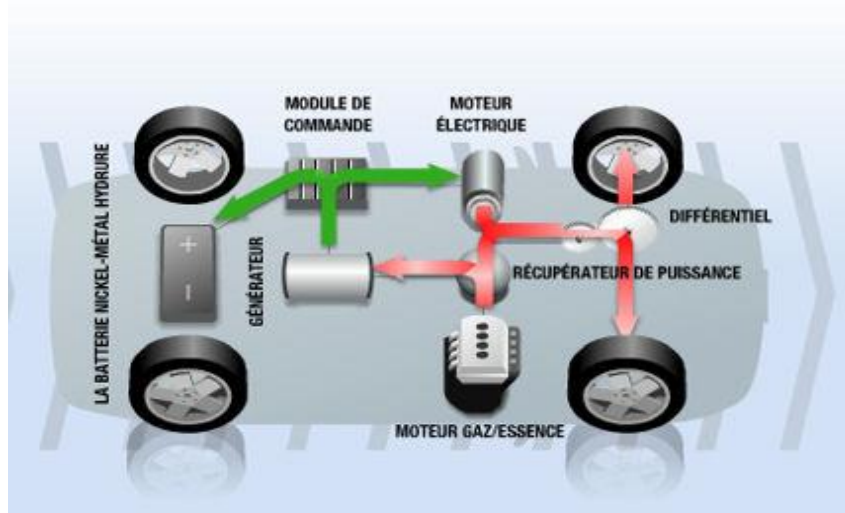


Figure 2 : schéma fonctionnel d'une voiture hybride. [19]

Il est toutefois important de faire la distinction entre toutes les formes de véhicules hybrides :

- **Micro hybrides :**

Le système Stop-Start, correspond au niveau le plus faible d'hybridation. Il s'agit d'un système réversible remplissant le rôle du démarreur et de l'alternateur d'une voiture classique. Le moteur thermique est coupé automatiquement lors des arrêts et il est relancé automatiquement dès que le conducteur débraye [1] Aujourd'hui, le système Stop-Start est devenu un standard sur la plupart des modèles des grands constructeurs.

- **Mild hybrides :**

Les Mild hybrides complètent le Stop-Start par une double propulsion, thermique et électrique : les deux moteurs agissent ensemble pour propulser la voiture. Le moteur électrique apporte son

couple pour faciliter le démarrage et pour améliorer les reprises, l'électricité produite en mode alternateur est stockée dans des batteries spécifiques [1].

Les Mild hybrides sont capables également de récupérer de l'énergie au freinage. Le système fonctionne dans ce cas en générateur et développe une résistance qui s'ajoute au frein moteur [1].

- **Hybrides parallèles :**

Les hybrides parallèles disposent d'un système identique aux Mild hybrides au niveau de la propulsion mais peuvent également fonctionner en tout électrique au démarrage, à basse vitesse et lors des manœuvres de parking. Les batteries ont une capacité suffisante pour parcourir de petits trajets de quelques kilomètres sans avoir recours au moteur thermique.

- **Véhicules électriques à autonomie prolongée :**

Concernant les véhicules à autonomie prolongée, il n'y a que le moteur électrique qui actionne les roues. Toutefois, afin de permettre une autonomie supérieure, un petit moteur à combustion est prévu pour recharger les batteries en cas de besoin. Ce système permet de prolonger l'autonomie de 60 à 500 km [8]. Cette technologie se répand de plus en plus notamment avec l'I3 de BMW.

- **Hybride rechargeable :**

Les hybrides rechargeables sont une évolution des hybrides parallèles munis de batteries de capacité plus importante [1]. Ce genre de véhicules hybrides permet de recharger les batteries directement à la prise de courant et permet une autonomie électrique de 20 à 80km ce qui est une nette amélioration comparé aux hybrides classiques. En effet, dans ce cas-ci, le moteur thermique prend uniquement le relais lorsque les batteries sont déchargées [8]. Au salon de l'automobile de Bruxelles 2015, de nombreux constructeurs exposaient leurs hybrides rechargeables. Lors des échanges sur place entre General Electric et Mercedes, le constructeur allemand ne cachait pas qu'il prévoyait étendre sa gamme de véhicules hybrides rechargeables.

III. 2.2. Avantages :

Nous allons présenter les avantages des hybrides parallèles, rechargeables et les véhicules électriques à autonomie prolongée étant donné qu'il est question de voitures actuelles. Tous ces véhicules ont la capacité de réduire de manière plus ou moins significative la consommation de carburant. En ce qui concerne les émissions de CO₂, il est plus difficile d'affirmer un résultat

précis. Les hybrides parallèles assurent une réduction des émissions si on les compare aux véhicules à combustion équivalente. Pour les hybrides rechargeables et les véhicules électriques à autonomie prolongée, il est plus difficile de juger même si une nette diminution est attendue. En effet, l'aspect environnemental de ces véhicules dépend de leur source d'approvisionnement en électricité [8]. Nous pouvons toutefois affirmer une réduction de la pollution locale, même si cela entraîne des conséquences de délocalisation de la pollution. Nous approfondirons ces aspects plus loin dans ce travail.

III. 2.3. Inconvénients :

De manière similaire aux véhicules électriques, les inconvénients restent sans doute le prix d'achat élevé même s'il reste moins important que pour les véhicules électriques. Nous avons également des réserves au niveau de l'autonomie en tout électrique pour certains modèles et le temps de recharge pour les hybrides rechargeables [8]. Finalement, en ce qui concerne les hybrides rechargeables, nous insistons sur l'impact potentiel de la source de l'électricité.

III. 2.4. Conclusion :

Pour conclure, il s'agit actuellement de la technologie la plus répandue. A court terme, les hybrides rechargeables peuvent être très intéressants [8]. Toutefois, cela dépend grandement de la source de l'électricité. Les hybrides constituent une étape intermédiaire entre le véhicule électrique et le véhicule à combustion ordinaire. En effet, les hybrides présentent certains, voire tous les avantages de la voiture électrique en ne souffrant que partiellement des inconvénients.

III. 3. Voiture à l'hydrogène :

III. 3.1. Principe de la pile à combustible à l'hydrogène :

Le véhicule à l'hydrogène est l'option, long terme, préférée de spécialistes tels que les consultants stratégiques de General Electric. En effet, elle élimine les émissions liées directement à l'utilisation même si des émissions indirectes persistent [10]. Le principe de l'hydrogène part des piles à combustible. L'association de l'hydrogène avec l'oxygène produit un courant électrique et rejette de la vapeur d'eau. De ce fait aucune pollution n'est émise lors de cette association. ($2H_2 + O_2 \rightleftharpoons \text{Electricité} + 2H_2O + \text{Chaleur}$).

En pratique, les piles à combustible alimentent un moteur électrique. Il ne s'agit pas d'un combustible mais d'un vecteur d'énergie. L'hydrogène est stocké dans un réservoir à haute pression (700 - 900 Bar) doit aussi compter sur une batterie tampon en plus de la pile à

combustible et du moteur électrique. Le rendement énergétique de ce genre de véhicule permet de compter sur une autonomie de 500 à 600 km [8]. L'hydrogène est produit principalement à partir de gaz naturel même si des alternatives existent. Si un accroissement de la demande de piles à combustible survient, nous aurons également besoin d'un accroissement de centrales électriques pour la production de l'hydrogène. Par ailleurs, il est pertinent de relever que si l'électricité est produite avec du pétrole ou du charbon, les émissions de CO₂ pour la production de l'hydrogène seront supérieures à celles émises par les voitures à essence. Les enjeux sont donc similaires à ceux de la voiture électrique. Si l'électricité et l'hydrogène sont produits grâce à des énergies renouvelables, l'impact de leur production sera nettement moins négatif. Massachusetts Institute of Technology estime qu'il nous faudra 30 à 40 ans pour accomplir une production propre [8].

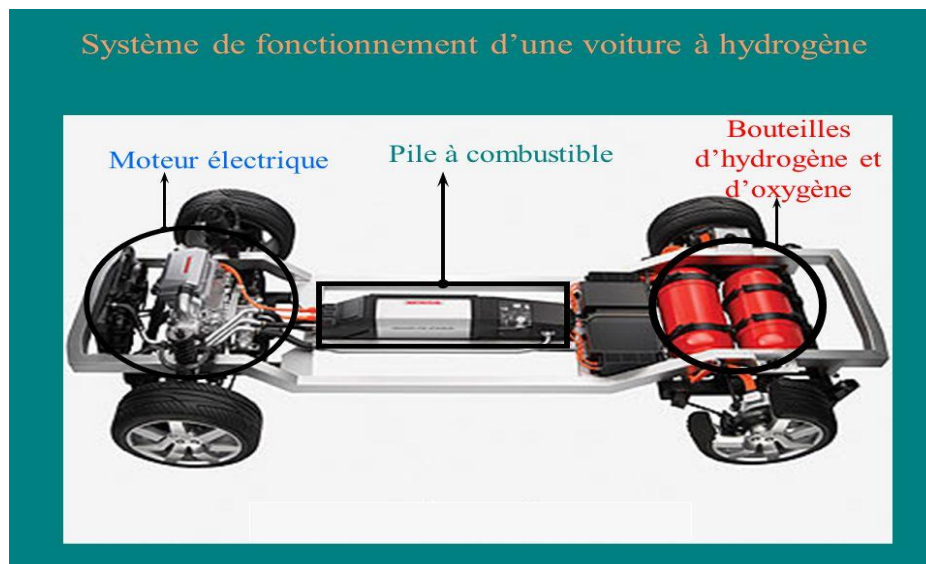


Figure 3 : Système de fonctionnement d'une voiture à hydrogène. [20]

III. 3.2. Avantages :

Nous insistons sur l'absence de pollution sonore, l'absence d'émissions de CO₂ et de particules fines, l'abondance de l'hydrogène, mais aussi le temps réduit pour faire un plein et l'autonomie qui reste supérieure à celle des véhicules électriques [8].

III. 3.3. Inconvénients :

Tout d'abord, il y a le risque de l'explosivité et de l'inflammabilité de l'hydrogène qui est non-négligeable. Deuxièmement, le prix ; actuellement, les piles à combustible rendent les véhicules à l'hydrogène plus chers que les véhicules conventionnels. Troisièmement, l'hydrogène ne produit pas de l'énergie de manière efficiente. Quatrièmement, le réservoir H₂ haute pression est encombrant et le rendement énergétique volumique est inférieur à l'essence ou au diesel. Finalement, il faut trouver un moyen d'évacuer la chaleur qui se dégage de la réaction [8]. Il est important aussi de garder à l'esprit que l'hydrogène est, comme l'électricité, produit via différentes sources. Certaines de ces sources détiennent une empreinte écologique conséquente.

III. 3.4. Infrastructures :

Il est difficile de recenser exactement combien de stations-service qui proposent de l'hydrogène actuellement. Nous pouvons estimer à quelques centaines le nombre de stations. Ce nombre ne cesse néanmoins de croître au fil des mois et des années avec de nouveaux projets et le développement de nouveaux modèles de véhicules à pile à combustible. Afin de promouvoir cette solution pour l'avenir, il est indispensable de rendre la recharge plus accessible en intensifiant la présence de stations-service qui proposent l'hydrogène. Une collaboration entre les filières hydrogènes et les autorités locales serait également bénéfique [8].

III.3.5. Conclusion :

Malgré une efficacité limitée, l'hydrogène présente un grand potentiel pour l'avenir. Nous nous attendons donc à un développement lent dans un premier temps avant un développement plus intensif par la suite. Deux nouvelles voitures à hydrogène à grande échelle (Toyota FCV et Honda FCEV) verront le jour en 2015. [8]

IV. Architecture des véhicules électriques :

Dans cette partie, nous proposons différentes architectures possible pour la propulsion électrique d'un véhicule. Pour cela, nous limitons notre analyse à un véhicule à quatre roues, mais la plus grande partie de l'analyse proposée est également valable pour d'autres types de véhicules (deux roues, véhicules lourds à 6 ou 8 roues...) Il ne s'agit pas ici de faire une présentation exhaustive de toutes les architectures possibles de véhicules électriques, mais plutôt de montrer comment on peut aboutir rationnellement à une structure utilisant des moteurs

électriques intégrés dans les roues. Une analyse plus détaillée des architectures peut par exemple être consultée dans [20].

La voie la plus simple pour réaliser un véhicule électrique est de remplacer le moteur thermique par un moteur électrique. L'architecture mécanique du véhicule est alors totalement conservée et les contraintes de dimensionnement en couple et en vitesse du moteur électrique sont les mêmes que celles du moteur thermique. Notamment, on conserve alors la boîte de vitesse et l'embrayage. (L'Annexe 3) illustre cette première solution. Cette solution n'est pas utilisée en pratique, mais son intérêt serait d'être très proche des véhicules traditionnels. La boîte de vitesse permet la réduction du couple maximal (qui impose au premier ordre le volume du moteur électrique). Ceci étant, la boîte de vitesse crée des creux de couple au moment du changement des rapports de la boîte de vitesse et, pour un moteur donné, limite les zones pouvant être atteintes dans le plan couple vitesse. En fait la boîte de vitesse est bien adaptée aux moteurs thermiques qui ont une zone de fonctionnement optimale (couple et rendement élevés) limitée dans le plan couple-vitesse. Ainsi, la boîte de vitesse permet d'adapter le couple du moteur au couple nécessaire à la propulsion du véhicule. Or les moteurs électriques sont capables de fournir un couple constant élevé à basse vitesse et de fonctionner à puissance maximale constante sur une grande de vitesse. Il est donc inutile de compliquer et de pénaliser le rendement de la chaîne de propulsion par une boîte de vitesse lors de la propulsion d'un véhicule par un moteur électrique.

On peut ainsi remplacer la boîte de vitesse par un réducteur unique (Annexe 4). Cela permet à la fois de réduire le couple que le moteur électrique doit produire tout en éliminant le problème des creux de couple. La structure reste toujours très proche de l'architecture traditionnelle du véhicule à moteur thermique – avec un moteur central – mais l'avantage est d'avoir pu supprimer le système d'embrayage ce qui améliore l'agrément de conduite, simplifie la chaîne de traction et améliore son rendement. C'est cette solution qui est très majoritairement adoptée dans les véhicules électriques et hybrides électriques actuels (même si dans le cas des véhicules hybrides la chaîne de propulsion, plus complexe, associe mécaniquement plusieurs moteurs électriques et thermiques). Le système centralisé reste toutefois encombrant car il nécessite une transmission pour relier les roues au moteur. De plus, la transmission mécanique, et en particulier le réducteur, peuvent nécessiter un entretien, être à l'origine de bruit et faire chuter le rendement. En outre la répartition de puissance sur les deux ou quatre roues motrices est réalisée mécaniquement grâce au différentiel. Cet ingénieux système limite pourtant le contrôle indépendant de chaque roue.

Pour pallier à ce dernier défaut on peut imaginer une solution où la motorisation est répartie sur chaque roue du véhicule : on place à côté de chacune des roues un moteur et éventuellement un réducteur (Annexe 5). On utilise dans ce cas relativement souvent l'anglicisme 'moteur hub', c'est-à-dire littéralement 'moteur dans le moyeu'. Cette solution est assez proche de ce qui est actuellement fait sur les bogies des locomotives ou des automotrices : le moteur est rapproché des roues motrices. De fait cette solution a été par exemple utilisée par Alstom pour réaliser un Tramway. La Figure 4 montre le moteur réalisé : il s'agit d'un moteur asynchrone avec un réducteur, le tout étant disposé à côté d'une jante qui vient recouvrir le dispositif. L'encombrement du système complet est tel que Michelin avait alors développé un pneumatique spécifique de grande largeur. L'intérêt d'une telle solution est de pouvoir contrôler de façon indépendante chaque roue. La simplicité mécanique permet d'utiliser des composants (moteurs et réducteurs) classiques, mais cela se fait au prix d'un encombrement plus important que l'intégration directe dans la roue.



Figure 4 : Exemple de 'moteur hub' réalisé par la société Alstom Transport pour la traction d'un Tramway. [20]

Finalement la solution ultime consiste à intégrer le moteur complètement dans la roue (Annexe 6). Dans ce cas il est difficile (mais pas impossible) d'incorporer également un réducteur et le plus souvent le moteur est en attaque directe. Cette solution permet d'obtenir une grande compacité de la fonction motrice et un contrôle précis (en couple et en vitesse) de chaque roue motrice. Le rendement de la chaîne de traction est optimal puisque cette dernière est réduite à son plus strict minimum. Ceci étant, il ne faut pas nier les difficultés mécaniques d'intégration,

la vulnérabilité de la fonction motrice qui est incluse dans sa totalité dans les roues et surtout les contraintes fortes qui portent sur le dimensionnement du moteur (surtout dans le cas d'une attaque directe). Les avantages et les inconvénients de cette solution seront discutés plus en détail dans la partie suivante. Bien entendu, le concept de moteur-roue n'est pas exclusivement lié à l'intégration d'un moteur électrique et des moteurs-roues thermiques ou hydrauliques ont aussi été conçus, mais il faut reconnaître que la géométrie cylindrique des moteurs électriques rotatifs se prête mieux à l'intégration dans une roue.

Nous terminerons cette partie en évoquant la possibilité de réaliser une chaîne de traction hybride électrique simplifiée grâce à des moteurs intégrés dans les roues. La structure hybride série/parallèle est celle qui offre le plus de possibilités (modes tout électrique et tout thermique, freinage récupératif, accélération avec les pleines puissances thermique et électrique...), mais dans ce cas l'une des principales difficultés est de réaliser le couplage de puissance mécanique produite par le moteur thermique avec celle(s) produite(s) par la(les) machine(s) électrique(s). La solution la plus connue est celle exploitée par la société japonaise Toyota et qui consiste à utiliser un système mécanique qui est un train planétaire épicycloïdal. Ce dispositif permet de réaliser relativement simplement le couplage, mais ne permet pas de piloter librement le moteur thermique et les deux moteurs électriques car des conditions mécaniques doivent être respectées au niveau du train planétaire. L'utilisation de moteurs-roues peut permettre de réaliser ce couplage de façon simplifiée. L'idée est de maintenir la propulsion thermique classique sur les roues motrices, en réduisant la puissance du moteur thermique (on parle usuellement de 'downsizing'), et d'installer sur les roues non motrices des moteurs-roues, comme le représente (l'Annexe 7). Ces moteurs sont alors dimensionnés pour assurer un fonctionnement tout électrique (en mode urbain par exemple), soutenir le moteur thermique sous-dimensionné et fournir de cette manière la même puissance que le véhicule thermique initial et assurer un freinage ou ralentissement récupératifs. On obtient alors un véhicule hybride série-parallèle dont la structure est relativement proche d'un véhicule thermique classique mais qui permet l'utilisation d'un moteur thermique plus faiblement dimensionné et l'exploitation des caractéristiques intrinsèques des moteurs-roues, à savoir leur compacité et leur modularité. Le véhicule NEXT développé par Renault en 1995 en est un premier exemple. Un autre exemple de ce type de véhicule hybride est actuellement en cours de conception dans le cadre du projet PHEBUS soutenu par l'ANR et financé par l'ADEME ; il s'agit d'un quadricycle lourd de la marque AIXAM qui sera hybridé selon l'architecture décrite ci-dessus [20].

V. Les composants nécessaires au fonctionnement du véhicule électrique :

Les composants présents dans les voitures électriques ne sont jamais les mêmes selon le constructeur du modèle et la technologie utilisée. Cependant certains sont indispensables pour pouvoir qualifier un véhicule automobile d'électrique. Parmi ceux-ci, on retrouve la Batterie, élément le plus essentiel pour ce type de véhicule, le moteur (électrique et thermique si voiture hybride) et le super condensateur pour les véhicules, autre que de ville. D'autres composants, tels que (le convertisseur réversible, le hacheur, le calculateur), peuvent être utilisés afin commander et d'alléger la consommation gourmande de la batterie en énergie. [11] Regardons ces composants avec plus de détails :

V. 1. La batterie :

Elle est le composant le plus important dans une voiture électrique. Sans elle, il n'y a pas d'énergie stockée. Actuellement, les batteries les plus répandues sont les batteries lithium-Ion aussi appelées Li-Ion. Elles ont la plus grande densité d'énergie (l'énergie déployée pour une masse donnée). Le défaut d'une telle batterie est que sa durée de vie n'est pas très grande. De plus, en autonomie elle ne peut dépasser celle d'un moteur thermique tant l'énergie stockée est insuffisante. La durée limitée de cette batterie peut se résumer à une instabilité chimique de ses composants qui induisent ce phénomène. Cette même instabilité est à l'origine de la durée de charge conséquente de ces batteries (entre 6h et 8h). Certaines industries de l'automobile ont prévu pour pallier à cette charge onéreuse en temps, un système de changement de batterie aux stations de services qui pourrait éventuellement être plus rapide qu'un plein d'essence. Finalement, les batteries Li-Ion sont les seules batteries qui peuvent être utilisées dans les véhicules électriques. [11]

- **Le Chargeur de batterie :**

Il permet de recharger le pack batterie à partir d'un réseau électrique domestique.

V. 2. Le moteur :

Ceux électriques ont été inventés depuis les brevets de Kriéger. Les fonctionnalités de ceux-ci étaient déjà assez avancées. Certaines sociétés ont inventé, depuis, des moteurs plus

performants dits à « flux axiaux » pouvant être incorporés dans les roues. Cette caractéristique peut permettre à de nouveaux types de véhicule d'apparaître (en effet, on est en droit de penser que la voiture avec un moteur placée dans les roues pourra avoir une forme bien différente de celle que nous connaissons). [11]

Les machines électriques peuvent être classées principalement en deux groupes selon la nature de l'électricité employée, machine à courant continu et machine à courant alternatif. Les deux familles de machines ont leurs avantages et leurs inconvénients, et ont trouvé leur application en fonction de l'exigence de charge. Les machines à courant continu ont été incorporées dans la décennie des années 1980 en raison de ses caractéristiques de couple à charge et de contrôlabilité. En dépit de ces traits fins, les machines à courant continu ne sont plus préférées en raison de leur taille et de leurs besoins d'entretien. Aujourd'hui, les derniers fabricants de véhicules utilisent des moteurs à courant alternatif et sans balais, notamment des moteurs à induction, des moteurs à réluctance commutée et des moteurs à aimants permanents [17].

▪ **Le Moteur-roue :**

Ce sont des roues dans lesquelles on intègre une machine électrique tournante dans les jantes (moteur-roue). Les deux roues arrière sont indépendantes (pas de liaison mécanique entre elles). Ces moteurs permettent de les entraîner en rotation ; ils assurent donc la motorisation du train arrière du véhicule. Ces roues motrices sont utilisées surtout en fonctionnement tout électrique du véhicule, néanmoins elles sont utilisées en génératrice en fonctionnement thermique et pendant la phase de freinage récupératif. Les machines électriques peuvent également fonctionner en moteur pendant les phases à zéro émission (tout électrique) ou en couplage avec le moteur thermique pour améliorer les performances d'ensemble. [12]

V. 3. Le supercondensateur :

Il permet de fournir la puissance nécessaire pour les accélérations lorsque les batteries sont trop lentes. Son fonctionnement est comparable à de l'adrénaline : il emmagasine de l'énergie et ressort d'un coup, les accélérations seront donc plus puissantes et plus rapides. Nous pourrions le qualifier d'accessoire. Effectivement, si le véhicule est conçu pour rouler en ville, le super condensateur ne servira à rien car il est inutile dans un lieu où la vitesse est limitée à 50 km/h [11]. Les supercondensateurs fonctionnent en source de puissance réversible, autorisant ainsi

des cycles très contraints avec des démarrages rapides et des décélérations rapides. Ils servent à fournir de l'énergie au système lorsque le temps de mise à disposition ou de récupération de l'énergie est très bref. La gestion d'énergie doit rendre les supercondensateurs prioritaires par rapport au pack batterie. [12]

V. 4. Convertisseur réversible :

C'est un onduleur de tension triphasé réversible régulé en courant. Il assure l'alimentation (en tension alternative) des moteurs-roues, le contrôle du courant absorbé par la machine (donc du couple) à partir de sa commande, le contrôle de la différence de vitesse entre les deux roues afin d'éviter les survitesses lorsqu'une des roues est en contact avec une zone glissante. Il y a un onduleur (variateur de vitesse) pour chaque moteur roue. Chaque variateur crée un système triphasé de courants sinusoïdaux pour alimenter les moteurs-roues de façon indépendante. Les courants sont synchronisés avec les capteurs de position du rotor des machines. La consigne reçue par les deux variateurs est identique. Elle transite par le superviseur du véhicule et transite sur le bus CAN. Les variateurs reçoivent une consigne de couple ou de puissance. Sur la base de la consigne reçue, le variateur détermine l'amplitude et la phase des courants statoriques de façon à obtenir le couple ou la puissance demandée sur la base du modèle de connaissance du moteur. Si la tolérance obtenue sur le couple moteur effectif est insuffisante (dispersions de fabrication du moteur et du variateur) un rebouclage sera effectué via un estimateur de couple. Les variateurs assurent aussi la gestion d'une vitesse différentielle entre roues trop importante. En cas de patinage d'une roue, le variateur concerné passera en régulation de vitesse afin d'assurer une différence de vitesse entre les 2 roues acceptable ($\Delta\Omega < X$ tr/min). Si le véhicule dépasse une vitesse maximale, les variateurs réguleront une vitesse maximale (à définir) et non plus le couple jusqu'à ce que la consigne de couple corresponde à une vitesse acceptable. [12]

V. 5. Le Hacheur DC/DC :

Le hacheur DC/DC charge et décharge les supercondensateurs lors des phases de freinage et d'accélération du véhicule afin de limiter les cycles de charge/décharge des batteries. Le hacheur peut réguler la tension du bus, le courant des supercondensateurs ou le courant du pack batteries (par exemple nul durant les phases d'accélération et de freinage). [12]

V. 6. Le calculateur :

La gestion de l'énergie du véhicule est assurée par un module appelé Boitier de Gestion Energie (BGE). Ce boitier sera composé de plusieurs cartes électroniques ; la carte principale sera équipée d'un microcontrôleur dont le logiciel assurera toutes les stratégies à mettre en œuvre. Des cartes complémentaires de conditionnement permettront la mise en forme de certains signaux d'entrées et sorties gérés par la carte principale. Le logiciel embarqué sera développé à partir de la modélisation des stratégies de gestion d'énergie effectuée sous l'environnement Matlab® Simulink®.

Le Boitier de Gestion Energie est en relation avec tous les organes du véhicule :

- Le pack batterie,
- La batterie véhicule,
- Les superscondensateurs,
- Le variateur,
- Le moteur thermique,
- Les moteurs-roues,
- Le tableau de bord,
- Le chargeur réseau,
- Les pédales d'accélérateur et de frein,
- Les commandes de démarrage/arrêt et de sens de marche (av/arr.) du véhicule,
- Le chauffage/ventilation,
- Le dégivrage.

Le Boitier de Gestion Energie échangera des informations avec le tableau de bord. Il échangera également de nombreuses informations avec le variateur par l'intermédiaire d'un bus CAN (CAN véhicule). Les informations provenant du variateur seront des données, types tension, courant ou température, qu'il aura acquises concernant les moteurs roues, les super condensateurs et le pack batterie. Le Boitier de Gestion Energie fournira au variateur la consigne de couple qui correspond à la volonté du conducteur pour la vitesse du véhicule. Les informations de diagnostic et de monitoring en temps réels seront fournies par le Boitier de Gestion Energie par l'intermédiaire d'un bus CAN de diagnostic. [12]

VI. Les infrastructures de recharge :

Le problème d'autonomie qui a toujours pénalisé les véhicules électriques, n'est pas le seul obstacle à leur adoption massive. En effet, les véhicules électriques nécessitent l'installation d'infrastructures spécifiques pour la recharge de la batterie. Sans infrastructure adaptée lui permettant d'effectuer des longs trajets, le consommateur réticent préfère, de toute évidence, un véhicule conventionnel à son homologue électrique. L'utilisation de véhicules électriques à grande échelle, exige donc des investissements très importants dans le système de distribution d'énergie pour devenir une alternative viable. Une des premières installations en Europe a été lancée en 2011. Bénéficiant de l'aide de l'UE, le projet « *green highway* » consiste à équiper 400 km de stations-service, entre Trondheim en Norvège et Sundvall en Suède, permettant le rechargement électrique sur la voie publique [15]. Pour une voiture électrique, il convient de distinguer deux dimensions pour bien comprendre le potentiel et les limites sur le marché. La première dimension est constituée par la fonction moteur, au niveau maîtrise et efficacité. Le moteur électrique a un rendement énergétique de l'ordre de 90%. Quant aux moteurs thermiques actuels, les plus performants ont des rendements de l'ordre de 30% ; c'est-à-dire 70% des carburants consommés sont dissipés en chaleur. La deuxième dimension est liée à la fonction de stockage nécessaire de l'énergie électrique. Malgré les obstacles technologiques et grâce à une prise de conscience globale des enjeux environnementaux, des plans gouvernementaux ont été initiés dans les 5 dernières années, pour relancer le développement des véhicules électriques. Depuis 2011, l'offre est en train de se diversifier. En novembre 2011, BMW dévoile son nouveau concept de véhicules électriques, la BMW i3. Son moteur électrique est conçu essentiellement pour la conduite urbaine et développe 125 kW (170 ch) avec un couple maximum de 250 Nm [13]. Dévoilée au salon de Genève 2012, la Renault ZOE est une citadine animée par un moteur électrique de 60 kW (80 ch) et 222 Nm de couple.

A l'horizon 2020, l'objectif en France est de mettre en circulation 2 millions de véhicules électriques. Un tel développement nécessitera le déploiement d'infrastructures de recharge des batteries. Le plan prévoit la mise en place de 4 millions de prises dans le secteur privé, à domicile ou en entreprises, et 400 000 prises mises à disposition en voirie ou en parkings publics[14]. Tous ces « *concept-cars* » sont destinés essentiellement à une utilisation urbaine, et ceci à cause du problème d'autonomie des batteries. Afin de pallier ce problème dans les véhicules tout électrique, de nouvelles solutions sont envisagées. Nous proposons, dans la suite

de décrire le principe d'hybridation des sources d'énergie, ce permettant d'améliorer la compétitivité des véhicules électriques.

VII. Points forts et points faibles : [16]

La traction électrique ne semble pas être généralisable, tout au moins à court terme, pour l'ensemble du parc automobile. Cependant, certains créneaux, pour lesquels les avantages l'emportent (ou l'emporteront dans un avenir proche) sur les inconvénients, peuvent être envisagés dans le cadre d'une diffusion commerciale de véhicules électriques. L'importance et la nature des créneaux évolueront, bien entendu, avec la progression de la technique. On peut ainsi espérer que, lorsque la pile zinc-air à circulation d'électrolyte, puis la pile à combustible deviendront opérationnelles et commercialement viables, d'autres catégories de véhicules pourront accéder à la traction électrique.

VII. 1. Les points forts :

Pour en revenir à un horizon moins éloigné, et par conséquent à la batterie au plomb, on peut citer, en faveur de la traction électrique pour les véhicules urbains, les avantages suivants :

- **Longévité supérieure des organes de traction**

Les entreprises possédant des parcs de camionnettes électriques estiment généralement que la durée de vie d'un véhicule est à peu près le double de celle d'un véhicule analogue à moteur classique.

- **Coût d'exploitation réduit :**

Les exploitants de flottes de véhicules utilitaires électriques ont généralement souligné ce facteur, dû à la fois à la réduction du coût de l'entretien et de celui de l'énergie.

Par exemple, la société britannique MORRISON ELECTRICARS a indiqué qu'un parc de 50 véhicules électriques peut être facilement entretenu par 2 personnes dont une non qualifiée, ce qui n'est évidemment pas le cas pour un parc de cette dimension constitué par des camionnettes à moteur diesel ou à essence.

(L'absence d'opérations de vidange, la solidité du matériel électrique, les nettoyages réduits au minimum, sont des facteurs qui contribuent à cette réduction du personnel d'exploitation.)

Le bilan énergétique est également intéressant, pourvu que l'on fasse les recharges de nuit et que l'on opère avec des chargeurs bien adaptés.

- **Silence :**

Le bruit dû à un véhicule électrique est pratiquement limité au bruit de roulement, ce qui fait une différence très sensible avec le véhicule thermique. Ce facteur est apprécié par les

conducteurs ainsi que par les passagers s'il s'agit d'un véhicule de transport de personnes. Il le sera également par les riverains, qui sont de plus en plus sensibles aux nuisances de la vie urbaine. En particulier, le fait que le véhicule électrique ne fasse aucun bruit aux arrêts (feux rouges, etc.) car son moteur ne tourne pas à l'arrêt et aux démarrages, ne peut manquer de séduire le piéton.

- **Absence de pollution urbaine :**

Il est inutile d'insister sur cet avantage évident, auquel les habitants des villes seront très sensibles. C'est, semble-t-il, un avantage décisif pour que la promotion du véhicule électrique reçoive une aide substantielle de la part des pouvoirs publics.

- **La facilité de conduite :**

Elle est due à l'absence d'embrayage et de changement de vitesse, ainsi qu'à la vitesse limitée. La conduite est d'ailleurs si simple que l'on peut en conclure que, d'une part, un permis de conduire simplifié devrait pouvoir être instauré pour les véhicules électriques et que, d'autre part, la voiturette électrique se prête particulièrement bien à une exploitation en véhicule banalisé.

VII. 2. Les points faibles :

Parmi les inconvénients que l'on peut attribuer au véhicule électrique, nous citerons :

- **L'autonomie limitée et la grande durée de recharge :**

Cet inconvénient est de taille, puisqu'il interdit au véhicule électrique de circuler en rase campagne. C'est également un frein au développement de la voiturette privée urbaine. Par contre, les flottes spécialisées qui disposent de techniciens pouvant s'occuper des opérations de contrôle et d'entretien (niveaux de batteries...) et dont les véhicules reviennent tous les jours au garage pour la recharge sont beaucoup moins sensibles à cet inconvénient. On peut d'ailleurs envisager, pour l'avenir, une logistique coûteuse permettant de réduire certaines contraintes et notamment la durée de recharge ; par exemple, une infrastructure spécialisée constituée par des stations-services de recharge et d'échange rapide de batteries standardisées mises en location. On peut mentionner ici, les travaux remarquables faits en Allemagne, dans ce domaine, par la société SELAK (filiale de la R.W.E.). Des études du même genre sont en cours en France.

- **Coût élevé à l'achat :**

Le prix de revient d'un véhicule électrique est très supérieur à celui d'un véhicule classique et le restera tant que le véhicule électrique ne sera produit qu'en petites séries. La différence de

prix de revient entre ces deux types de véhicules qui, dans le cas de petites séries, peut être évaluée entre 80 et 130% du prix du véhicule thermique correspondant, pourrait ainsi être ramenée à 20% en cas de production de masse. En ce qui concerne les cadences de production, on peut estimer que pour produire une voiturette à un prix raisonnable, il faudrait une cadence de production de 400 véhicules/jour. Le surcroît de coût à l'achat sera un handicap très sérieux pour le véhicule électrique et surtout pour le véhicule individuel, car il est probable qu'en raison du comportement économique actuel de l'automobiliste, celui-ci sera beaucoup moins sensible que le propriétaire d'un parc de véhicules utilitaires, au fait que le coût d'exploitation joue en sens inverse du coût à l'achat.

- **Nécessité d'infrastructures spécialisées pour la recharge ou S'échange de batteries :**

Cette infrastructure est assez coûteuse. A titre d'exemple, une étude faite, en France, à la demande d'E.D.F. a évalué le prix d'une installation de recharge équipant un parking privé à 2000 F environ la place équipée, qui vient s'ajouter à un coût d'investissement du véhicule déjà élevé pour une fabrication en petites séries. Ce coût supplémentaire pourrait être évité par la mise en place d'un réseau de stations-services de recharge rapide ou d'échange de batteries.

VIII. Domaine d'utilisation : [16]

Nous avons vu que l'utilisation du véhicule électrique est, au moins à court terme, conditionné par des contraintes techniques et économiques assez impératives :

- faible rayon d'action ;
- vitesse limitée ;
- coût élevé à l'achat ;
- poids important : charge utile ce qui conduit à un rapport défavorable ; poids total en charge
- recharge des batteries très lente.

On voit tout de suite que ces contraintes ne permettent pas au véhicule électrique de supporter la concurrence du véhicule thermique utilisé dans ses performances optimales. Mais, fréquemment, les véhicules thermiques ne sont pas utilisés au mieux de leurs performances, en particulier dans les zones urbaines, où de nombreux véhicules effectuent des trajets quotidiens compatibles avec les contraintes de charge utile, les limitations de vitesse et les possibilités

d'autonomie évoquées ci-dessus pour les véhicules électriques. Il faut ajouter à ces constatations, que les soucis de l'environnement sont précisément prédominants dans les villes. Il semble alors évident que le champ d'utilisation privilégié du véhicule électrique soit restreint à la ville. Sauf peut-être pour le long terme avec l'apparition d'une pile à combustible opérationnelle, le véhicule électrique sera d'abord un véhicule spécifiquement urbain. Précisons les domaines d'utilisation que l'on peut envisager pour le véhicule électrique :

▪ **Transport de marchandises :**

Les utilisations envisageables dans ce domaine ont été explorées par les constructeurs qui ont à leur actif un certain nombre de réalisations et qui s'attendent à un développement considérable et dans un délai très rapproché du véhicule électrique utilitaire. On peut citer :

- les véhicules de petite livraison urbaine (en particulier, les livraisons qui nécessitent des arrêts fréquents) ;
- le transport des marchandises à l'intérieur des usines ;
- la distribution des journaux ;
- la camionnette de transport ut Misée en location ;
- le transport à l'intérieur des hôpitaux ;

Le véhicule utilitaire semble d'ailleurs être le plus facile à convertir à l'électricité, car un grand nombre de ces véhicules circulent pendant les horaires usuels de travail, à l'intérieur d'un périmètre limité celui de l'agglomération urbaine et reviennent passer la nuit au dépôt. Dans ces conditions d'utilisation, l'autonomie et la durée de la recharge ne constituent plus des contraintes. De plus, le véhicule fait généralement un arrêt prolongé au milieu de la journée correspondant au temps de repos du conducteur ; ce temps pourrait, au besoin, être utilisé à échanger les batteries déchargées contre des batteries chargées, ou à recharger partiellement ses batteries, ce qui permettrait d'augmenter le rayon d'action journalier du véhicule. L'histoire du véhicule électrique confirme d'ailleurs que les véhicules utilitaires constituent le « créneau » privilégié des véhicules électriques : les productions en séries les plus importantes ont été constituées par des véhicules de livraison, dont le meilleur exemple est fourni par les 60 000 véhicules circulant en Grande-Bretagne, utilisés pour la livraison du lait et du pain ou comme véhicules municipaux. En France également, ce sont les véhicules électriques pour flottes spécialisées qui se sont développés, à une échelle toutefois moindre qu'en Grande-Bretagne : les bennes à ordures qui circulent depuis 40 ans sont les plus connues ; il existe également des camions électriques employés par des entreprises de brasserie.

▪ **Véhicules de service :**

Les flottes importantes des services publics constituent un marché non négligeable. La flotte la plus fréquemment évoquée est celle des véhicules postaux effectuant le ramassage et la distribution du courrier. Le ramassage des ordures se fait déjà, en partie, avec des véhicules électriques. Les véhicules de relevés des compteurs d'électricité, d'eau, et d'une façon générale les véhicules de liaisons des grandes administrations pourraient également être remplacés par des véhicules électriques sans que le fonctionnement de ces parcs soit particulièrement bouleversé.

▪ **Véhicules de transport en commun :**

Des recherches et des expérimentations ont été menées sur l'autobus et le minibus électriques. En France, le minibus sovel a été essayé en transport en commun dans les villes de Carhaix, Clermont-Ferrand et Evry. Ce minibus semble avoir donné satisfaction aux usagers qui en appréciaient le silence et à l'exploitant, en raison du faible prix de revient et de l'entretien très réduit nécessité par ce véhicule ; au conducteur, enfin, qui appréciait la facilité de conduite et la souplesse du véhicule. Cette expérience sera suivie par la mise en service dans les villes nouvelles de la Région Parisienne de minibus conçus spécialement pour le transport en commun (Evry - Saint- Quentin-en-Yvelines - Marne-la-Vallée). Des expériences similaires se déroulent actuellement en Angleterre et aux U.S.A. avec des minibus et en Allemagne avec des autobus de type standard. Il serait intéressant de confronter ces expériences et, en particulier, d'engager un débat pour savoir si le minibus est plus apte que l'autobus à être converti à la traction électrique. Un autre domaine d'utilisation possible pour cette catégorie de véhicules est constitué par le ramassage scolaire, le transport de touristes (visites à l'intérieur des villes) et le transport du personnel.

▪ **Transport individuel :**

Deux formes peuvent être envisagées pour le développement du petit véhicule électrique urbain :

- a) le véhicule particulier qui, très probablement sera utilisé comme véhicule d'appoint par les ménages, le véhicule principal restant propulsé par un moteur à essence ;
- b) le véhicule banalisé ou taxi sans chauffeur mis à la disposition du public.

IX. Exemples de quelques véhicules électriques récents :

IX. 1. PSA : Full Hybrid Peugeot 3008 : [22]

Sortie vers la fin de l'année 2011 et commercialisée depuis février 2012, ce véhicule hybride est équipé principalement de moteur thermique, moteur électrique, batterie, onduleurs, calculateurs, alterno- démarreur / STOP & START, boîte manuelle pilotée à 6 rapports. La figure 5 présente une photographie de la Peugeot 3008 hybride.



Figure 5 : Véhicule hybride Peugeot 3008. [22]

(L'Annexe 8) donne le schéma fonctionnel de la Peugeot 3008. La Peugeot est un véhicule hybride à architecture parallèle. Premier hybride diesel lancé sur le marché et premier véhicule basé sur une architecture parallèle, la Peugeot 3008 HYbrid4 ouvre les portes du futur, où la mobilité sera responsable à l'égard de l'environnement.

▪ **Motorisation :**

Outre sa motorisation hybride, la Peugeot 3008 HYbrid4 se distingue par ses capacités 4 roues motrices grâce à son train arrière hybride. Ce dernier est associé à un équipement qui comprend un générateur électrique de 27 kW (37 ch) et un train différentiel, offrant ainsi un surplus de puissance à l'accélération, ou une traction supplémentaire lorsque la situation nécessite une motricité des 4 roues. Le couple généré par le moteur électrique sur le train arrière permet également un meilleur agrément de la boîte de vitesses. En mode tout électrique, avec une batterie au métal nickel-hydrure (NiMH) entièrement chargée, la Peugeot 3008 HYbrid4 peut parcourir des distances, jusqu'à 4 km, sans émettre aucune émission dans l'atmosphère. C'est notamment le cas en zone urbaine, où arrêts et redémarrages multiples sont le lot quotidien du

conducteur, ou en roulage à faible vitesse. Lorsque le niveau de la batterie devient insuffisant, le moteur diesel prend automatiquement le relais.

▪ **Moteur électrique :**

Le moteur électrique fixé sur le train arrière du Crossover Peugeot 3008 Hybrid4 est assisté d'un second générateur synchrone sollicité en permanence, également fourni par Bosch. Installé dans le compartiment moteur, ce SMG 138/80 (diamètre 138 mm, longueur 80 mm) sert de génératrice pour le démarreur haute tension du système Stop & Start. Mais sa fonction principale consiste à fournir l'alimentation nécessaire à la transmission arrière, et au réseau électrique. Il transfère la puissance du moteur diesel via une transmission par courroie très robuste. Capable de générer de l'électricité dans quasiment tous les modes de conduite, la batterie haute tension constitue une solution de stockage de l'énergie compacte et économique. En fonctionnement continu, le SMG 138/80 peut fournir 7 kW à des régimes moteur pouvant atteindre 15 000 tr/min, avec une puissance de crête de 8 kW.

▪ **Gestion d'énergie :**

Le principal composant de la transmission électrique est le HPCU – la boîte qui commande la puissance hybride. Ses circuits de régulation de puissance supportent non seulement le logiciel de commande des deux générateurs électriques mais également héberge les stratégies de contrôle de l'hybride conçues et imaginées par PSA, et du système de gestion hybride, mais servent également d'alternateur pulsé qui convertit le courant alternatif généré par le SMG 138/80, en courant continu pour recharger la batterie. Il sert également de redresseur entre le réseau basse tension du véhicule et le réseau haute tension du moteur électrique. La conception de cet élément posait un défi considérable, nécessitant une solution capable de générer un courant pouvant atteindre 340 A, à partir d'une source ne dépassant pas 300 V, et dans un volume limité à environ 12 litres.

▪ **Caractéristiques :** Voir (Annexe 9).

▪ **Fonctions :**

Bien que la chaîne cinématique et son contrôle soient conçus pour obtenir le meilleur rendement possible, la solution est basée sur une structure qui permettrait aux moteurs de fonctionner individuellement ou ensemble (en parallèle). Ce véhicule possède quatre modes de propulsion :

- Le mode dit "Auto" : Ce mode est recommandé pour optimiser la consommation de carburant c'est le véhicule qui gère automatiquement les transitions entre le moteur à combustion interne et moteur électrique.
- Mode "ZEV" (Zero Emission Vehicle) : Dans ce mode seul le moteur électrique assure la propulsion de la voiture.

- Mode "4WD" (4 roues motrices) : Ce mode permet le fonctionnement simultané du moteur diesel, entraînant les roues avant, et du moteur électrique, entraînant les roues arrières ; la répartition du couple est contrôlée électroniquement en fonction des conditions d'adhérence et elle peut aller jusqu'à 40% de propulsion sur les roues arrières.
- Mode "Sport" : Ce mode met l'accent sur la dynamique ; l'accélération du véhicule est maximisée en utilisant toutes les capacités du moteur électrique, en plus du moteur diesel (effet boost).

IX. 2. La Tesla Model S : [23]

La Tesla Model S est une berline familiale haut de gamme et 100 % électrique, construite par Tesla Motors. Présentée au public en 2009 au Salon de l'automobile de Francfort, elle est commercialisée aux États-Unis depuis 2012 et dans certains pays d'Europe (dont Norvège, Pays-Bas, Allemagne et France) depuis l'automne 2013. Il s'agit du second modèle de voiture commercialisé par Tesla Motors, après la Tesla Roadster. Bénéficiant en août 2016 d'une autonomie NEDC supérieure à 600 km, c'est actuellement la voiture électrique de série la plus puissante et avec la plus grande autonomie. Outre la recharge à domicile et sur bornes ordinaires, la Model S bénéficie de bornes de recharges gratuites ultra-rapides appelées Superchargeurs. Ces bornes spécifiques à Tesla, sont déployées par la firme elle-même aux États-Unis, en Europe et en Asie. Elles permettent de récupérer 80 % de la charge, soit plus de 300 km, en moins de 40 minutes. Au niveau de la sécurité, la Model S a obtenu la certification EuroNCAP avec 5 étoiles, et également 5 étoiles au NHTSA , son équivalent américain. D'après le constructeur, elle a obtenu une note cumulée de 5,4. Soit la meilleure note de sécurité jamais attribuée. Cela est sans doute l'un des éléments de son succès, en décembre 2017 la Model S a dépassé les 200 000 ventes.



Figure 6 : La Tesla Model S. [23]

Depuis septembre 2017, la Tesla Model S est commercialisée en trois versions : 75D, 100D et P100D. Les chiffres 75 et 100 font référence à l'énergie restituable, en kWh, de la batterie lithium-ion cobalt polymère. Les lettres, ajoutées avant ou après la contenance de la batterie, indiquent une caractéristique du modèle : « D » pour « Dual-Motors » (soit une transmission intégrale) et « P » pour « Performance » (moteurs plus puissants).

IX. 2.1. Caractéristique de la Tesla Model S : [24]

- **Le moteur :**

Le moteur électrique de la Model S est de la taille d'une pastèque. Il a été entièrement développé par Tesla Motors et il est de technologie brushless. Ce Moteur électrique à courant alternatif et à induction est refroidit par eau et alimenté par un variateur de fréquence 375 volts.

Couple : 440Nm de 0 à 5100 tr/min

Chevaux : 416cv (310kW) à 5000 - 6000 tr/min (Tr/min max. 14000 tr/min)

Accélération Vitesse maximale 212 km/h, 0 à 100 km/h en 4,4 secondes.

- **La batterie :**

Les batteries de la Tesla Model S sont composées de milliers de cellules Lithium-Ion de type 18650 fournies par Panasonic depuis le début de sa commercialisation. Contrairement au Tesla Roadster, dont la batterie est placée derrière les sièges, celle de la Model S se trouve dans le plancher. Cela permet d'économiser de l'espace intérieur et d'augmenter le volume du coffre, mais la faible garde au sol de la Model S augmente le risque d'endommagement de la batterie. Pour protéger sa batterie, la Model S possède donc une plaque de blindage en aluminium de 6 mm d'épaisseur. Les cellules pèsent entre 47 et 50 grammes et ont toutes une tension nominale de 3,6 V. La composition du pack batterie de la Model S diffère selon la capacité, de plus la capacité des cellules de base a aussi évolué au fil des avancées en la matière. Ainsi, on remarque deux types d'évolutions possibles dans la capacité des batteries :

- Amélioration des cellules : le passage de batterie de 85 à 90 kWh, et 70 à 75 kWh, s'explique par une modification de la chimie des cellules qui permet une augmentation de la capacité qui passe de 3,2 à environ 3,35 Ah. Cela est dû à l'introduction de silicone dans le graphite de l'anode de la cellule.
- Amélioration de l'organisation du pack batterie : le passage de batterie de 90 à 100 kWh s'explique entre autres par une modification du rangement des cellules dans le pack. Le

système de refroidissement a été entièrement revu pour réduire ses besoins en place et donc intégrer plus de cellules dans le pack.

Depuis 2015, toutes les batteries sont garanties pendant huit ans kilométrages illimités. En termes de consommation d'énergie, cela dépend de la distance parcourue, de l'utilisation des objets électroniques au sein de la voiture, et enfin du poids ajouté à la voiture (bagages etc ...). En moyenne et en utilisation réelle, la consommation électrique variera autour des 18 kWh/100 km en roulant à 90 km/h, 21 kWh aux 100 km en roulant à 110 km/h, et 24 kWh aux 100 km en roulant à 130 km/h.

- **Recharge :**
- **Recharge standard :**

La Model S se recharge à domicile grâce à différents adaptateurs :

- chargeur sur prise de courant standard en 230 V et 13 A, soit 3 kW
- connecteur et adaptateur en 230 V et 32 A (prise bleue), soit 7 kW pour une recharge plus rapide
- connecteur et adaptateur en triphasé 400 V et 16 A (prise rouge), soit 11 kW

Mais la tesla S se recharge également sur les bornes de recharges publiques.

- **Réseau de recharge rapide :**

Tesla Motors déploie en Amérique du Nord, en Europe ainsi qu'en Asie des bornes de rechargement ultra-rapides, spécifiques aux véhicules Tesla Motors, appelées « Supercharger ». Selon les chiffres constructeurs, elles permettent de récupérer 50 % de charge en 20 min, 80 % de la charge en 40 min.

IX. 3. La Honda Clarity : [25]

La Honda Clarity est une plaque signalétique utilisée par Honda sur les véhicules à carburant de remplacement. Il a été initialement utilisé uniquement sur les véhicules électriques à hydrogène comme la Honda FCX Clarity 2008, mais en 2017, la plaque signalétique a été élargie pour inclure la Honda Clarity Electric à batterie et le Honda Clarity Plug-in Hybrid hybride électrique rechargeable. En plus de la pile à combustible Honda Clarity de la prochaine

génération. La Honda FCX Clarity est basée sur le concept Honda FCX 2006 et n'est disponible que comme véhicule électrique à pile à hydrogène. La FCX Clarity avait des qualités de voiture électrique telles que zéro émission tout en offrant des temps de ravitaillement de cinq minutes et une longue portée dans une grande berline pleine fonction. C'était le premier véhicule à pile à combustible à hydrogène disponible pour les clients de détail.

La production a débuté en juin 2008 et le leasing aux États-Unis a débuté en juillet 2008. Il a été introduit au Japon en novembre 2008. Le FCX Clarity était disponible à la location aux États-Unis, au Japon et en Europe. Aux États-Unis, il n'était disponible que pour les clients qui vivent dans le sud de la Californie, où plusieurs stations d'alimentation en hydrogène sont disponibles. En juillet 2010, un total de 20 voitures FCX Clarity étaient louées pour 600 dollars américains par mois, y compris la couverture des collisions, l'entretien, l'assistance routière et le carburant hydrogène. Il y en avait environ 10 autres au Japon et 10 autres en Europe. L'une des raisons du faible nombre de voitures aux États-Unis était le manque de stations-service. En 2014, Honda a annoncé l'élimination progressive de la FCX Clarity. De 2008 à 2014, Honda a loué un total de 46 unités FCX aux États-Unis.



Figure 7 : La Honda Clarity. [25]

▪ **Caractéristiques :**

L'énergie électrique de FCX Clarity provient d'une pile à hydrogène de 100 kW à flux vertical (V Flow) de Honda, où l'électricité est fournie à la demande. En commun avec de nombreux véhicules électriques, la voiture dispose d'un freinage régénératif et utilise une batterie séparée

pour stocker l'énergie récupérée lors du freinage. Le moteur électrique est basé sur le moteur utilisé dans l'EV Plus, évalué à 134 chevaux (100 kW) et (256 N·m) de couple à 0-3056 tr / min. La portée d'un réservoir d'hydrogène complet (4,1 kg à 5000 psi) est certifiée par l'EPA à 240 miles (~ 386 km). Le véhicule est estimé à environ 77 miles (123,9 km) par kilogramme d'hydrogène dans la ville, 67 miles (107,8 km) par kilogramme d'autoroute et 72 miles (115,9 km) par kilogramme en conduite combinée.

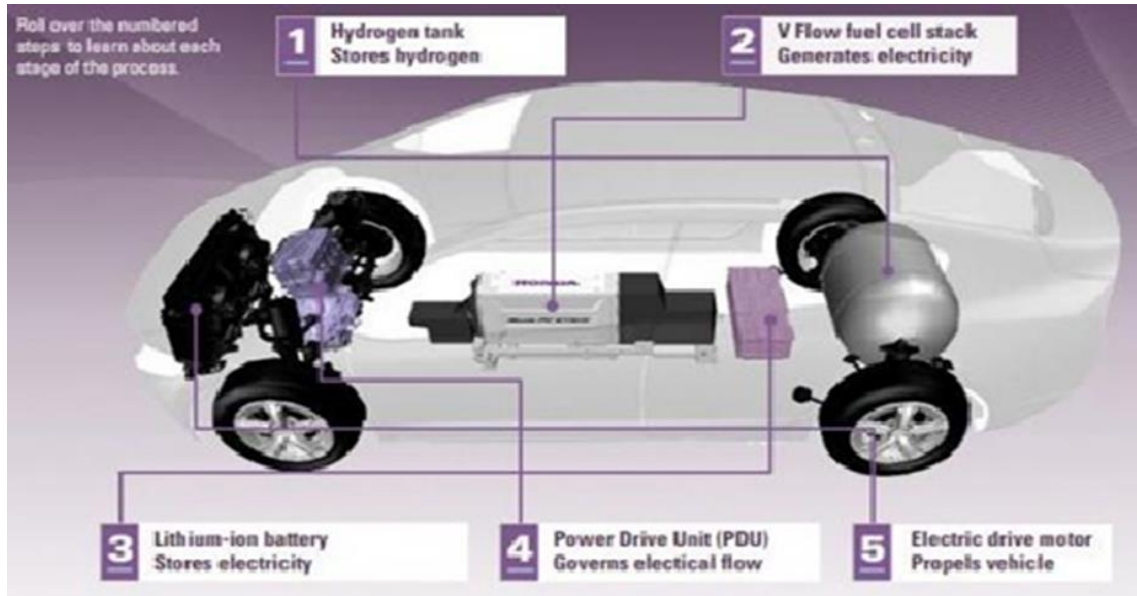


Figure 8 : schéma et composants Honda Clarity. [25]

▪ **Les coûts de fonctionnement :**

Il est rapporté en 2009 que l'hydrogène fabriqué à partir du gaz naturel coûte environ 5 \$ à 10 \$ par kilogramme en Californie et, après les coûts de compression et de transport, coûte de 12 \$ à 14 \$ le kilogramme. Même si le volume d'essence a plus que doublé au cours de l'été 2009, les voitures à pile à combustible ont le double de l'efficacité de modèles similaires avec un moteur à essence. La FCX Clarity a parcouru en moyenne 60 miles par kilogramme d'hydrogène.

X. Conclusion :

À travers ce chapitre, nous avons pu voir que la voiture électrique est un nouveau moyen de transport qui va certainement prendre une place de plus en plus importante dans un avenir proche. Mais les voitures électriques ne sont pas aussi écologiques qu'elle n'y paraisse. En effet, la production d'énergie nécessaire à son fonctionnement et à sa fabrication, prennent part au

réchauffement climatique. Néanmoins, ces voitures n'émettent pas de gaz à effet de serre lors de leur utilisation contrairement aux voitures thermiques. Lors de la comparaison avec la voiture thermique, nous avons pu voir que la voiture électrique pourrait être une alternative probante. Cependant, la voiture électrique demande encore à être améliorée notamment en ce qui concerne son autonomie, son prix et les infrastructures indispensables à son expansion.

CHAPITRE 2

***Présentation et
représentation des différents
organes d'un véhicule
hybride.***

Introduction :

Ce chapitre a pour but de proposer une vue détaillée de tous les sous-systèmes modélisés dans l'environnement qui compose le modèle de la transmission hybride parallèle à simple arbre. Ce dernier est composé de trois sous-systèmes :

- Un sous-système électrique.
- Un sous-système mécanique.
- Un sous-système de commande des deux moteurs.

I. Le Modèle hybride parallèle :

L'architecture retenue de ce modèle parallèle dans son ensemble est présentée par la figure 9. La propulsion du véhicule est assurée par l'addition des couples produits par les deux moteurs se fait au niveau de la connexion des deux derniers (accoupleur) sur le même arbre. Le moteur électrique est utilisé pour le démarrage du véhicule. L'embrayage n'est utilisé que pour accoupler/désaccoupler le moteur thermique du groupe motopropulseur.

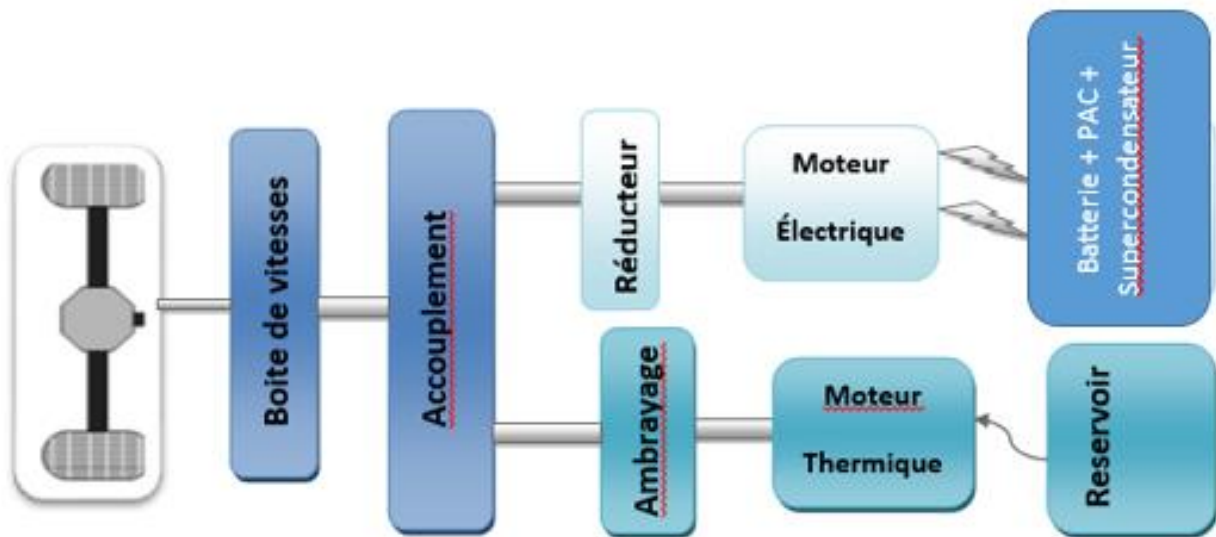


Figure 9 : Architecture hybride parallèle à simple arbre.

Les échanges énergétiques entre les différents éléments du groupe motopropulseur (Moteur à combustion interne « MCI », moteur électrique « ME » et les Roues) sont schématisés sur

l'annexe 10. On distingue deux chaînes de tractions : thermique (réservoir + moteur thermique) et électrique (batterie + moteur synchrone à aimants permanents). Ces deux chaînes sont liées entre elles par un nœud de puissance au point N.

Le système hybride parallèle à simple arbre fait apparaître le système d'énergie de façon à faire fonctionner chacun des moteurs dans sa plage de haut rendement, la figure 10 résume la circulation des différents flux de puissance entre les différents systèmes de motopropulseur. [30]

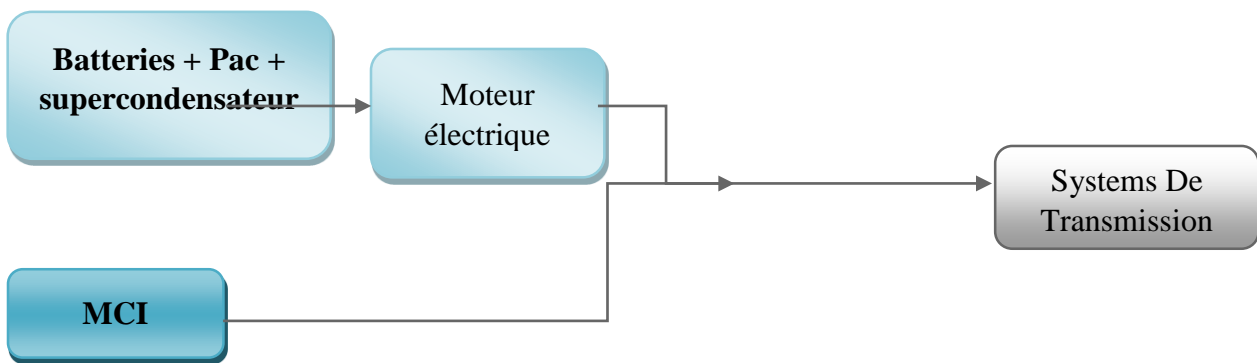


Figure 10 : Flux de puissance dans le modèle parallèle à simple arbre.

II. Les différents sous-systèmes :

II. 1. Le sous-système électrique :

La relation est étroite entre l'augmentation des performances des moteurs et la réalisation des hautes performances des véhicules hybrides électriques en exploitation. Il existe trois grandes catégories de moteurs (à courant continu, asynchrone et synchrone). En ce qui concerne le choix d'une technologie de motorisation, la solution de référence a été pendant longtemps la motorisation synchrone à aimant permanents, [27] sur la figure 11 on représente le schéma du sous-système électrique.

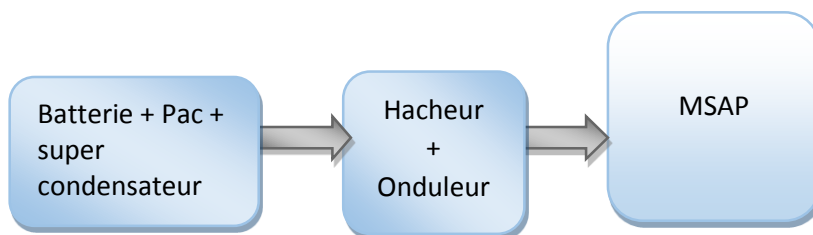


Figure 11: Schéma de principe du système électrique.

II.1.2. La machine électrique :

La machine synchrone à aimants permanents c'est la solution la plus adaptée pour les véhicules hybride grâce à ses performances techniques et en particulier, sa compacité. Et aussi de ses valeurs élevés des rapports couple/masse et puissance/masse ainsi que leur bon rendement. L'excitation dans les machines synchrones à aimants permanents se crée à l'aide de leurs aimants permanents. [27]

Une machine synchrone à aimants permanents est un convertisseur d'énergie réversible. Elle peut convertir une puissance électrique en une puissance mécanique en mode moteur, comme elle peut convertir une puissance mécanique en une puissance électrique en mode générateur. Destiné aussi à faire plusieurs fonctions :

- freiner le véhicule en récupérant de l'énergie ;
- assister le moteur thermique lors d'une forte demande de couple;
- assurer seul la traction du véhicule lors de la phase *stop&Go*.

Le moteur synchrone à aimants permanents a été choisi dans la structure des véhicules hybrides pour les raisons et les avantages qu'on peut citer comme suivant :

- fort couple massique ;
- Bon rendement (absence des pertes par effet Joule au rotor) ;
- Champ magnétique important dans l'entrefer ;
- Pas de source de tension continue pour l'excitation.

Mais le principal inconvénient, en dehors du cout assez élevé est l'ondulation du couple qui peut être néfaste. [30]

II.1.3. Les convertisseurs :

L'utilisation d'une chaîne de traction électrique dans les véhicules hybrides sous-entend la présence à leur bord d'une source d'énergie électrique qui peut être sous forme :

- d'un courant continu ;
- d'un courant alternatif.

Et à l'intérieur d'une même catégorie a des compatibilités entre les tensions des sources et des récepteurs. Ce problème compatibilité sous-entend la présence à bord des véhicules hybrides des convertisseurs électronique [28], dont le rôle principale est de lever les incompatibilités de fonctionnement. De ce fait on pourra trouver au niveau des véhicules:

- Des convertisseurs de courant continu en courant alternatif (DC/AC) que l'on appelle onduleurs;
- Des convertisseurs de courant continu en courant continu de tension différée (DC/DC) que l'on appelle hacheurs.

a) Onduleur triphasé :

Dans les véhicules électriques équipés d'un moteur à courant alternatif (MSAP), il est nécessaire d'interposer entre la source d'énergie et le moteur de traction un dispositif de conversion appelé onduleur (DC/AC), qui transforme l'énergie électrique à courant continu en énergie électrique à courant alternatif et qui permet de réaliser la commande du couple des moteurs et le réglage de la vitesse du véhicule tant en mode traction qu'en mode freinage. [29]

Le type de convertisseur utilisé dans le cadre de ce travail sera un DC/DC motivé par les raisons suivantes :

- Type de la batterie utilisé (Source continue) ;
- Sa présence dans toutes les applications automobiles.

Dans un véhicule hybride l'onduleur à deux fonctions principales :

Dans le cas d'une source continu, ils sont indispensables dans l'alimentation des moteurs de propulsion quand ceux-ci sont des moteurs à courant alternatif ;

Dans le cas d'un freinage récupératif d'une énergie alternative. Ils ont nécessaires pour transformer cette énergie en continu afin de recharger la batterie. [30]

b) Hacheur (DC/DC) :

Le convertisseur (DC/DC), ou hacheur, permet de fournir à partir d'une source de tension fixe une source de tension de valeur moyenne réglable. La tension d'entrée du convertisseur (DC/DC) est la tension de la batterie, et celle de sortie est une tension régulée. Dans le cas où la batterie fournit de l'énergie, le courant circule de la batterie vers le moteur électrique. Le hacheur joue le rôle d'un élévateur de tension. Le courant circule en sens inverse si le moteur fournit de l'énergie à la batterie, telle cas du freinage régénératif, le hacheur est dit abaisseur de tension. Le schéma de principe de base du convertisseur est représenté à la figure 12. [28]

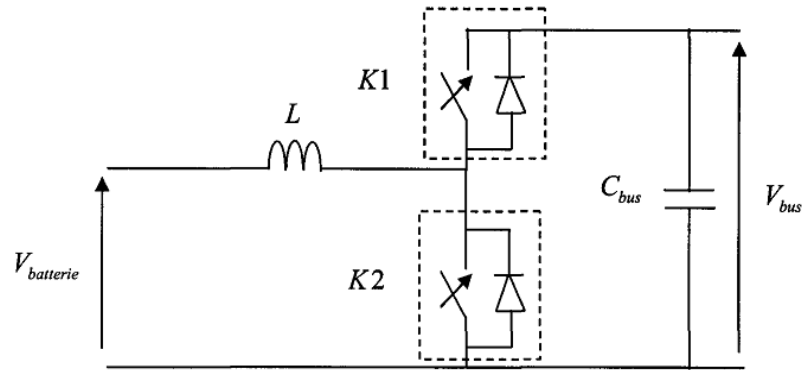


Figure 12 : Principe de fonctionnement d'un hacheur bidirectionnel. [30]

La présence d'un hacheur au niveau d'un véhicule hybride a deux usages essentiels :

- Il est nécessaire pour adapter la tension de la batterie principale a celle des auxiliaires électronique utilises (capteurs, régulateurs, etc...);
- Ca capacité de fonctionnement autant qu'un élévateur pour alimenter l'onduleur de tension et un abaisseur pour assurer la recharge de la batterie.

II.1.4. La Batterie électrique :

II.1.4.1. Définition :

Les accumulateurs électrochimiques sont des générateurs "réversibles" c'est-à-dire pouvant stocker l'énergie électrique sous forme chimique puis la restituer à tout moment sur demande grâce à la réversibilité de la transformation. De nombreux types d'accumulateurs électrochimiques existent (plomb, cadmium-nickel, lithium...), toutefois un des plus anciens et des plus couramment utilisés dans l'automobile reste l'accumulateur au plomb. [31] [32]

II.1.4.2. Fonctionnement :

La figure 13 montre la constitution interne d'un accumulateur. Tout accumulateur se compose de trois éléments : une anode, qui est le pôle négatif, une cathode, qui est le pôle positif et un électrolyte, qui est l'élément (liquide ou solide) conducteur permettant le passage du courant (circulation des porteurs de charges électriques) entre les deux pôles. [31] [32]

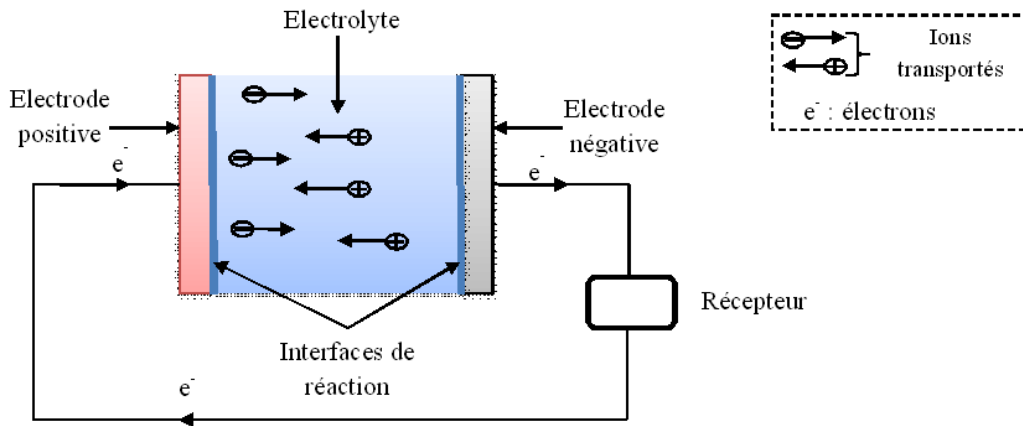


Figure13 : Principe d'un accumulateur électrochimique. [30]

Le fonctionnement de l'accumulateur repose sur une double réaction chimique à chaque pôle de l'accumulateur qui va opérer un transfert d'électrons :

- l'anode cède des électrons : cette demi-réaction est une oxydation ;
- la cathode les récupère : cette demi-réaction est une réduction.

On appelle une cellule, les deux électrodes plongées dans un électrolyte. L'association de plusieurs cellules en série forme une batterie d'accumulateur.

Durant cette réaction d'oxydo-réduction, les électrons passent d'un pôle à l'autre de l'accumulateur grâce aux ions. Un ion est un élément chimique (un atome ou une molécule) qui est électriquement chargé. S'il "manque" des électrons à un ion il est chargé positivement et vice versa. Dans l'accumulateur, c'est la réaction chimique qui produit des ions grâce aux métaux qui constituent l'anode ou la cathode et grâce aux éléments chimiques présents dans l'électrolyte.

Ainsi, le fonctionnement de l'accumulateur, qu'il soit au plomb ou encore au lithium, repose sur l'utilisation de couples de métaux capables d'échanger des électrons.

II.1.4.3. Caractéristiques des batteries :

Un accumulateur, quelle que soit la technologie utilisée, est pour l'essentiel défini par les paramètres suivants [31]:

- La densité d'énergie massique (ou énergie spécifique), en Wh/kg correspond à la quantité d'énergie stockée par unité de masse d'accumulateur ;

- La densité d'énergie volumique, en Wh/l correspond à la quantité d'énergie stockée par unité de volume d'accumulateur ;
- La densité de puissance massique, en W/kg, représente la puissance que peut délivrer l'unité de masse d'accumulateur ;
- Le nombre de cycles (un cycle correspond à une charge et une décharge), caractérise la durée de vie de l'accumulateur, c'est-à-dire le nombre de fois où il peut restituer le même niveau d'énergie après chaque nouvelle recharge ;
- La tension nominale dépend du nombre d'éléments ;
- La capacité de stockage, notée Q, représente la quantité d'énergie disponible (à ne pas confondre avec la capacité électrique) ; elle s'exprime en Ah ;
- Le courant maximal qu'elle peut fournir pendant quelques instants, ou courant de crête en ampères.

II.1.4.4 Les accumulateurs au plomb :

➤ Principales catégories :

Il existe 3 principales catégories définies par leur domaine d'application :

- La batterie de démarrage : utilisée dans les automobiles, elle est composée de plaques fines, de grande surface, et autorise des courants de décharge élevés, mais de courte durée.
- La batterie de traction : utilisée dans les chariots élévateurs, elle est formée de plaques plus épaisses et permet des décharges journalières pouvant atteindre 80% de la capacité.
- La batterie stationnaire : utilisée dans les ASI (alimentations sans interruption).

➤ Technologies :

Les accumulateurs au plomb sont divisés en deux grandes familles qui sont [33] :

- les batteries « classiques » ou ouvertes (Vented Batteries) : Ce type de batterie nécessite donc une maintenance au cours de laquelle le niveau de l'électrolyte doit être réajusté avec de l'eau désionisée pour le bon fonctionnement de l'accumulateur.
- les batteries scellées VRLA (Valve Regulated Lead-Acid) :

Ces batteries sont aussi appelées batteries sans entretien. Ici, la cellule est fermée.

L'électrolyte y est immobilisé sous forme de gel (ajout de silice à haute surface spécifique), ou encore retenu dans un séparateur en fibre de verre à haut pouvoir capillaire (AGM, Absorbent Glass Mat).



Figure 14 : Photographie d'une batterie classique. [33] **Figure 15** : Batterie VRLA. [33]

II.1.4.5 Les accumulateurs nickel-cadmium :

Les accumulateurs nickel-cadmium ont été découverts en Suède par Waldemar Jungner, qui déposa un premier brevet en 1899, qu'il étendit aux États-Unis en 1901. [33]

L'invention mettait en œuvre de l'hydroxyde de nickel à l'électrode positive, un mélange de cadmium et de fer à l'électrode négative et un électrolyte aqueux, l'hydroxyde de potassium ou potasse. Les accumulateurs nickel-cadmium comportent majoritairement des électrodes positives de type « mousse » ou frittées et des négatives plastifiées (figure 16).



Figure 16 : Vue éclatée d'une batterie nickel-cadmium Ni-Cd industrielle [34].

La tension nominale d'un élément accumulateur de ce type est de 1,2 V. Ce type d'accumulateur possède un effet mémoire, ce qui impose leur stockage dans un état déchargé (0,6 V). La fin de charge est caractérisée par une variation de la tension de charge (dv/dt) négative. C'est ce seuil qui est détecté par les chargeurs automatiques de qualité pour arrêter la charge.

Par rapport au Ni-MH, le Ni-Cd peut supporter des pointes de courant en décharge plus importantes (de l'ordre de 100 fois) mais sa décharge naturelle est plus rapide que celle du Ni-MH. En outre, le cadmium est très polluant. Ce type d'accumulateur permet un nombre de cycles charge/décharge plus important que les accumulateurs Li-ion et Ni-MH (durée de vie supérieure). Ce couple électrochimique a été l'un des plus couramment utilisés pendant plusieurs décennies pour fabriquer des batteries d'accumulateurs alimentant les appareils portatifs. Pour la plupart de ces applications il est en voie d'abandon, au profit du Ni-MH et du Li-ion. Malgré l'augmentation considérable des cours du nickel ces dernières années, son marché se maintient dans les usages industriels (applications aéronautiques, ferroviaires, stationnaires, où son utilisation reste autorisée) en raison de ses performances (notamment sa forte puissance spécifique).

➤ **Points faibles :**

- Faible densité énergétique ;
- Autodécharge assez rapide (20% / mois) ;
- Problème de l'effet mémoire ;
- Contient des substances dangereuses (6% de Cd) ce qui implique qu'il doit être collecté en fin de vie pour recyclage ;
- Coût d'achat plus élevé que la technologie au plomb.

➤ **Points forts :**

- Charge simple et rapide, même après une longue période de stockage, et notamment à froid.
- Grande durée de vie en nombre
- Conserve ses performances à basse température et ne vieillit pas prématurément à haute température.
- Résistance interne très faible.
- Stockage aisé, quel que soit son niveau de charge.

II.1.4.6. Les accumulateurs nickel-hydrure métallique :

Apparu dans les années 1980, il constitue l'aboutissement de recherches menées depuis 1970 sur des alliages susceptibles de stocker de l'hydrogène [34].

L'accumulateur Ni-MH diffère de l'accumulateur Ni-Cd au niveau de l'électrode négative dont le matériau actif est, au lieu de cadmium, de l'hydrogène absorbé dans un alliage métallique.

Un gain significatif en énergie volumique favorise le développement du système Ni-MH au détriment du système Ni-Cd, d'autant plus que l'énergie spécifique de l'électrode à base d'hydrure métallique est plus élevée que celle d'une électrode à base de cadmium.

Cependant, l'accumulateur Ni-MH est le siège d'une autodécharge comparable à celle de l'accumulateur Ni-Cd, et est par conséquent adapté aux régimes rapides en charge comme en décharge. Il en résulte, en régime permanent, une densité de puissance comparable à celle des accumulateurs au plomb ou Ni-Cd (au mieux 200 W/kg). Par contre, l'accumulateur Ni-MH est plus adapté en régime impulsif et fait donc l'objet d'une utilisation dans les véhicules hybrides.

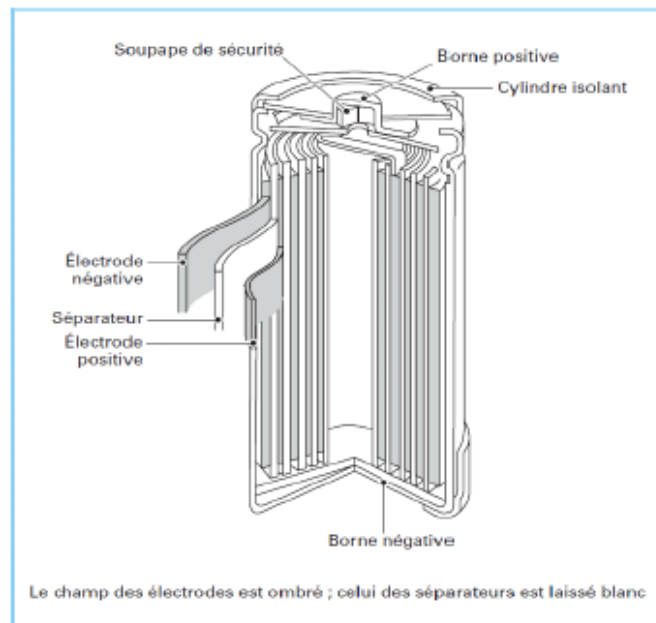


Figure 17 : Accumulateur nickel-hydrure métallique Ni-MH en géométrie cylindrique [34].

La tension nominale d'un élément accumulateur de ce type est de 1,2 V. Ce type d'accumulateur n'incorpore ni cadmium ni plomb et est donc peu polluant. De plus, son énergie massique est supérieure de 40 % à celle des Ni-Cd et son effet mémoire est très faible.

II.1.4.7. Les accumulateurs au lithium :

Au début des années 90, principalement sous l'impulsion des constructeurs japonais d'équipements portables, deux nouvelles filières de stockage de l'électricité ont émergé, en rupture par rapport aux technologies traditionnelles les accumulateurs au lithium. Les accumulateurs à base de lithium sont d'une technique récemment mise au point et encore en cours de développement, et qui présente un très important potentiel électrochimique.

Un accumulateur lithium est un accumulateur électrochimique dont la réaction électrochimique fait intervenir le lithium [34].

Au début du XXI^e siècle, cet accumulateur est celui qui offre la plus forte énergie spécifique (énergie/masse) et la plus grande densité d'énergie (énergie/volume). Par exemple, l'astromobile Opportunity possède une batterie au lithium-ion rechargeable avec ses panneaux solaires. Il a fonctionné pendant de nombreuses années malgré un froid intense à - 100°C sur la planète Mars.

Il existe plusieurs sortes d'accumulateurs au lithium :

- L'accumulateur lithium-métal, où l'électrode négative est composée de lithium métallique (matériau qui pose des problèmes de sécurité) ;
- Les accumulateurs lithium-ion, où le lithium reste à l'état ionique grâce à l'utilisation d'un composé d'insertion aussi bien à l'électrode négative (généralement en graphite) qu'à l'électrode positive (dioxyde de cobalt, manganèse, phosphate de fer) ;
- Les accumulateurs lithium-polymère sont une alternative aux accumulateurs lithium-ion ; ils délivrent un peu moins d'énergie, mais sont beaucoup plus sûrs.

Contrairement aux autres accumulateurs, les accumulateurs lithium-ion ne sont pas liés à un couple électrochimique. Tout matériau pouvant accueillir en son sein des ions lithium peut être à la base d'un accumulateur lithium-ion. Ceci explique la profusion de variantes existantes, face à la constance observée avec les autres couples. Il est donc délicat de tirer des règles générales à propos de cet accumulateur, les marchés de fort volume (électronique nomade) et de fortes énergies (automobile, aéronautique, etc) n'ayant pas les mêmes besoins en termes de durée de vie, de coût ou de puissance.

II.1.4.8. Comparaison :

Type	Energie massique en Wh/kg	Energie volumique en Wh/l	Tension d'un élément	Puissance en pointe (massique) en W/kg	Durée de vie (nombre de recharges)	Autodécharge par mois
Plomb/acide	30 - 50	75 - 120	2,25 V	700	400 - 800	5 %
Ni-Cd	45 - 80	80 - 150	1,2 V	?	1 500 - 2 000	> 20 %
Ni-MH	60 - 110	220 - 330	1,2 V	900	800 - 1 000	> 30 %
Ni-Zn	70 - 80	120 - 140	1,65 V	1 000	> 1 000	> 20 %
Na-NiCl ₂	120	180	2,6 V	200	800	→ 100 %
Pile alcaline	80 - 160		1,5 - 1,65V	?	25 à 500	< 0,3 %
Li-ion	90 - 180	220 - 400	3,6 V	1 500	500 - 1 000	2 %
Li-Po	100 - 130	?	3,7 V	250	200 - 300	2 %
Li-PO	120 - 140	190 - 220	3,2 V	800	2 000	5 %
LMP	110	110	2,6 V	320	?	?
Li-Air	1 500 - 2 500	?	3,4 V	200	?	?
Li-ti	50	75	2,4 V	?	6000	?
Ni-Li	935	?	3,49 V	?	?	?

Figure 18 : Comparaison des différents types des batteries.

La Figure 18 propose une comparaison entre les différentes technologies. L'accumulateur Li-polymère est moins performant que le Li-ion mais fabriqué différemment. Il prend moins de place que le Li-ion. Par conséquent une batterie Li-Po de même taille qu'une batterie Li-ion possède une capacité plus importante. Le tableau précédent donne l'énergie massique. Or, une batterie Li-Po est plus dense qu'une Li-ion, d'où la différence.

II.1.5. le Super condensateur :

Les supercondensateurs sont des dispositifs de stockage d'énergie capable de fournir des salves de très haute puissance avec des temps de rechargement très rapides [40]. Ils sont utilisés dans PHEBUS pour fournir suffisamment de puissance aux moteurs-roues lors des phases d'accélération et pour récupérer l'énergie cinétique lors du freinage du véhicule pour la stocker. Il ne peut pas stocker autant d'énergie par unité de masse qu'une batterie mais il la délivre beaucoup plus vite. On parle ainsi improprement de source de puissance.

II.1.5.1. principe de fonctionnement :

L'expression de la capacité C d'un condensateur dont les armatures en regard sont planes (figure 19) est classiquement donnée par :

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \cdot \frac{S}{d} \dots \dots \dots (II.1). [40]$$

Avec ϵ_0 la permittivité du vide, ϵ_r la permittivité relative du diélectrique, S la surface de chaque électrode et d l'épaisseur du diélectrique.

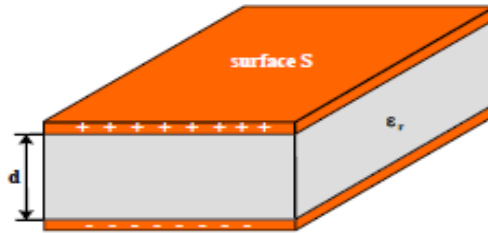


Figure 19 : condensateur plan. [40]

L'énergie emmagasinée, proportionnelle au carré de la différence de potentiel V entre les électrodes, s'exprime par :

$$E = \frac{1}{2} \cdot C \cdot V^2 \dots \dots \dots (II.2). [40]$$

La capacité C étant constante. Les relations (II.1) et (II.2) montrent qu'il existe deux approches permettant d'accroître la capacité d'un tel dispositif, et par là-même la quantité d'énergie stockée :

- la première porte sur l'utilisation de diélectriques possédant une permittivité relative élevée et une tension de service importante.
- la seconde, à l'origine du développement des supercondensateurs, est basée sur l'accroissement du rapport S/d par le recours à des diélectriques très minces et à des armatures gravées présentant d'importantes surfaces [41]

Dans les condensateurs ordinaires ; les électrons sont déplacée d'une électrode et déposés sur l'autre, et la charge est séparée par un diélectrique solide entre les électrodes.

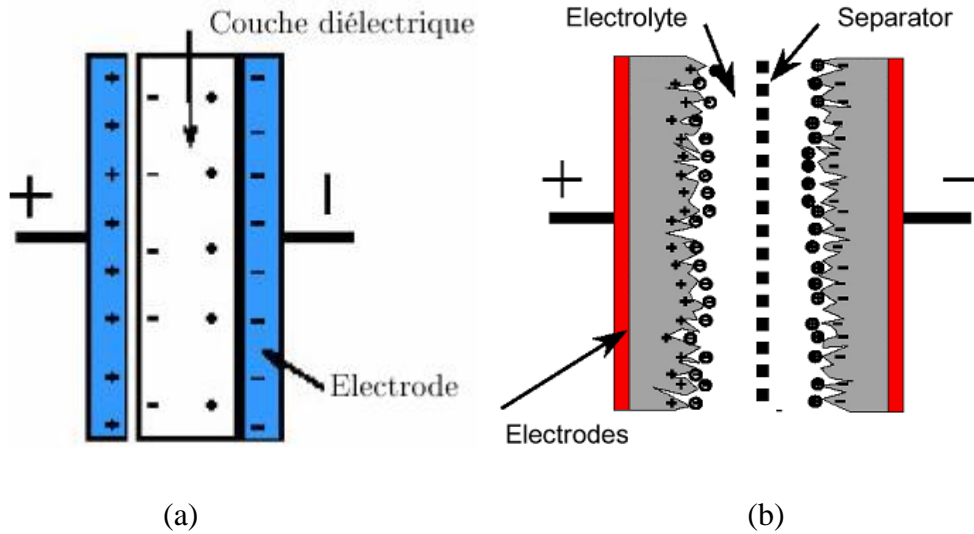


Figure 20 : (a) : Condensateur, (b) : Super condensateur [39]

En effet, le principe de base des supercondensateurs repose sur les propriétés capacitives de l'interface entre conducteur électronique solide et conducteur ionique liquide, propriétés découvertes par le physicien Hermann von Helmholtz en 1853 [42]. Le stockage d'énergie s'effectue par distribution des ions de l'électrolyte, au voisinage de la surface de chaque électrode, sous l'influence électrostatique de la tension appliquée. Il se crée ainsi aux interfaces une zone de charge d'espace appelée couche double électrique, d'épaisseur limitée à quelques nanomètres. Quant à la fonction diélectrique, elle est assurée par les molécules du solvant de l'électrolyte. [43]

II.1.6. La pile à combustibles :

Une PAC est un convertisseur d'énergie chimique en énergie électrique et thermique. La réaction mise en œuvre est une réaction électrochimique entre l'hydrogène H₂ (carburant) et l'oxygène O₂ (comburant) avec production simultanée d'eau, d'électricité et de chaleur selon la réaction globale de synthèse de l'eau :

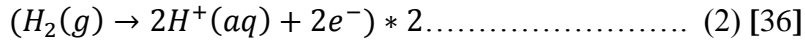


La PAC est composée de deux électrodes la cathode et l'anode séparée par un électrolyte, l'arrivée des molécules de l'hydrogène à l'anode va produire une réaction chimique que chaque atome de molécule va perdre un électron grâce à un catalyseur en platine, les électrons vont remonter et poursuivre le circuit par la cathode, donc ils vont créer un courant électrique ; lors

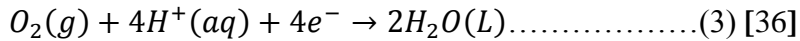
de la descente des électrons à la cathode, les ions d'hydrogène vont rencontrer leur électrons et se recombinent avec l'oxygène et comme résultat l'eau.

On a deux équations :

➤ L'oxydation de l'hydrogène à l'anode :



➤ La réduction de l'oxygène à la cathode :



➤ L'équation résultant ((2)+(3)), nous donne :

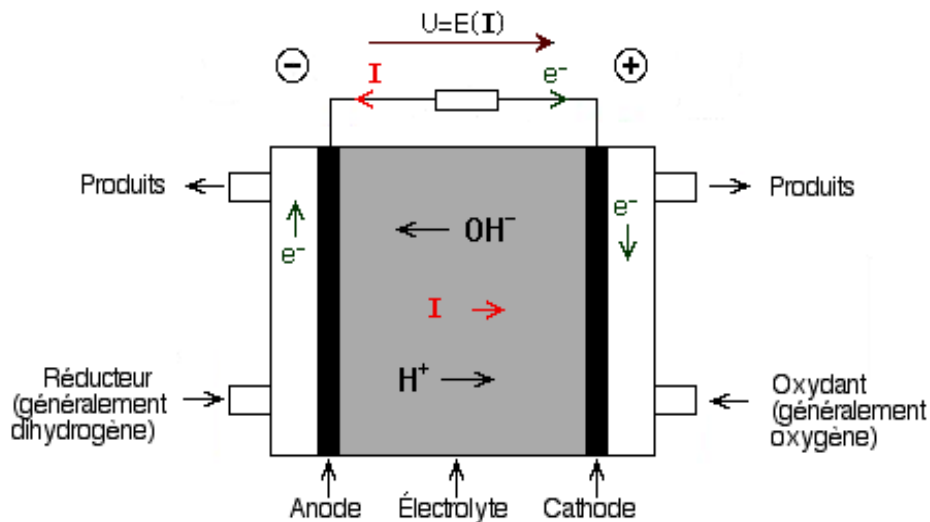
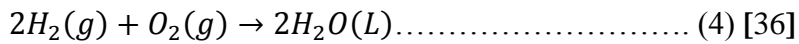


Figure 21 : fonctionnement d'une pile à combustible. [35]

II.1.6.1. Différents types des piles à combustibles :

On a six différentes piles à combustibles présentée sous la figure ci-dessus, chaque pile à un électrolyte différent qui a une température de fonctionnement.

Types de pile à combustible	Ion	T° (°C)	Applications typiques
Pile à combustible alcaline (Alkaline Fuel Cell)	OH ⁻	50 200	Apollo, navette spatiale
Pile à combustible à membrane (Proton Exchange Membrane Fuel Cell)	H ⁺	30 100	Véhicule, stationnaire
Piles à combustible au méthanol direct (Direct Methanol Fuel Cell)	H ⁺	20 90	Portable
Pile à combustible à acide phosphorique (Phosphoric Acid Fuel Cell)	H ⁺	220	Stationnaire
Pile à combustible à carbonate fondu (Molten Carbonate Fuel Cell)	CO ₃ ²⁻	650	Stationnaire
Pile à combustible à oxyde solide (Solid Oxide Fuel Cell)	O ²⁻	500 1000	Stationnaire, système auxiliaire de puissance (Auxiliary Power Unit)

Figure 22 : Les différents types de pile à combustible (ion traversant l'électrolyte, température de fonctionnement et applications typiques). [37]

II.1.6.2. Architecteur d'une PAC :

➤ **Structure d'une PAC** : [38]

La réaction électrochimique a lieu au sein d'une cellule élémentaire. Une cellule élémentaire consiste en un assemblage Electrode-Membrane-Electrode (EME) pressé entre deux plaques bipolaires.

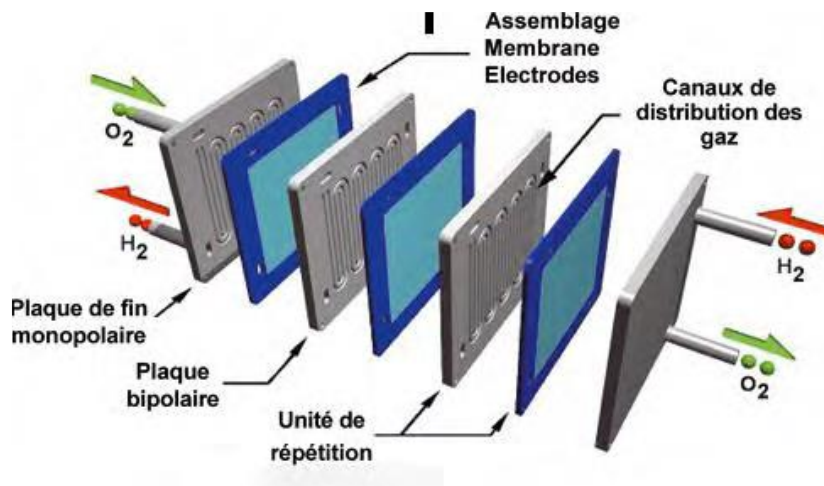


Figure 23 : Vue d'ensemble du stack PAC. [38]

La membrane constitue le cœur de la cellule élémentaire. La membrane est un électrolyte qui est perméable aux protons d'hydrogène H^+ et imperméable aux gaz. Un assemblage EME comporte, outre la membrane, deux électrodes : l'anode et la cathode.

Elles sont exposées à un flux de gaz qui leur fournit l'apport en réducteur et en oxydant, l'hydrogène et l'oxygène.

La tension obtenue avec une cellule élémentaire est inférieure à 1 volt, ce qui est insuffisant pour la majorité des applications. Pour disposer d'une source de tension suffisamment élevée, plusieurs cellules sont assemblées en série pour former le cœur de la pile, appelé stack PAC.

➤ **système PAC : [36]**

Un système à PAC, ou module de puissance est un système réalisant de façon autonome la conversion de l'énergie de combustion d'un carburant en énergie électrique directement utilisable. Pour cela, la pile est accompagnée d'équipements auxiliaires pour que sa fonction principale, la fourniture d'énergie électrique, puisse être remplie. Ces composants assurent l'approvisionnement des réactifs, leur conditionnement, l'évacuation des produits, de la chaleur, la conduction et la transformation de l'électricité au profit des équipements consommateurs électriques (moteur électrique, auxiliaires divers...).

Enfin, pour les applications transport, la chaîne de traction électrique est constituée de l'ensemble des systèmes intervenant dans la conversion d'énergie, depuis la sortie du réservoir de carburant jusqu'aux roues. Le groupe électrogène à pile à combustible est l'un des éléments principaux de cette chaîne de traction, où l'on peut distinguer deux autres composants majeurs : le groupe motopropulseur et l'éventuel stockage secondaire d'énergie. Le premier réalise la conversion d'énergie électrique en énergie mécanique, et le second est un stockage tampon d'énergie électrique (par exemple une batterie ou une super capacité).

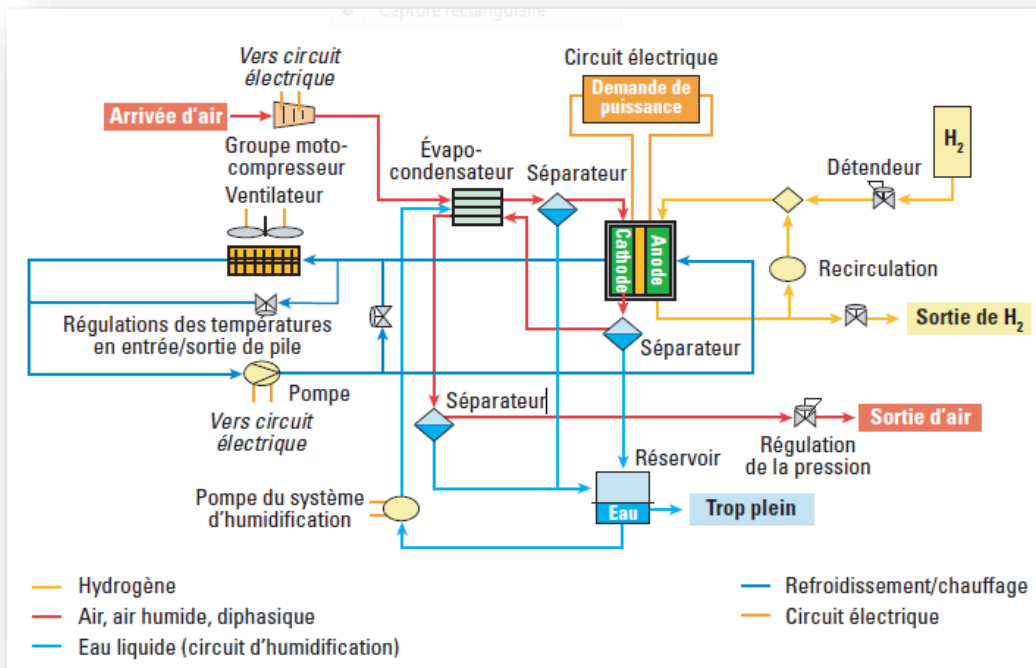


Figure 24 : système PAC pour le transport automobile. [39]

II.2. Le sous-système mécanique :

Le système mécanique est composé du moteur à combustion interne (MCI), d'une boîte de vitesses, et d'un différentiel. Les différents éléments sont présentés ci-dessus, on va représenter tous d'abord le schéma principe du système mécanique. [30]

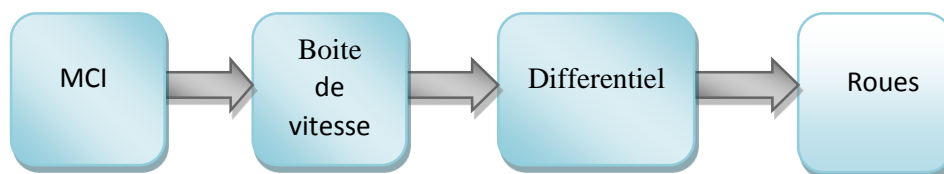


Figure 25 : Schéma de principe du système thermique.

II.2.1. Le Moteur thermique :

Le moteur thermique convertit de manière unidirectionnelle une énergie chimique en une énergie mécanique. L'énergie chimique provient d'un réservoir rempli généralement par du gasoil ou de l'essence. L'énergie mécanique résultant de la conversion, entraîne des roues. Deux types de moteur thermique à combustion interne peuvent être utilisés : le moteur deux

temps et le moteur quatre temps. Sans rentrer dans les détails, nous pouvons dire que le moteur deux temps a été abandonné au profit du quatre temps en raison d'une consommation élevée et d'une grande émission en vue de l'échappement. Le critère dimensionnant pour le moteur thermique est le maintien de la vitesse de Croisière demandée. [30]

II.2.2. Boîte de vitesse :

Dans les véhicules hybrides la chaîne silencieuse plus le réducteur est considérée comme une boîte de vitesse. La boîte de vitesse a comme fonction de multiplier le couple du moteur par la démultiplication des vitesses, et cela est nécessaire pour maintenir le moteur a une vitesse de rotation la plus constante possible afin de conserver un couple satisfaisant. Pour conserver une puissance constante à la transmission, si la vitesse des roues diminue, le couple appliqué à l'arbre des roues doit augmenter dans les mêmes proportions. Pour conserver une puissance constante à la transmission, si la vitesse des roues (ω_r) diminue, le couple (C_r) appliqué à l'arbre des roues doit augmenter dans les mêmes proportions. Le schéma principe est représenté sur la figure 26. [30]



Figure 26 : Boîte de vitesse.

II.2.3. Différentiel :

Le second élément mécanique pour transmettre le couple aux roues est le différentiel. Cet élément relie l'arbre de transmission aux roues, permettant à chacune des roues de tourner à une vitesse différente l'une par rapport à l'autre. En ligne droite, les roues tournent à la même vitesse. Cependant dans un virage, afin d'éviter qu'une roue glisse sur le sol et les efforts de torsion sur les arbres, un dispositif différentiel est nécessaire figure 27. [30]

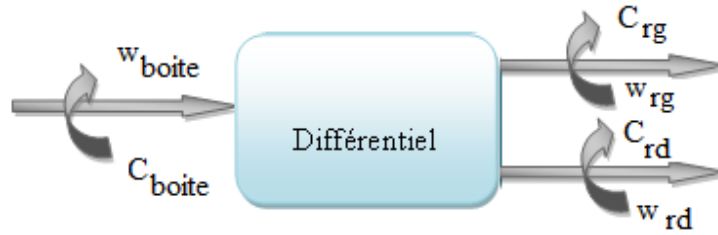


Figure 27 : Différentiel.

III. Conclusion :

Ce chapitre a résumé les différents organes d'un véhicule hybride dans une organisation parallèle à simple arbre. Ce système est composé d'une partie commande, d'une partie mécanique et enfin d'une partie électrique. Le chapitre suivant sera dédié à la modélisation sous forme de bloc SIMULINK les différents organes du véhicule hybride à simple arbre.

Chapitre 3

***Modélisation des différents
organes d'un véhicule
hybride.***

Introduction :

On s'intéressera dans ce chapitre à la modélisation des différents éléments que constitue le véhicule électrique, en commençant par la machine synchrone à aimant permanent avec l'utilisation de la transformation de Park, ensuite on passe aux convertisseurs (l'onduleur et le hacheur), après on termine par la modélisation des sources d'énergies .

I. Modélisation de la machine synchrone en vue de sa commande :

La mise sous forme d'un modèle mathématique d'une MSAP est nécessaire pour l'étude de sa commande dans les différents régimes de fonctionnements transitoire et permanent. [44]

Le type de machine électrique (moteur et générateur) retenue est un moteur synchrone à aimants permanents (aimants montés en surface) [27].

Avant d'établir le modèle mathématique nous devons imposer quelques hypothèses [45] [46] [47] :

- L'entrefer est d'épaisseur uniforme, et d'encoche négligeable.
- La saturation du circuit magnétique, l'hystérésis et les courants de Foucault sont négligeables ;
- Les résistances des enroulements ne varient pas avec la température et l'effet de peau est négligeable ;
- Le moteur possède une armature symétrique non saturée, les inductances propre et mutuelle sont indépendantes des courants qui circulent dans les différents enroulements ;
- La distribution des forces électromotrices, le long de l'entrefer, est supposée sinusoïdale ;
- Les pertes fer et l'effet amortisseur sont négligés ;
- La perméabilité des aimants est considérée comme voisine de celle de l'air.

I.1. Mis en équation électrique de la MSAP en triphasé (modèle en abc) :

La Figure 28 donne la représentation des enroulements pour une machine synchrone triphasée à aimants permanents.

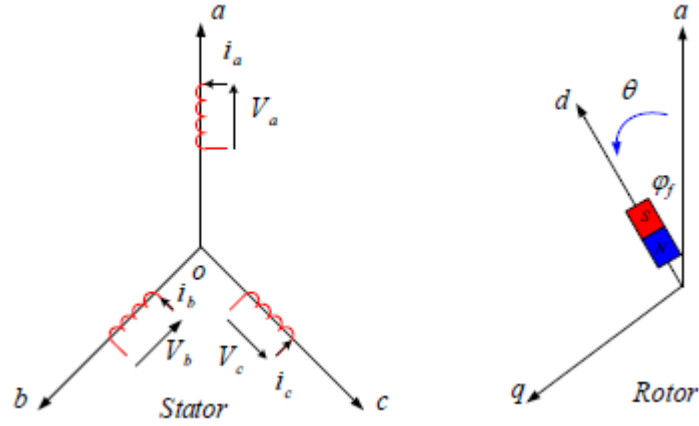


Figure 28 : Schéma de la MSAP dans le repère abc. [48]

A partir de la figure 28, nous écrivons les équations suivantes :

a) Equations électriques :

$$[V_s] = [R_s][I_s] + \frac{d}{dt} [\varphi_s] \quad (\text{III.1})$$

$$[\varphi_s] = [L_{ss}][I_s] + [\varphi_f] \quad (\text{III.2})$$

$$[\varphi_f] = \varphi_{sf} \begin{bmatrix} \cos(\theta) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (\text{III.3})$$

Avec :

$[V_s] = [V_a \ V_b \ V_c]'$: vecteur tension statorique ;

$[\varphi_s] = [\varphi_a \ \varphi_b \ \varphi_c]'$: vecteur flux statorique ;

φ_{sf} : Valeur crête (constante) du flux crée par les aimants à travers l'enroulement statorique ;

$[I_s] = [I_a \ I_b \ I_c]'$: vecteur courant statorique.

$$[R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \quad \text{: Matrice résistance de stator.}$$

b) Equation mécanique

Les équations mécanique de la machine est donnée par :

$$\frac{d}{dt} \Omega = \frac{1}{J} (C_e - f \Omega - C_r) \quad (\text{III.4})$$

$$\frac{d\theta}{dt} = \Omega \quad (\text{III.5})$$

c) Moment du couple électromagnétique

L'équation du couple électromagnétique de la machine est donnée par :

$$C_e = p \left((L_d - L_q) i_d i_q + \varphi_f i_q \right) \quad (III.6)$$

d) La puissance absorbée :

La puissance absorbée par la machine synchrone à aimants permanents est donnée par l'équation suivant :

$$P_a = 2\pi \cdot n_s \cdot C_e \quad (III.7)$$

P_a : La puissance absorbée par le moteur en (Watt)

n_s : LA vitesse du champ tournant en (tr/min)

L'étude analytique du comportement des équations III.1 et III.2 de la machine synchrone est relativement laborieuse, vu le grand nombre de coefficients variables. On utilise alors des transformations mathématiques qui permettent de décrire le comportement du moteur à l'aide des équations différentielles à coefficients constants. L'une de ces transformations est la transformation de Park [44].

I .2. Modélisation de la MSAP dans le repère de Park :

I .2.1. Transformation de Park : [49]

Le modèle diphasé de la MSAP s'effectue par une transformation du repère triphasé réel en un repère diphasé fictive, qui n'est en fait qu'un changement de base sur les grandeurs physiques (tensions, flux et courants), il conduit à des relations indépendantes de l'angle θ et à la réduction d'ordre des équations de la machine. La transformation la plus connue par les électrotechniciens est celle de Park.

Le repère (d, q) peut être fixé au stator, au rotor ou au champ tournant. Selon l'objectif de l'application.

La Figure 23 présente la MSAP en modèle de Park. Le repère (oa) est fixe. Le repère (d, q) tourne avec la vitesse de synchronisme ω .

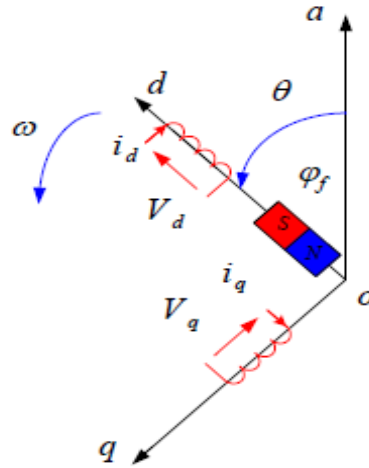


Figure 29 : Schéma équivalent de la MSAP dans le repère (d, q). [48]

La matrice de Park écrite sous cette forme est orthogonale, ce qui conduit à l'égalité des valeurs efficaces des grandeurs physiques dans les deux repères. De ce fait, la conservation de la puissance pour ce changement de repère est vérifiée. L'orthogonalité nous permet d'écrire :

$$P^{-1} = P^t$$

a) Passage direct : triphasé au diphasé : [48] [30]

L'équation qui traduit le passage du système triphasé au système biphasé (d, q) est donnée par :

$$[X_{dq0}] = P(\theta) \cdot [X_{abc}]^T \quad (\text{III.8})$$

Avec :

$P(\theta)$: La matrice de passage direct de Park

X : représente les variables considérées de la machine qui sont des variables de tensions, courant ou de flux.

$$[P(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{III.9})$$

$$\begin{cases} [V_{dq0}] = P(\theta) \cdot [V_{abc}]^T \\ [I_{dq0}] = P(\theta) \cdot [I_{abc}]^T \\ [\varphi_{dq0}] = P(\theta) \cdot [\varphi_{abc}]^T \end{cases} \quad (\text{III.10})$$

b) Passage inverse : diphasé au triphasé : [30]

La transformée de Park inverse est nécessaire pour revenir aux grandeurs triphasées, elle est définie par :

$$[X_{abc}] = [P(\theta)]^{-1} \cdot [X_{dq0}] \quad (\text{III.11})$$

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

Avec :

$[P(\theta)]^{-1}$: La matrice de passage inverse de Park.

$[P(\theta)]$ Étant la matrice de la transformation de Park qui permet le passage des grandeurs statoriques $[V_s]$, $[\varphi_s]$ et $[I_s]$ à leurs composantes relatives $[V_{dq}]$ et $[I_{dq}]$.

I .3. Mise en équation de la MSAP en diphasé (modèle vectorielle) :

a) Equations électriques

$$\begin{cases} v_d = R_d i_d + \frac{d}{dt} \varphi_d - \omega \varphi_q \\ v_q = R_q i_q + \frac{d}{dt} \varphi_q + \omega \varphi_d \end{cases} \quad (\text{III.13})$$

Sachant que les flux :

$$\begin{cases} \varphi_d = L_d i_d + \varphi_f \\ \varphi_q = L_q i_q \end{cases} \quad (\text{III.14})$$

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} i_d = \frac{1}{L_d} (V_d - R i_d + L_q \omega i_q) \\ \frac{d}{dt} i_q = \frac{1}{L_q} (V_q - R i_q - L_d \omega i_d - \varphi_f \omega) \end{cases} \quad (\text{III.15})$$

Avec :

V_d : Tension statorique sur l'axe d ;

V_q : Tension statorique sur l'axe q ;

ω : Pulsation électrique.

II. Modélisation des convertisseurs :

La machine synchrone à aimant permanent est une machine alternatif, et comme nos sources d'alimentation (la batterie, pile à combustible, supercondensateur) ; délivrent une tension continu. Donc on doit ajouter un onduleur (DC/AC), ce dernier permet l'alimentation de la machine en alternatif à fréquence variable.

II. 1. Modélisation de l'onduleur :

Un onduleur est un convertisseur continu/alternatif, permet l'obtention d'une source alternatif (soit la fréquence et l'amplitude de tension de sortie sont variables ou sont fixes) ; selon le besoin et le type de système par exemple dans les systèmes ASI (alimentation sans interruption), ils servent généralement à l'alimentation de secours, alors ici la fréquence et l'amplitude de la tension de sortie de l'onduleur sont fixes.

Ils existent plusieurs types de l'onduleur

- Selon la source :
 - Onduleurs de tensions
 - Onduleurs de courants
- Selon le nombre de phase

II. 1.1. Onduleur de tension :

Les onduleurs de tension alimentent les machines à courant alternatif à partir d'une source de tension continue. Ils permettent d'imposer aux bornes de la machine des tensions d'amplitude et de fréquence réglable par la commande. [51]

L'onduleur de tension alimente la MSAP peut être idéalement représenté selon la figure 30, où K_i et K_i' sont des transistors IGBT, S_i et S_i' sont les commandes logiques qui leur sont associées telle que :

- si $S_i = 1$, l'interrupteur K_i est passant et K_i' est ouvert,
- si $S_i' = 0$, l'interrupteur K_i est ouvert et K_i' est passant. [30]

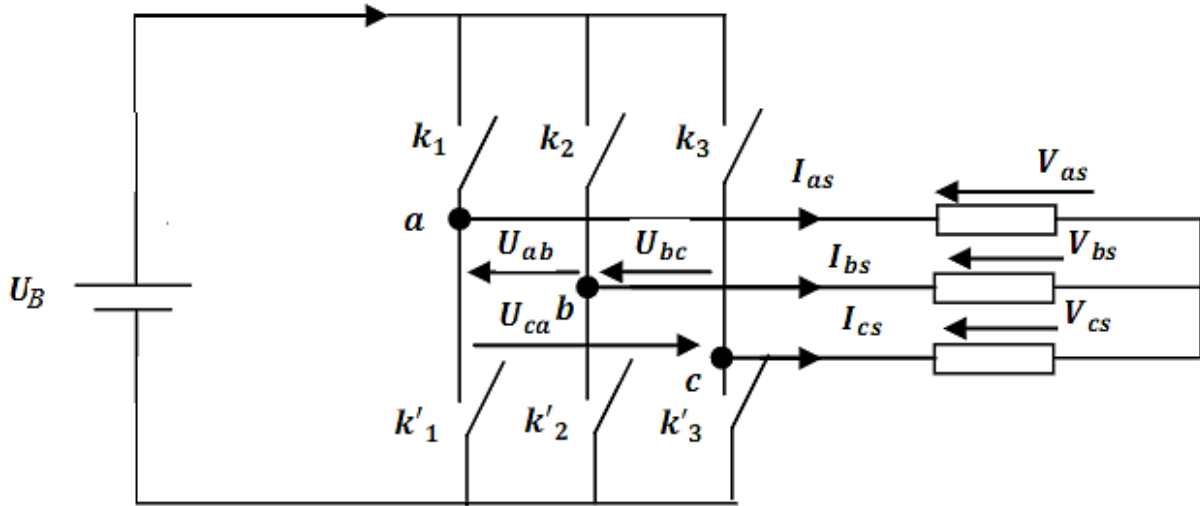


Figure 30 : Schéma d'un onduleur de tension. [30]

L'onduleur de tension comporte trois bras de commutation et six interrupteurs électroniques pouvant être des transistors de types bipolaires, MOSFET ou IGBT associés à des diodes en tête bêche, [52].

Chaque bras de l'onduleur peut être présenté par un interrupteur à deux positions comme l'indique la figure 30, La machine synchrone est connectée en étoile, V_{bus} est la tension continue alimentant l'onduleur de tension. [30]

Les tensions de ligne délivrées par l'onduleur sont :

$$\begin{cases} U_{ab} = V_{as} - V_{bs} = U_B \cdot (S_a - S_b) \\ U_{bc} = V_{bs} - V_{cs} = U_B \cdot (S_b - S_c) \\ U_{ac} = V_{cs} - V_{as} = U_B \cdot (S_c - S_a) \end{cases} \quad (\text{III.16})$$

Les tensions $V_{as} V_{bs} V_{cs}$ forment un système de tension triphasée équilibrée alors :

On trouve

$$\begin{cases} V_{as} = \frac{V_{bus}}{3} \cdot (2S_a - S_b - S_c) \\ V_{bs} = \frac{V_{bus}}{3} \cdot (2S_b - S_a - S_c) \\ V_{cs} = \frac{V_{bus}}{3} \cdot (2S_c - S_b - S_b) \end{cases} \quad (\text{III.17})$$

$$\begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} U_B \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (\text{III.18})$$

Le moteur électrique est aussi prévu pour fonctionner en générateur lors du freinage pour récupérer l'énergie, il fait office de groupe électrogène en transformant l'énergie issue de la combustion en énergie électrique. [30]

II. 2. Modélisation du hacheur :

Afin de transmettre l'énergie électrique de la batterie ou des piles à combustibles au moteur électrique, il est nécessaire de convertir la tension pour alimenter le moteur, donc on aura besoin d'un hacheur survolteur.

Lors de freinage ou la décélération ; l'énergie électrique est récupéré, ce qui nécessite la convertir et l'abaisser via un hacheur dévolteur, afin de la faire stocker dans la batterie.

Donc on va utiliser deux convertisseurs :

- Hacheur de type survolteur (élévateur)
- Hacheur dévolteur (abaisseur)

II. 2.1. Hacheur élévateur :

La figure III.4, montre une source continue, reliée en série avec une inductance L et un transistor Q (interrupteur commandé), la diode D étant le lien qui sépare la source de la charge R, qui est en parallèle avec un condensateur C.

Le transistor Q étant fermé, la diode D est bloquer, donc l'énergie électrique est stocké dans l'inductance L, puis lorsque la diode D est fermé, le transistor Q est bloqué, ce qui va causer la décharge de l'inductance via le condensateur C et la charge R à travers la diode D.

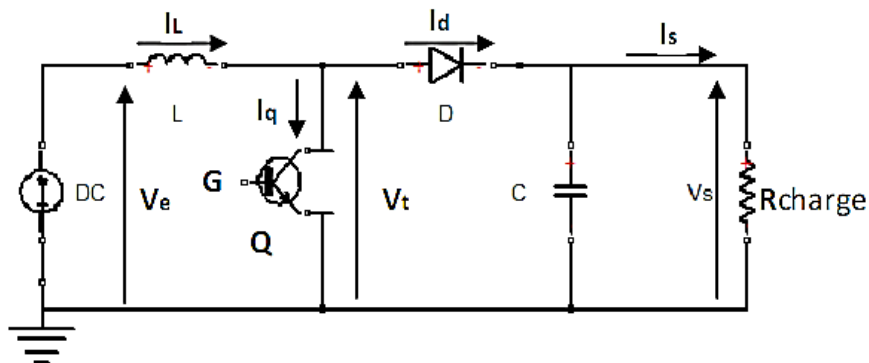


Figure 31 : Schéma de principe d'un convertisseur DC/DC élévateur. [30]

La tension de sortie V_{bus} est quasiment continue, Sa valeur dépend de $V_e = V_{bat} = V_p$, tout dépend de la tension d'entrée (pile à combustible V_p ; ou la batterie V_{bat}) ; et du rapport cyclique α :

$$\alpha = \frac{T_{on}}{T_{on} + T_{off}}$$

$$V_s = \frac{V_e}{1-\alpha}$$

Avec $0 < \alpha < 1$, le montage est bien élévateur de tension.

- **Mode de fonctionnement**

Nous fixons les hypothèses suivantes :

Les interrupteurs sont idéaux, le condensateur de filtrage est purement capacitif et l'inductance est purement inductive :

- Pour calculer le courant à l'entrée, on considère que la tension à l'entrée est constante (200v) dans un petit intervalle de temps et on néglige l'ondulation de la tension à la sortie vis-à-vis de la valeur moyenne ;
- Pour calculer la tension à la sortie, on considère que le courant à la sortie est constant dans un petit intervalle de temps et on néglige l'ondulation du courant à l'entrée vis-à-vis de la valeur moyenne. [30]

Pour que le convertisseur fonctionne en mode élévateur on commande la gâchette G, en effet :

Pour $0 \leq t \leq \alpha T$

$$V_e(t) = L \frac{di_s(t)}{dt} \quad (\text{III.19})$$

$$i_e(t) = \frac{V_e}{l} t + i_e(t = 0) \quad (\text{III.20})$$

A $t = \alpha T$, on a

$$i_e(\alpha T) = \frac{V_e}{l} \alpha T - i_e(t = 0) = \frac{V_e}{l} \alpha \quad (\text{III.21})$$

$$i_s = -c \frac{dV_e(t)}{dt} \quad (\text{III.22})$$

$$V_s(t) = -\frac{i_s}{c} t + V_s(t = 0) \quad (\text{III.23})$$

A $t = \alpha T$; on a :

$$V_s(\alpha T) = -\frac{i_s}{c} \alpha T + V_s(t = 0) \quad (\text{III.24})$$

Pour $\alpha T \leq t \leq T$

$$V_e - V_s = L \frac{di_e(t)}{dt} \quad (\text{III.25})$$

$$i_e(t) = \frac{V_e - V_s}{L} (t - \alpha T) + i_e(\alpha T) \quad (\text{III.26})$$

$$\text{En } t=T \quad i_e(T) = \frac{V_e - V_s}{L} (T - \alpha T) + i_e(\alpha T) \quad (\text{III.27})$$

$$I_e - i_s = c \frac{dv_s}{dt} \quad (\text{III.28})$$

$$v_s(t) = \frac{I_e - i_s}{c} (t - \alpha T) + v_s(\alpha T) \quad (\text{III.29})$$

La tension V_s peut être asservie à la valeur souhaitée grâce à une tension de référence V_{ref} souhaitée et par une boucle de retour PWM (pulse with modulation) ou PFM (pulse frequency modulation) qui contrôle justement ce rapport cyclique. En PWM, la largeur de l'impulsion est modulée, à fréquence constante. [30]

$$V_e = (1 - \alpha)V_s \quad (\text{III.30})$$

De cette expression, on peut bien constater que la tension de sortie V_s est toujours supérieure de la tension d'entrée V_e quel que soit la valeur de rapport cyclique α .

II .2.2. Hacheur abaisseur :

Appelée aussi hacheur série, qui comprend un interrupteur commandé et une diode de roue libre, il permet le transfert d'énergie de l'entrée vers la sortie.

Quand l'interrupteur est fermée de $t=0$ à $t= \alpha T$, l'entrée est directement reliée à la sortie, de $t=\alpha T$ à $t=T$, l'interrupteur est bloqué, la diode de roue libre est fermée, elle assure la continuité de courant de l'inductance vers la sortie.

Pour $0 \leq t \leq \alpha T$

$$V_s - V_e = u_l = l \frac{di_L}{dt} \quad (\text{III.31})$$

D'où

$$i_L(t) = \frac{V_s - V_e}{l} t \quad (\text{III.32})$$

La pente de la courbe dépendra de V_s ; V_e et de L

Pour $\alpha T \leq t \leq T$

$$V_{bat} = U_L = l \frac{di_L}{dt} \alpha T \quad (\text{III.33})$$

D'où

$$i_L(t) = \frac{V_{bat}}{L} t \quad (III.34)$$

III. Batterie électrique : [30]

La tension en charge est déduite directement à partir de la tension à vide et de la chute de tension due à la résistance interne série :

$$V_{bat} = E_0 - R_b I_b \quad (III.35)$$

L'état de charge SOC (State Of Charge) est estimé par intégration du courant :

$$C_{batt}(t) = C_{batt}(0) - \int_0^t \eta \left(SOC(t), sign(I_{batt}(t)) \right) \cdot I_{batt}(t) \cdot dt \quad (III.36)$$

$$SOC(t) = \frac{C_{batt}(t)}{C_{batt}(0)} \cdot 100 \quad (III.37)$$

Par convention, un courant de batterie positive contribue à la décharge de celle-ci, et un courant négatif contribue à sa recharge.

Le model pendant la décharge ($i^* > 0$) :

$$f_1(i_t, i^*, i) = E_0 - K \cdot \frac{Q}{Q - i_t} \cdot i^* - K \cdot \frac{Q}{Q - i_t} \cdot i \cdot t - A \cdot e^{(-B \cdot i \cdot t)} \quad (III.38)$$

Le model pendant la recharge ($i^* < 0$) :

$$f_2(i_t, i^*, i) = E_0 - K \cdot \frac{Q}{i_t + 0.1 Q} \cdot i^* - K \cdot \frac{Q}{Q - i_t} \cdot i \cdot t - A \cdot e^{(-B \cdot i \cdot t)} \quad (III.39)$$

La capacité de la batterie à l'instant t est donnée par l'équation III.40 :

$$C_b(t) = C_b(0) - \int_0^t \eta_b \cdot I_b \cdot dt \quad (III.40)$$

Le schéma représentant la batterie utiliser pour la simulation est donnée dans la figure 26

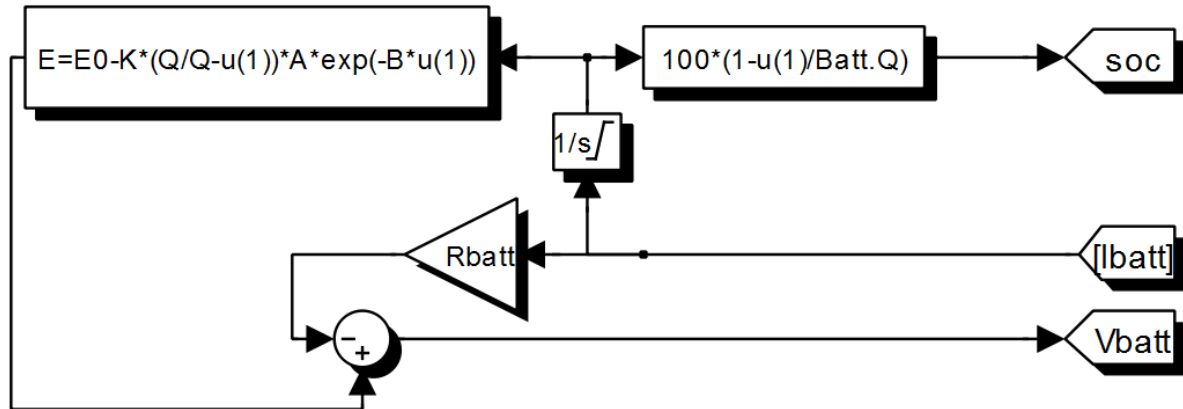


Figure 32 : modèle de la batterie.

IV. La pile à combustible : [53] [54]

Les modèles mathématiques offrent un outil notable et indispensable pour approuver la conception et la performance des piles à combustible. Deux approches principales de modélisation se présentent dans la littérature. La première approche inclut les modèles structuraux, qui visent à simuler le transfert de chaleur, le transport de masse et les phénomènes électrochimiques produits dans les piles à combustible. La deuxième, cherche à prédire le comportement de la pile en fonction de ses conditions de fonctionnement, et de celles de la charge. La modélisation en statique est basée sur l'expression de la tension en fonction du courant débité partant de la tension idéale issue de l'équation de Nernst où apparaissent les conditions de fonctionnement en température, pression et composition du gaz.

IV. 1. Caractéristique électrique de la pile à combustible :

Le potentiel thermodynamique théorique de la pile à combustible PEMFC H_2/O_2 à $25^\circ C$ et à 1atm est de l'ordre de 1,23 V, mais le potentiel réel (E_{PAC}) de la cellule décroît par rapport au potentiel thermodynamique d'équilibre quand le courant débite, cette déviation à la valeur du potentiel de Nernst, est due aux pertes irréversibles appelées polarisations V (surtensions), par conséquent, l'expression de la tension d'une cellule s'exprime comme suit :

$$U_{pac} = E_{Nernst} - V_{act} - V_{ohm} - V_{conc} \quad (III.44)$$

V_{act} : Polarisation d'activation.

V_{ohm} : Polarisation ohmique.

V_{conc} : Polarisation de concentration.

$$E_{\text{Nernst}} = 1.229 - 0.85 \times 10^{-3} \times (T - 298.15) + 4.31 \times 10^{-5} \times [\ln(P_{\text{H}_2}^*) + \frac{1}{2} \ln(P_{\text{O}_2}^*)] \quad (\text{III.42})$$

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

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

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

a) 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 :

$$V_{\text{act}} = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 \times T + \varepsilon_3 \times T \times \ln(C_{\text{O}_2}^*) + \varepsilon_4 \times T \times \ln(I_{\text{PAC}}) \quad (\text{III.45})$$

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,

$$C_{\text{O}_2}^* = \frac{P_{\text{O}_2}^*}{\left(5.08 \times 10^6 \times e^{-\left(\frac{498}{T}\right)}\right)} \quad (\text{III.46})$$

C_{O₂}^{*} : 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. [N12]

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

$$P_{\text{O}_2}^* = P_{\text{cath}} \times \left(1 - \chi_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{Sat}}\right) \quad (\text{III.47})$$

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

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

$$P_{\text{O}_2}^* = P_{\text{cath}} \times \left(\frac{1}{2}\right) \quad (\text{III.48})$$

A l'anode, on utilise de l'hydrogène pur, qui ne contient pas du monoxyde de carbone [N12],

$$P_{\text{H}_2}^* = P_{\text{anode}} \times \left(1 - \frac{1}{2} \cdot \chi_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{Sat}}\right) \quad (\text{III.49})$$

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

$$P_{\text{H}_2}^* = P_{\text{anode}} \times \left(\frac{3}{4}\right) \quad (\text{III.50})$$

b) 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 :

$$V_{\text{ohm}} = I_{\text{PAC}} \times (R_{\text{M}} + R_{\text{C}}) \quad (\text{III.51})$$

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 :

$$R_{\text{M}} = \frac{l \times r_{\text{M}}}{A} \quad (\text{III.52})$$

Où l est l'épaisseur de la membrane (μm), r_{M} est la résistance spécifique de la membrane, obtenue par la relation suivante :

$$r_{\text{M}} = \frac{181.6 \times \left[1 + 0.03 \times \left(\frac{I_{\text{PAC}}}{A}\right) + 0.062 \times \left(\frac{T}{303}\right)^2 \times \left(\frac{I_{\text{PAC}}}{A}\right)^{2.5} \right]}{\left[\delta_{\text{H}_2\text{O}} / \text{SO}_3^- - 0.634 - 3 \times \left(\frac{I_{\text{PAC}}}{A}\right) \right] \times \exp\left[4.18 \times \left(\frac{T-303}{T}\right) \right]} \quad (\text{III.53})$$

Le terme $\frac{181.6}{(\delta_{\text{H}_2\text{O}} / \text{SO}_3^- - 0.634)}$ représente la résistance spécifique de la membrane ($\Omega \cdot \text{cm}$) à $I_{\text{PAC}}=0$ et à une température de 30 °C ($T = 303 \text{ K}$). Le terme exponentiel au dénominateur est le facteur de correction de la température si cette dernière n'est pas à 30 °C.

$\delta_{\text{H}_2\text{O}} / \text{SO}_3^-$ 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 :

$$V_{\text{ohm}} = \frac{I_{\text{PAC}}}{A} \left[\frac{181.6 \times \left[1 + 0.03 \times \left(\frac{I_{\text{PAC}}}{A}\right) + 0.062 \times \left(\frac{T}{303}\right)^2 \times \left(\frac{I_{\text{PAC}}}{A}\right)^{2.5} \right]}{\left[\delta_{\text{H}_2\text{O}} / \text{SO}_3^- - 3 \times \left(\frac{I_{\text{PAC}}}{A}\right) \right] \times \exp\left[4.18 \times \left(\frac{T-303}{T}\right) \right]} \times l + A \times R_{\text{C}} \right] \quad (\text{III.52})$$

c) 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

$$V_{conc} = -B \left(1 - \frac{J}{J_{max}}\right) \quad (III.53)$$

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 :

$$E_s = n \times E_{pac} \quad (III.54)$$

On remplace les expressions des pertes dans l'équation (II.1), et on obtient le potentiel réel global de la pile à combustible PEMFC, par l'équation suivante :

$$\begin{aligned} U_{PAC} = & 0.2817 - 0.85 \times 10^{-3}(T - 298.15) + 4.3081 \times T \left[\ln\left(\frac{3}{4}P_{anode}\right) + \frac{1}{2} \ln\left(\frac{1}{2}P_{cath}\right) \right] \\ & + \left[2.86 \times 10^{-3} + 2 \times 10^{-4} \ln(A) + 4.3 \times 10^{-5} \ln\left(\frac{0.75P_{anode}}{1.091 \times 10^6 \times \exp\left(\frac{77}{T}\right)}\right) \right] T + \\ & 7.6 \times 10^{-5} \ln\left(\frac{0.5P_{cath}}{5.08 \times 10^6 \times \exp\left(\frac{-498}{T}\right)}\right) - 1.93 \times 10^{-4} T \times \ln(I_{PAC}) - \\ & I_{PAC} \left[\frac{1.816 \left[1 + 0.03(I_{PAC}) + 0.062 \left(\frac{T}{303}\right)^2 \left(\frac{I_{PAC}}{A}\right)^{2.5} \right]}{A \left[\delta_{H_2O}/SO_3^- - 0.0634 - 3 \left(\frac{I_{PAC}}{A}\right) \right] \exp\left[4.18 \left(\frac{T-303}{T}\right) \right]} l + R_c \right] + B \left(1 + \frac{J}{J_{max}}\right) \end{aligned} \quad (III.55)$$

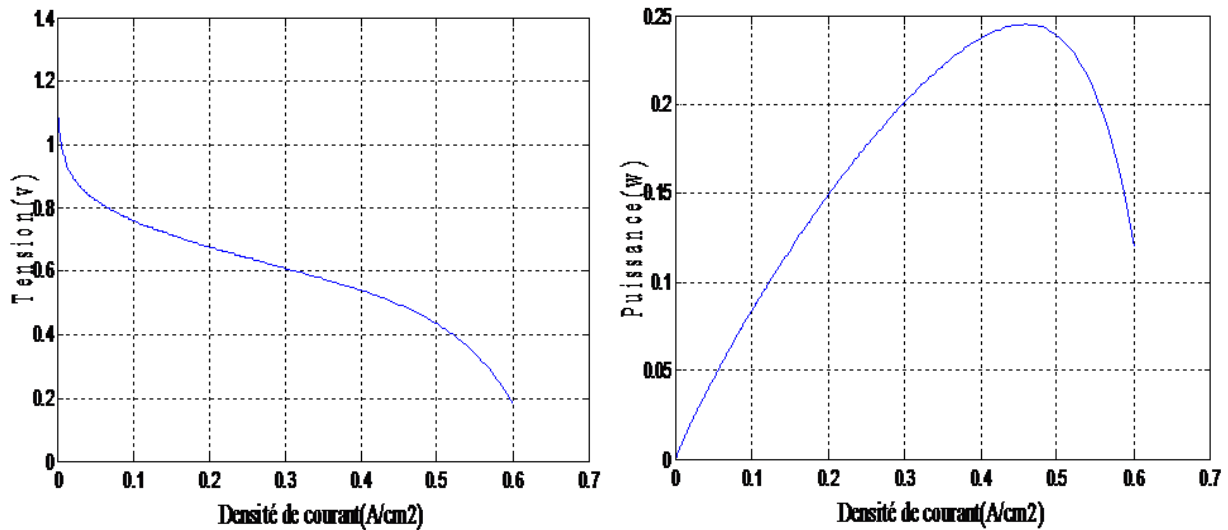


Figure 33 : Courbe de polarisation d'une cellule de pile à combustible PEMFC.

V. Super condensateur : [56] [57]

Le modèle des Super condensateurs se compose d'un condensateur idéal connecté en série avec une résistance (Figure 34). Les valeurs de la capacité du condensateur C_{SC} et de la résistance R_{SC} interne sont supposées constantes. La tension à vide V_C du Super Condensateur est l'image de son état de charge (SOC : state of charge). Des modèles avec plusieurs « branches RC » et des valeurs de capacité fonction de la tension du SC sont aussi proposés dans la littérature.

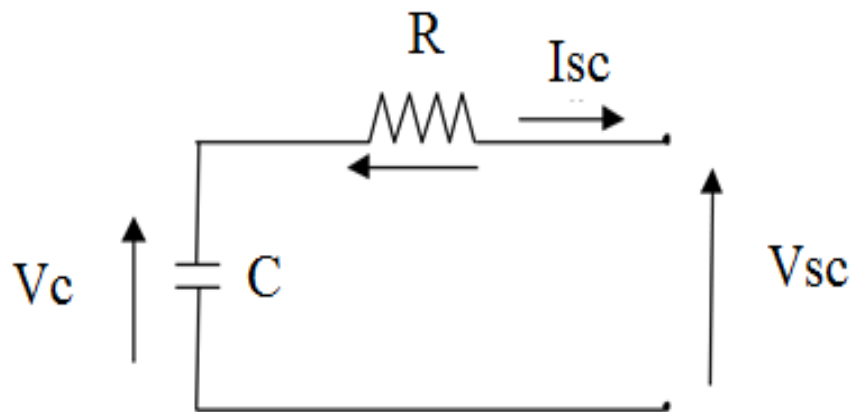


Figure 34 : Schéma électrique équivalent d'un super condensateur.

La tension aux bornes d'un super condensateur est donnée par :

$$V_{sc}(E_{sc}, I_{sc}) = E_{sc} - R_{sc} \cdot I_{sc} \quad (III.56)$$

La puissance est définie par :

$$P_{sc} = V_{sc} \times I_{sc} \quad (III.57)$$

La convention utilisée est :

$P_{sc} > 0$ en traction (décharge du super condensateur).

$P_{sc} < 0$ en freinage (recharge du super condensateur).

Comme la batterie, le condensateur se comporte comme un intégrateur de courant. La tension à vide V_C est calculée de la manière suivante :

$$V_c = V_C(0) - \frac{1}{C} \int_0^t I_{sc}(u) du \quad (III.58)$$

L'énergie contenue dans le SC E_{SC} est en fonction de sa tension à vide V_C . De ce fait, l'énergie maximale E_{SCmax} est obtenue pour la tension à vide maximale V_{Cmax} .

$$E_{sc}(V_c) = \frac{1}{2} \times C \times V_c^2 \quad (III.59)$$

Par définition, l'état de charge SOC correspond au rapport entre l'énergie contenue dans le Super condensateur et l'énergie maximale admissible :

$$SOC = \frac{E_{sc}(t)}{E_{SCmax}} \quad (III.60)$$

Pour satisfaire aux besoins en puissance et en énergie d'une application donnée, un assemblage de plusieurs super-condensateurs est utilisé. Lorsque N_{SC} super-condensateurs sont connectés en série, la tension du pack U_{SC} et la capacité équivalente C_{SC}^{eq} sont données par :

$$U_{SC}(E_{SC}, I_{SC}) = V_{SC}(E_{SC}, I_{SC}) \cdot N_{SC} \quad (III.61)$$

$$C_{SC}^{eq} = \frac{C_{SC}}{N} \quad (III.62)$$

IV. Conclusion :

On peut conclure de ce qui précède que l'énergie récupéré lors de freinage ou la décélération ; peut être récupérée et stockée dans le supercondensateur et la batterie ; puisque la pile à combustible possède un réservoir en combustible.

Chapitre 4

***Commande et simulation du
véhicule hybride parallèle à
simple arbre.***

Introduction :

La gestion des différentes sources d'énergie associées au véhicule électrique, nécessite des stratégies de commande que ce soit pour la machine synchrone à aimant permanent surtout et pour les convertisseurs dont on a utilisée.

I. Stratégie de commande de la MSAP :

On a vue dans le chapitre III le principe de fonctionnement de la voiture hybride et nous savons qu'il nous faut un calcul de la consigne du couple que doit fournir le moteur électrique pour la propulsion du véhicule, mais le moteur synchrone pose des problèmes de fonctionnement. Tout d'abord, il ne démarre pas spontanément sans artifice. Ensuite, il y a un risque de décrochage. En effet, le moment du couple a une valeur moyenne non nulle que si le rotor tourne parfaitement à la vitesse du champ tournant. Si ce synchronisme n'est pas respecté, le moment du couple a une valeur moyenne nulle et le moteur ralentit puis s'arrête. La machine se comporte alors presque comme un court-circuit puisqu'il n'y a plus de force électromotrice induite. Ce phénomène de décrochage peut se produire soit :

- Lors le couple résistant devient excessif et que l'angle interne α dépasse la valeur $\frac{\pi}{2}$.
- Ou bien lors d'un régime transitoire résultant d'une variation de fréquence destinée à modifier la vitesse ou d'un changement brutal de couple résistant.

Un autopilotage du moteur nous permet d'annuler ces défauts sous principe, un capteur détecte la position du rotor θ commande le convertisseur électronique en fonction de cette position. La pulsation de l'alimentation statorique ω est ainsi asservie à la vitesse Ω du rotor et le dispositif maintient toujours la condition :

$$\omega = p\Omega$$

Le décrochage est alors impossible. L'autopilotage donne à l'ensemble convertisseur, moteur synchrone un fonctionnement proche de celui d'une machine à courant continu. [68] C'est-à-dire un modèle linéaire.

I.1 Commande vectorielle de la MSAP :

L'idée fondamentale de cette stratégie est d'assimiler le comportement de la machine synchrone à celui d'une machine à courant continu, c'est-à-dire un modèle linéaire et découplé ce qui permet d'améliorer son comportement dynamique. [59] [58]

Elle consiste à régler le flux par une composante du courant et le couple par l'autre composante. Il faut donc, choisir un système d'axe (d,q) et une loi de commande qui assure le découplage du flux et du couple.

La stratégie de commande la plus souvent utilisée est celle qui consiste à maintenir le courant i_d à une valeur nulle. Cette stratégie permet de simplifier la commande du couple par la linéarisation de la relation entre le couple et le courant.

D'autre part, si le courant i_d est maintenu nul, physiquement le flux de réaction d'induit est en quadrature avec le flux rotorique produit par les aimants permanents. [51]

$$i_d = 0 \rightarrow i_q = i_s$$

$$\text{Donc } \varphi_d = \varphi_f$$

- **Application de la commande :**

$$\frac{d}{dt} i_d = \frac{1}{L_d} (V_d - R i_d + L_q \omega i_q) \quad (\text{IV.1})$$

$$\frac{d}{dt} i_q = \frac{1}{L_q} (V_q - R i_q - L_d \omega i_d - \varphi_f \omega) \quad (\text{IV.2})$$

$$\frac{d}{dt} \Omega = \frac{1}{J} (C_e - f \Omega - C_r) \quad (\text{IV.3})$$

Avec

$$C_e = p \varphi_f i_q \quad (\text{IV.4})$$

Ces équations sont présentées par le schéma bloc présentée dans la figure 35 :

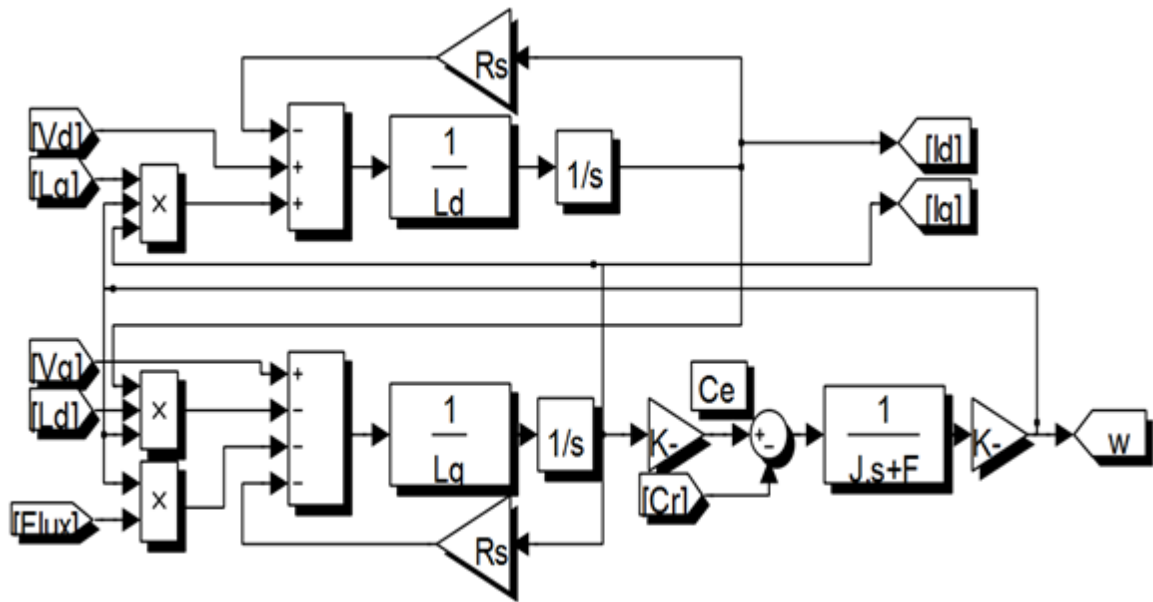


Figure 35 : Model de MSAP commandé en tension. [30]

I.1.1 Mise en équation du découplage par retour d'état :

La commande par orientation du champ consiste à annuler l'effet de l'axe « d » sur « q », en imposant ($i_d = 0$), cela est possible en effectuant un retour d'état approprié en prenant l'alimentation en tension est obtenue en imposant les tensions de référence à l'entrée de l'onduleur. Ces tensions permettent de définir les rapports cycliques sur les bras de l'onduleur de manière à ce que les tensions délivrées par cet onduleur aux bornes du stator de la machines soient les plus proches possible des tensions de référence. Mais il faut définir des termes de compensation, car dans les équations statiques il ya des termes de couplage entre les axes d-q. [44]

Les tensions suivant les axes « d, q » peuvent être écrites sous les formes suivantes :

$$\begin{cases} V_d = R_d i_d + L_d \frac{d}{dt} i_d - L_q \omega I_q \\ V_q = R_d i_q + L_q \frac{d}{dt} i_q + \omega (i_d L_d + \varphi_f) \end{cases} \quad (IV.5)$$

La figure 36 représente le couplage qui existe entre l'axe d-q :

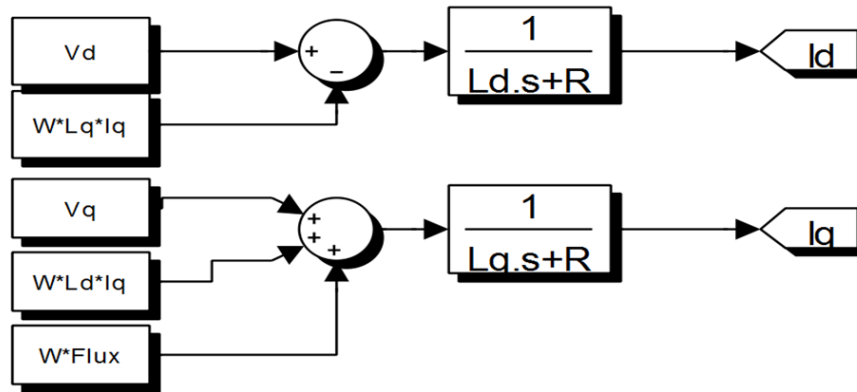


Figure 36 : Description de couplage entre l'axe d-q. [30]

Les tensions V_d et V_q dépendent à la fois des courants sur les axes d-q. [N1] afin d'éliminer l'effet de l'axe « d » sur l'axe « q », en imposant $i_d = 0$, il faut effectuer un découplage.

Le principe de ce dernier revient à définir deux nouvelles variables de commande e_d, e_q . [44] présentée comme suite :

$$\begin{cases} e_q = wL_q I_q \\ e_d = w(L_d I_d + \varphi_f) \end{cases} \quad (IV.6)$$

A partir de l'équation (IV.4) et (IV.5) :

On aura :

$$\begin{cases} V_d = V_{d1} - e_q \\ V_q = V_{q1} + e_d \end{cases} \quad (IV.7)$$

$$\begin{cases} V_{d1} = (R_s + sL_d) I_d \\ V_{q1} = (R_s + sL_q) I_q \end{cases} \quad (IV.8)$$

On aura donc des courants « i_d » et « i_q » qui sont découplés et s'écrivent comme suit :

$$\begin{cases} i_d = \frac{V_{d1}}{R_s + sL_d} \\ i_q = \frac{V_{q1}}{R_s + sL_q} \end{cases} \quad (IV.9)$$

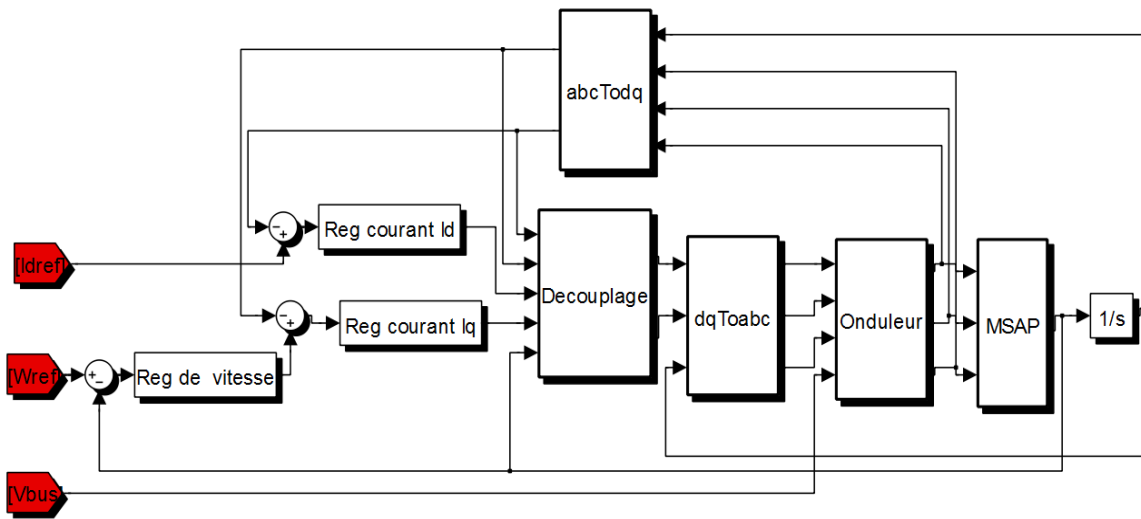


Figure 37 : Schéma de bloc de la commande vectorielle avec compensation des F.E.M. [30]

Après avoir découplés la machine, on passe à la régulation utilisant des régulateurs de type « PI ».

I.1.2. Dimensionnement et calcul du régulateur classique (PI) :

Le rôle des régulateurs est de maintenir une grandeur de sortie égale à la grandeur de référence impose malgré la présence des perturbations internes ou externes. [61]

Nous nous contentons de régulateurs classiques de type « PI » dans une structure par boucle imbriquée. Dans ce cas, nous pouvons distinguer deux modes :

- Le mode électrique (mode rapide : boucle interne).
- Le mode mécanique (mode lent : boucle externe).

Pour chacune des boucles de courant, nous proposons de commander la machine par des régulateurs classiques Proportionnel Intégrateur (PI) afin de compenser la perturbation du couple résistant, au niveau de la réponse de la vitesse de rotation, c'est-à-dire, ils comportent une action proportionnelle qui sert à régler la rapidité avec laquelle la régulation doit avoir lieu, et une action intégrale qui sert à éliminer l'erreur statique entre la grandeur régulée et la grandeur de consigne. [62]

La relation entre la sortie du régulateur $s(t)$ et le signal d'erreur $\varepsilon(t)$ est donnée par la relation IV.10 :

$$s_r(t) = k_p \varepsilon(t) + k_i(t) \int_0^t \varepsilon(t) d(t) \quad (\text{IV.10})$$

C'est-à-dire

$$\frac{s_r(p)}{\varepsilon(t)} = k_p + \frac{k_i}{p} \quad (IV.11)$$

k_p : Gain proportional;

k_i : Gain integral;

T_i : Constante de temps d'intégration ;

Avec

$$T_i = \frac{1}{k_i} \quad (IV.12)$$

A partir de l'équation (IV.10) Le régulateur « PI » peut se représenté comme suit :

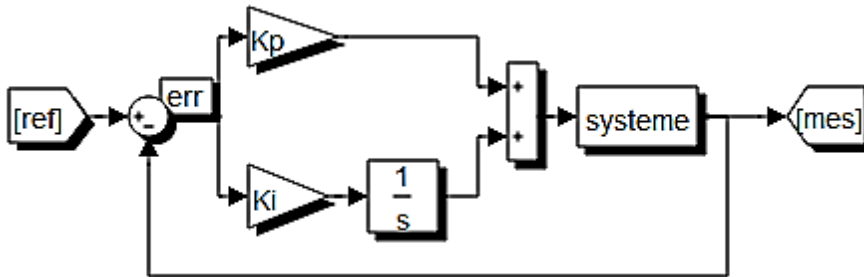


Figure 38 : Structure interne d'un régulateur « PI ». [30]

a) Régulation du courant i_d :

La boucle de régulation sur l'axe d est présentée par la figure suivante :

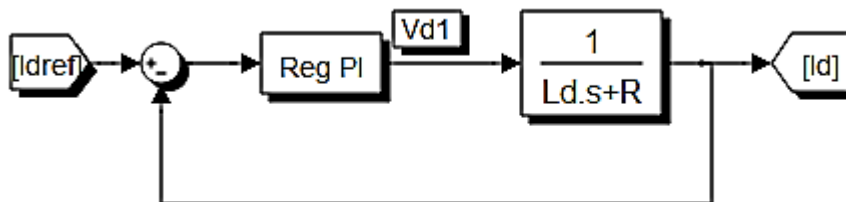


Figure 39 : Boucle de régulation de la composante directe « i_d ». [30]

La fonction de transfert en boucle fermée sera donnée par :

$$F_{bo}(s) = \frac{K_p s + K_i}{L s^2 + (K_p + R) s + K_i} \quad (IV.13)$$

Le calcul des paramètres du régulateur se fait par la méthode imposition du modèle à poursuivre [N20]. Le modèle à poursuivre sélectionné comprend une seule constante de temps τ

$$\tau_e = \frac{R}{k_i} \quad (IV.14)$$

$$t_r = 3\tau_e \quad (IV.15)$$

Après le calcul on trouve les paramètres suivants

$$k_p = 3 \frac{L}{t_r} \quad (IV.16)$$

$$k_i = 3 \frac{R}{t_r} \quad (IV.17)$$

b) Régulation du courant i_q :

La régulation sur l'axe « q » est présentée dans la figure 40.

Sachant que :

$$i_q = \frac{V_q}{R_s + s.L_q} \quad (IV.18)$$

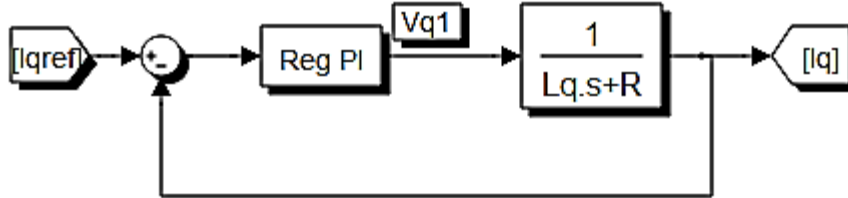


Figure 40 : Boucle de régulation de la composante en quadrature « i_q ». [30]

Le bloc de découplage fournit les tensions de commandes suivantes :

$$\begin{cases} V_{d1} = -\omega L_q i_q^* \\ V_{q1} = R i_q^* + L \frac{di_q}{dt} + \omega \varphi_d \end{cases} \quad (IV.19)$$

Pour la machine synchrone à aimants montés en surface, la constant de temps électrique (L/R) est généralement négligeable .donc le système devient comme suit : [30]

$$\begin{cases} V_d^* = -\omega L i_q \\ V_q^* = R i_q^* + \omega \varphi_d \\ i_d^* = \frac{C_e^*}{\varphi_d} \end{cases} \quad (IV.20)$$

A partir des deux systèmes (IV.5-19) nous obtenons :

$$i_q(s) = \frac{i_q^*(s)}{1 + \frac{L}{R}s} = \frac{i_q^*(s)}{1 + \tau_e s} \quad (IV.21)$$

Le schéma structurel du système à régler devient alors :

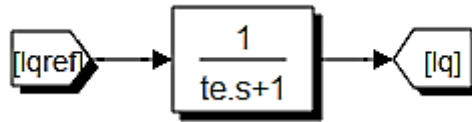


Figure 41 : Schéma structurel du système à régler. [30]

En boucle fermée on aura la structure suivante :

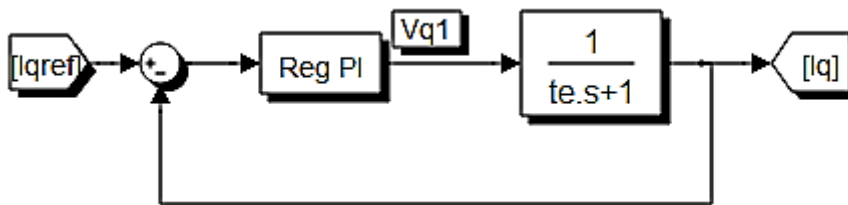


Figure 42 : Schéma structurel du système en boucle fermée. [30]

c) Régulation de la vitesse

Avec la commande vectorielle on peut ramener le modèle du moteur synchrone à aimants permanents à un modèle linéaire équivalent à celui d'un moteur à courant continu à excitation indépendante. A partir de ce modèle, le régulateur de vitesse peut être synthétisé au moyen de techniques classiques développées pour les systèmes linéaires. Dans cette partie, nous mettons en œuvre le contrôle vectoriel en boucle fermée, la vitesse sera contrôlée par l'intermédiaire du courant statorique en insérant un régulateur PI qui peut aisément être déterminé à partir du modèle découplé de la machine. La figure 43 montre schématiquement la régulation de vitesse du système : [64]

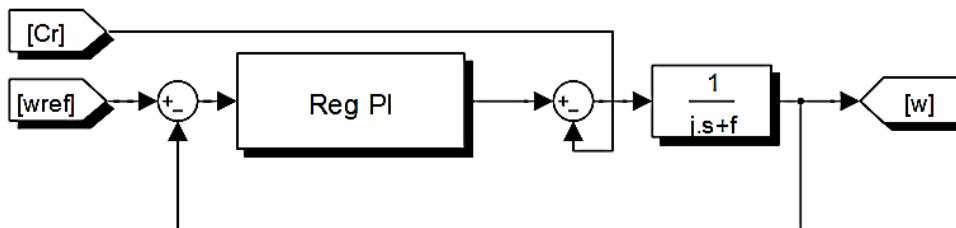


Figure 43 : Fonction de transfert en boucle ouverte. [30]

D'après l'équation IV.21 on a :

$$i_q(s) = \frac{i_q^*(s)}{1 + \frac{L}{R}s} = \frac{i_q^*(s)}{1 + \tau_e s} \quad (\text{IV.22})$$

D'où :

$$C(s) = \frac{C^*(s)}{1 + \tau_e s} \quad (\text{IV.23})$$

L'équation mécanique de la vitesse, nous donne :

$$\Omega(s) = \frac{C(s) - C_r(s)}{f + Js} = \frac{C(s) - C_r(s)}{f(1 + \tau_m s)} \quad (\text{IV.24})$$

Avec

$$\tau_m = \frac{J}{f} \quad (\text{IV.25})$$

En remplaçant l'expression du couple électromagnétique C_e donné par l'équation IV.24

On obtient :

$$\Omega(s) = \frac{1}{f(1 + \tau_e s)(1 + \tau_m s)} C^*(s) - \frac{1}{f(1 + \tau_m s)} C_r(s) \quad (\text{IV.26})$$

Théoriquement une action proportionnelle suffit à garantir les critères de performances exigés par la boucle de vitesse, mais une action proportionnelle, lors d'un changement de consigne de vitesse fait substituer un écart $= \Omega_{ref} - \Omega$. Alors une action intégrale est donc nécessaire pour annuler cette erreur en régime permanent. [30]

En ajoutant un régulateur PI de fonction de transfert donnée par :

$$R(s) = K_p + \frac{K_i}{s} \quad (\text{IV.27})$$

La fonction de transfert globale en boucle ouverte F_{gbo} sera :

$$F_{gbo} = \left(K_p + \frac{K_i}{s} \right) \frac{1}{f(1 + \tau_e s)(1 + \tau_m s)} \quad (\text{IV.28})$$

Et en boucle fermée, on aura :

$$F_{gbf}(s) = \frac{F_{gbo}(s)}{1 + F_{gbo}(s)} \quad (\text{IV.29})$$

Après les calculs élémentaires, on obtient l'expression finale de $F_{gbf}(s)$

$$F_{gbf}(s) = \frac{K_p s + K_i}{J \tau_e s^3 + (f \tau_e) s^2 + (K_p + f) s + K_i} \quad (\text{IV.30})$$

En tenant compte des paramètres de la machine, on peut négliger les deux termes $J\tau_e$ et $f\tau_e$ alors le dénominateur de notre fonction de transfert devient :

$$F_{gbf}(s) = \frac{N(s)}{D(s)} = \frac{K_p s + K_i}{Js^2 + (K_p + f)s + k_i} \quad (IV.31)$$

Pour avoir un comportement bien amorti avec un amortissement relatif optimal, les paramètres du régulateur ont été choisis par la méthode des pôles imposés. Nous imposons les pôles du système, où la partie réelle est égale à la partie imaginaire [63]. Dans ce cas, les paramètres du régulateur sont :

$$\begin{cases} k_i = 2\rho^2 J \\ k_p = 2J\rho - f \end{cases} \quad (IV.32)$$

Tel que ρ représente le module de la partie réelle et de la partie imaginaire des deux pôles.

II. Commande des systèmes d'électronique de puissance :

II.1 Commande de l'onduleur par la technique MLI triangulo-sinusoidale :

Pour la commande de l'onduleur nous avons choisi la technique MLI triangulo-sinusoidale, qui permet de faire varier la valeur du fondamental de la tension de sortie et de repousser vers des fréquences élevées les harmoniques de la tension de sortie, ce qui facilite le filtrage. Le principe de la stratégie Triangulo-sinusoidale consiste à comparer un signal triangulaire de fréquence f_p appelée porteuse, aux trois tensions de référence sinusoidale de fréquence f , les instants où se produisent les intersections de la porteuse et de la référence déterminent la durée d'ouverture et de fermeture des interrupteurs [65].

Les trois tensions de référence sont décalées de 120. Les unes par rapport aux autres et leurs expressions sont les suivantes :

$$V_i = V_{max} \sin\left(2\pi f t - \frac{(i-1)2\pi}{3}\right) \quad (IV.33)$$

Avec $i= 1, 2, 3$.

V_{max} : tension maximale de V_i

La forme de la porteuse est la suivante :

Ou T_p représente la période du signal de la porteuse

$$T_p = \frac{1}{f_p} \quad (IV.34)$$

On peut aussi définir deux autres paramètres qui caractérisent cette commande l'indice de modulation «m» et le Taux de modulation « r ».

Telle que :

$$\begin{cases} m = f_p / f_m \\ r = V_m / V_p \end{cases} \quad (IV.35)$$

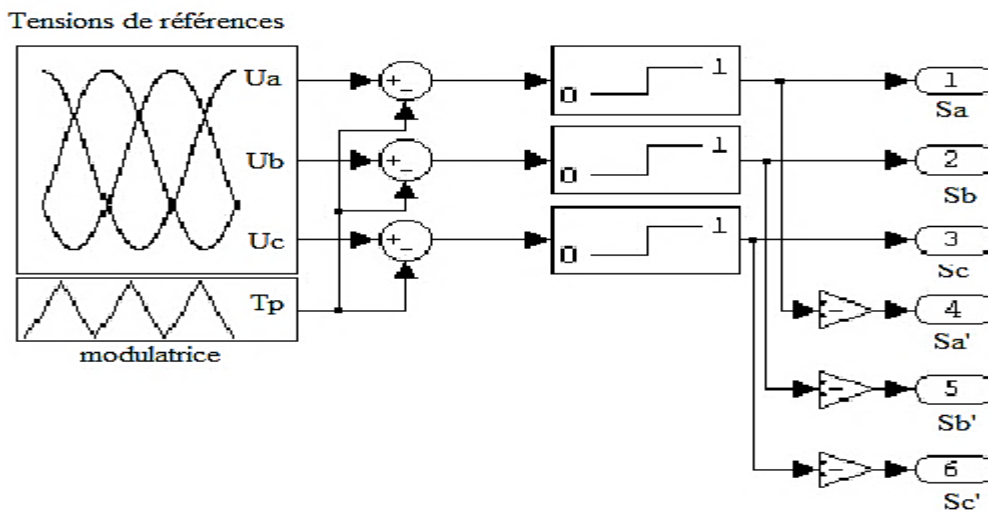


Figure 44 : Schéma fonctionnel d'une réalisation analogique d'une MLI. [30]

II.2 Commande du convertisseur DC/DC :

On a cité dans le chapitre III qu'un véhicule hybride possède deux types du hacheur :

- le premier type c'est un hacheur élévateur (parallèle) qui sert à alimenter le moteur synchrone à aimants permanents par une tension de bus constante ;
- le deuxième type c'est un hacheur abaisseur (série) qui sert à recharger la batterie électrique (système de stockage et de récupération d'énergie quand aura lieu).

a) Commande du hacheur parallèle (élévateur) :

Pour la commande du hacheur parallèle on a utilisé une commande à double contrôle, ce type de contrôle très répandu dans l'industrie rentre dans la classe des commandes linéaires qui se basent sur un modèle linéaire du système pour synthétiser le contrôleur. Nous retenons la structure à deux boucles (dont les paramètres sont donnés en annexe). Son avantage est

qu'elle améliore les performances dynamiques et la robustesse du contrôleur. Elle permet aussi de simplifier le contrôle du hacheur, dont la fonction de transfert présente un zéro dans la partie droite de l'axe des imaginaires rendant son contrôle par une seule boucle de tension compliqué.[30] La structure de la commande est représentée sur la figure 45 :

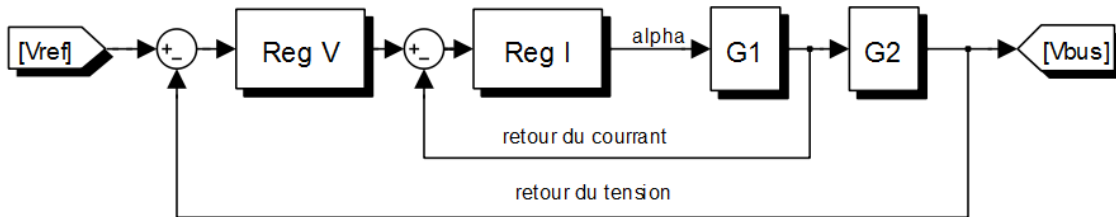


Figure 45 : Structure de la commande par deux boucles de contrôle. [30]

Pour la boucle de contrôle présenté par la figure 45, nous avons besoin de déterminer les fonctions de transfert G1 et G2

$$G_1(s) = \frac{I_L(s)}{\alpha(s)} = \frac{2V_{bus}}{R(1-\alpha)^2} \cdot \frac{1 + \frac{(RC)}{2}s}{1 + \frac{L}{R(1-\alpha)^2}s + \frac{LC}{(1-\alpha)^2}s^2} \quad (IV.36)$$

$$G_2(s) = \frac{V_{bus}(s)}{I_L(s)} = \frac{R(1-\alpha)^2}{2} \cdot \frac{1 - \frac{L}{R(1-\alpha)^2}s}{1 + \frac{(RC)}{2}s} \quad (IV.37)$$

b) Commande du hacheur abaisseur (série) : [M4]

Pour régulé le courant de la batterie à une valeur de référence i_{bat}^* , on a fait appel aux régulateurs à hystérésis, la commande par hystérésis à bande fixe consiste à maintenir le courant à l'intérieur d'une bande encadrant sa référence. La commande se fait alors sur chacune des phases par rapport à une référence calculée. L'écart existant entre le courant mesuré i_{mes} et celui de référence i_{ref} est comparé à une bande fixe, appelée bande d'hystérésis (HB). Chaque sortie de la bande entraîne un changement de la configuration des interrupteurs. Cette technique de régulation présente l'avantage d'être rapide, robuste et facile à mettre en œuvre. En revanche dans ce cas de contrôle du courant, la fréquence de commutation dépend essentiellement de la dérivée du courant de consigne. L'amplitude de la dérivée n'est donc pas maîtrisée et la fréquence de commutation n'est pas donc fixe. Ce point peut être particulièrement pénalisant dans le cas des systèmes de fortes puissances où la fréquence de commutation est limitée à des valeurs de l'ordre du kHz, du fait des caractéristiques des

composants. Si le courant atteint les limites de la bande, on aura en sortie un signal logique (1 ou 0) pour l'interrupteur du convertisseur série, c'est-à-dire :

$$\begin{cases} F = 1 \text{ si } I_{bat} < I_{ref} - \Delta i \\ F' = 0 \text{ si } I_{bat} < I_{ref} + \Delta i \end{cases} \quad (IV.38)$$

Sachant que : Δi est la bande d'hystérésis définie dans le régulateur.

Lorsque la valeur de la tension de bus $V_{bus} = 500 \text{ V}$ et que la valeur de la tension de la batterie dans les alentours de $V_{bat} = 200 \text{ V}$ alors la fréquence du courant en mode hystérésis sera d'environ de $f = 10 \text{ kHz}$

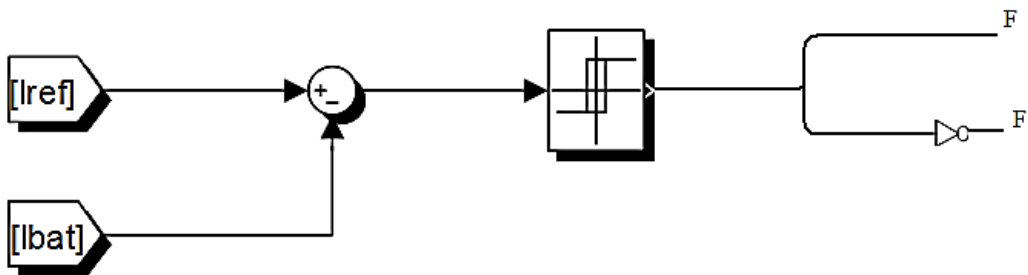


Figure 46 : Schéma de principe de la régulation du courant par hystérésis. [30]

III. Unité de contrôle :

III.1. Présentation de la méthode de gestion :

La figure 47 de ce chapitre présente le système retenu dans cette étude. Ce système comporte deux sources d'énergie : la pile à combustible et les sources secondaires. Afin de déterminer la décision de distribuer l'énergie entre les sources d'énergie du système et de maintenir borné l'état de charge de la source secondaire, la méthode à base de règles. Son principal rôle est d'assumer la distribution de puissance entre les sources pendant le fonctionnement du véhicule Elle permet de déterminer la décision de distribuer l'énergie entre les sources d'énergie et de maintenir l'état de charge de la batterie borné.

En résumé, les deux objectifs visés dans cette approche sont la minimisation de la consommation en hydrogène de la pile à combustible et le maintien de l'état de charge de la source secondaire. [68]

III.2. Différents modes d'opérations du groupe motopropulseur dans un VH : [67]

Durant le fonctionnement du groupe motopropulseur d'un véhicule hybride à PAC équipé d'une source secondaire d'énergie (SSE) plusieurs modes de fonctionnement peuvent être identifiés. Ces modes (traction, freinage, arrêt) induisent des différentes fluences d'énergie.

Soit :

P_{ME} : Puissance de la machine électrique.

P_{SYSPAC} : Puissance du système PAC.

P_{SSE} : Puissance de source secondaire d'énergie.

Le choix des limites sur l'élément de stockage de la SSE ($P_{SSE}^{MIN} < P_{SSE} < P_{SSE}^{MAX}$) permet de maintenir son état de charge dans une fourchette acceptable. D'autre part, les limites sur la puissance de la PAC ($P_{SYSPAC}^{MIN} < P_{SYSPAC} < P_{SYSPAC}^{MAX}$) offrent un degré de liberté supplémentaire aidant à optimiser le fonctionnement de la pile.

a. Modes de traction :

C'est ce mode qui va permettre au véhicule de se déplacer, le principe est d'avoir une puissance demandée à un instant « t » supérieure ou égale à celle à l'instant précédente on distingue 04 cas :

b. Modes de freinage :

Le véhicule est en mode freinage si la puissance demandée est négative tenant compte de la convention de signe utilisée pour différencier la traction du freinage. Dans ce cas, la puissance fournie par la pile à combustible est nulle et l'élément de stockage absorbe la puissance de freinage tout en respectant les contraintes sur la puissance maximale pouvant être absorbée ainsi que l'énergie maximale pouvant être stockée on trouve deux cas

c. Modes d'arrêt :

Le véhicule est considéré en mode d'arrêt dans notre cas si la puissance demandée par la machine électrique de traction ($P_{DEM} = P_{ME}$) est nulle. Dans ce cas, les puissances fournies par

la pile à Combustible (PAC), et l'élément de stockage (SSE), sont considérées nulles. A noter que nous ne tenons compte que de la puissance nécessaire à la traction vu que pratiquement la pile à combustible fournit toujours une puissance non nulle servant à alimenter, entre autres, ses auxiliaires. On trouve donc deux cas :

III.3. L'organigramme de gestion d'énergie :

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

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

+Alimentation de la charge par le SEH si l'énergie provenant de ce dernier est égale à la demande du moteur. Lorsque le SEH produit assez d'énergie pour satisfaire aux besoins de la charge, le surplus sert à recharger les batteries en priorité puis le super-condensateur.

+La recharge des batteries et des super-condensateurs s'arrête lorsqu'elles sont à plein charge (90%).

+Arrêt du véhicule si la puissance est insuffisante

$$(P_{hyb} < P_{ch}, EDC_{sc} < EDC_{sc,min} \text{ et } EDC_{batt} < EDC_{batt,min}).$$

La batterie débite sur la charge lorsque l'énergie de SEH est insuffisante ($P_{hyb} < P_{ch}$).

Lorsque la puissance demandé est supérieur à un certain seuil (P_{ref}) l'ors des piques de puissance les super-condensateurs prennent le relais.

La puissance disponible (P_{dis}) est calculée en faisant la différence entre la puissance fournie par le SEH (P_{hyb}) et la puissance demandée par la charge (P_{ch}). Si la puissance disponible est positive, alors les batteries et les super-condensateurs sont mis en charge. Si P_{dis} est négative, alors l'état de charge EDC des batteries est vérifiée, si cette dernière est inférieur à EDC_{min} , alors les batteries sont déconnectées, les super-condensateurs prennent alors la relève jusqu'à ce que leur état de charge soit aussi inférieur à EDC_{min} et si P_{dis} est supérieur à P_{ref} , alors les

batteries fournissent la puissance demandée, dans le cas contraire, les batteries fournissent P_{ref} et les super-condensateurs le restant de la puissance demandée à savoir $P_{dis}-P_{ref}$.

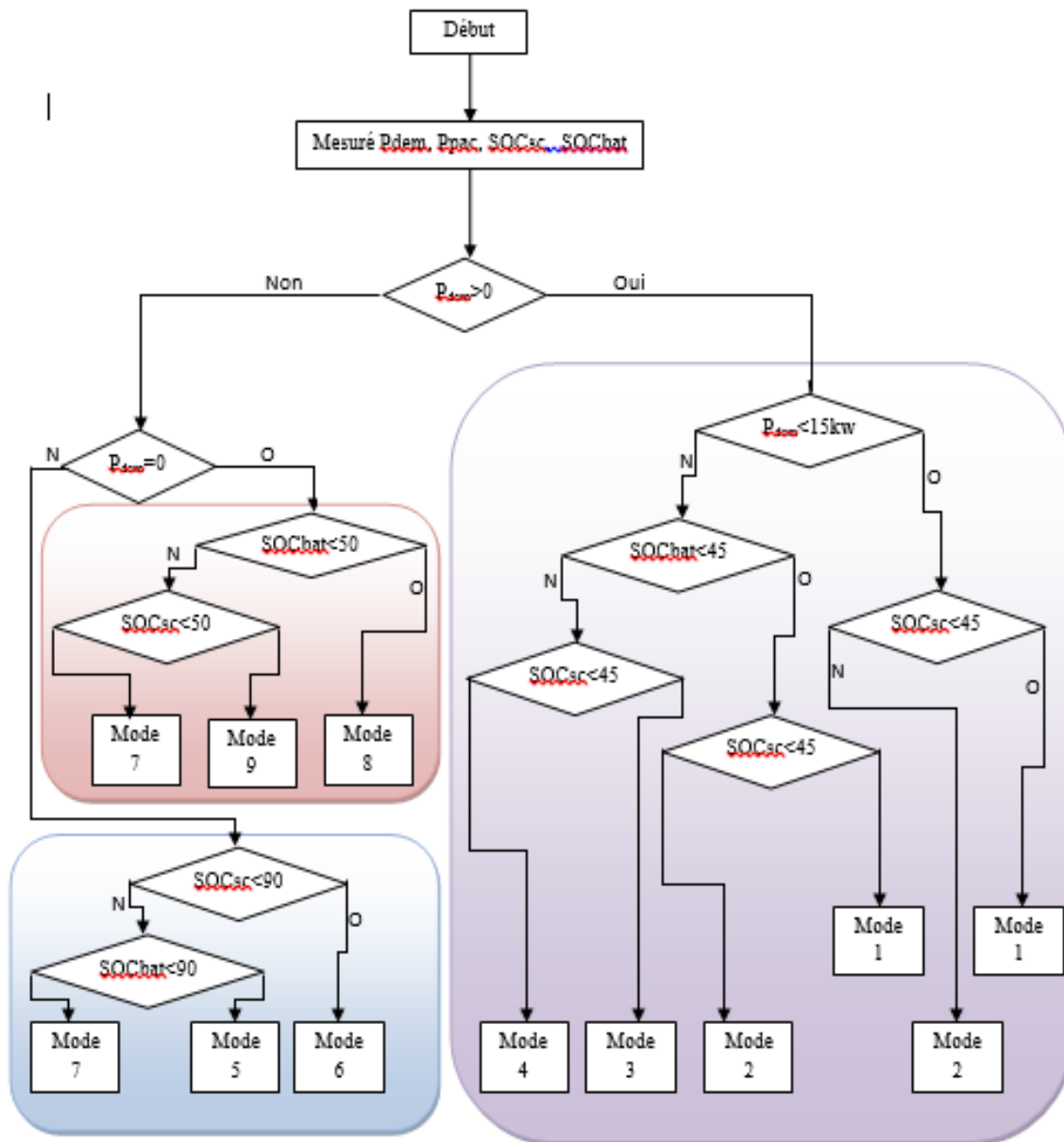
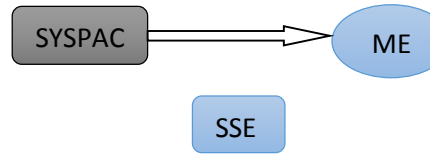
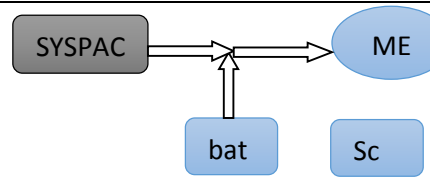
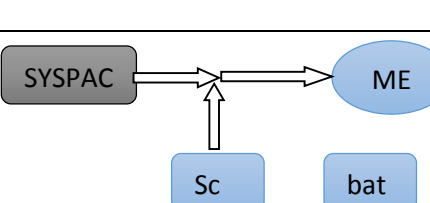
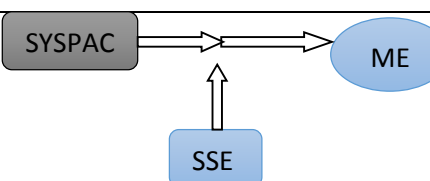
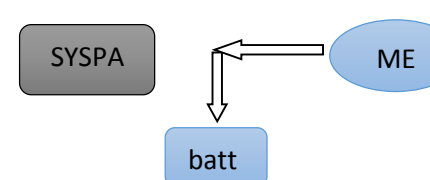
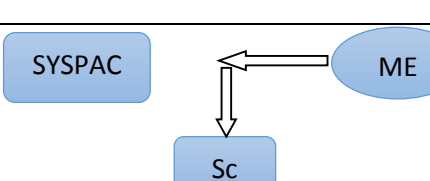



Figure 47 : L'organigramme de gestion d'énergie.

III.4. Mode fonctionnement du système :

Au sein du groupe motopropulseur d'un véhicule à pile à combustible hybride, plusieurs modes d'opérations peuvent être identifiés. Ces modes d'opérations (traction, freinage, arrêt) induisent des flux énergétiques différents (figure 48).

	Modes	Schéma des flux énergétique	Description
Traction	Mode 1		La PAC alimente seul la machine électrique.
	Mode 2		La PAC et la batterie alimentent ensemble la machine électrique.
	Mode 3		Le super-condensateur épaulé la PAC pour alimenter la machine électrique
	Mode 4		La PAC et la source secondaire alimentent ensemble la machine électrique
Freinage	Mode 5		Charger la batterie avec l'énergie cinétique de freinage
	Mode 6		Le super-condensateur récupère l'énergie cinétique de freinage.
	Mode 7		Aucun flux énergétique.

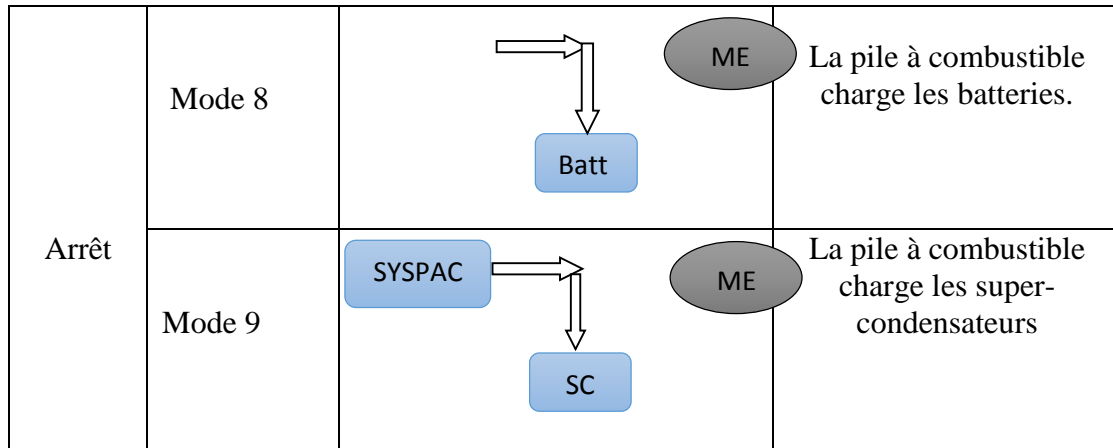


Figure 48 : Flux énergétiques au sein du groupe motopropulseur.

IV. Simulation :

À l'aide des modèles et des lois de commande élaborés dans les chapitres précédents pour les différents éléments composants le système étudié, nous allons tracer les résultats de simulation de la gestion d'énergie dans tout le système obtenus au cours de cette étude. L'organigramme de gestion sera modélisé sur matlab-simulink et il sera introduit dans le système global de simulation. Le but de ce chapitre est de valider la stratégie par simulation. Elle va être appliquée à un profil de mission c'est à dire un cycle de vitesse afin d'illustrer les différents modes de fonctionnement.

IV.1. Simulation générale appliqué au système global de véhicule :

La Figure 49 présente le système globale étudié sous Matlab/simulink, il regroupe le système d'un véhicule électrique : Pile à combustible, batteries, super-condensateurs, moteur électrique et les différents convertisseurs d'électronique de puissance. En présentera dans ce qui suit les résultats de simulation du système globale.

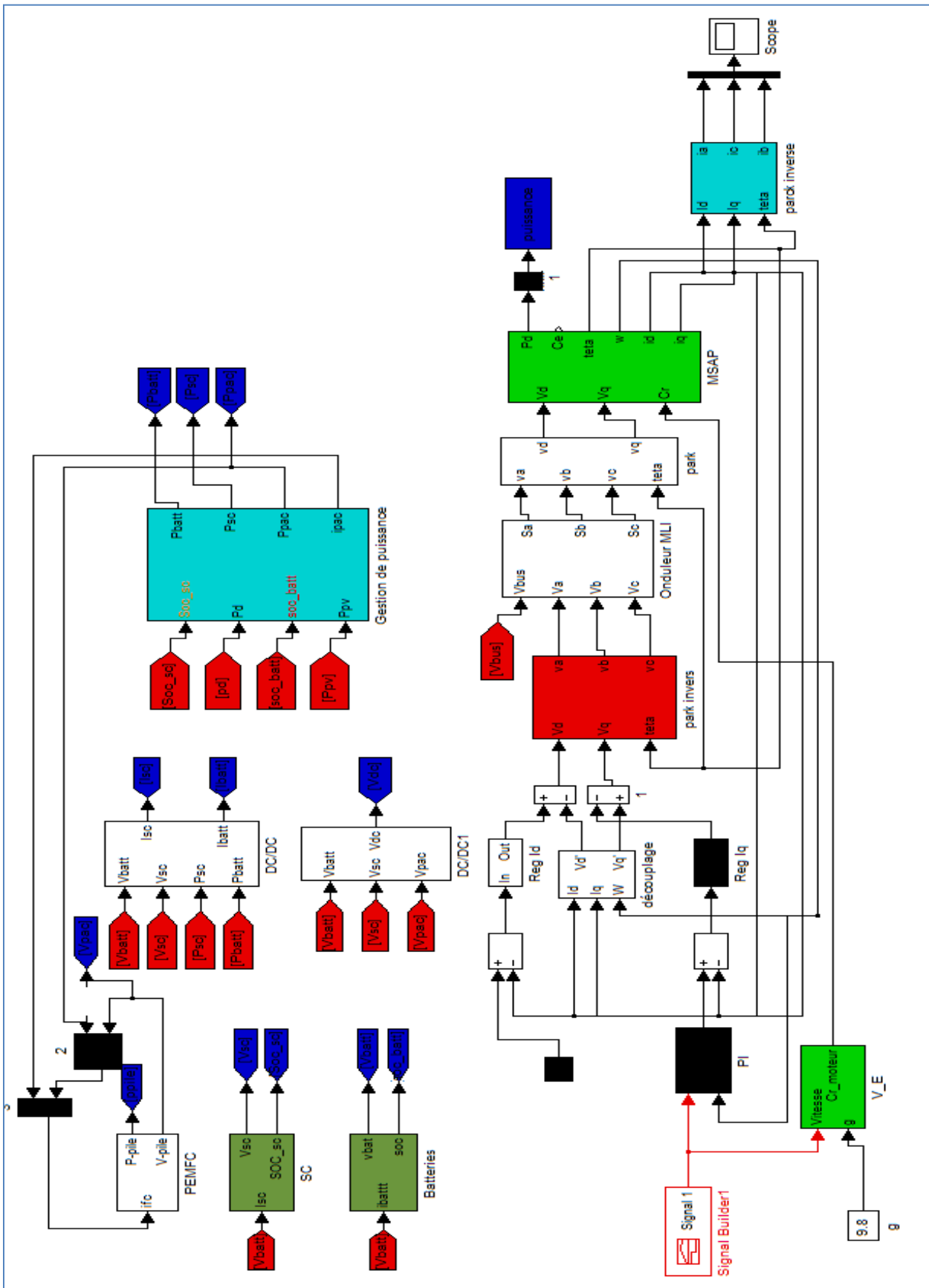


Figure 49 : Schéma globale de simulation.

IV.2. Résultats de la simulation :

Le modèle est testé sur un cycle de 10 secondes pendant le fonctionnement à des vitesses différentes selon un profile, la stratégie de gestion d'énergie proposée a été simulée 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 :

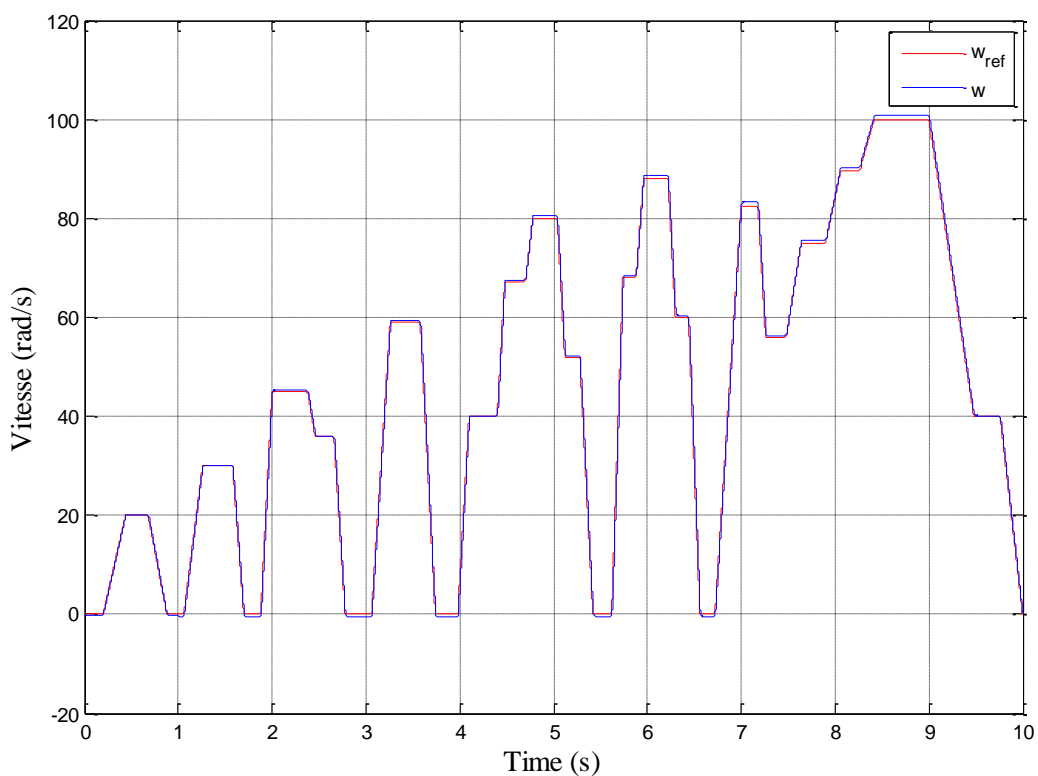


Figure 50 : Vitesse du véhicule électrique.

La Figure 50 montre l'allure de la vitesse du véhicule en rad/s, 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 . En comparant les deux allures on remarque que la vitesse du moteur suit parfaitement la vitesse de référence imposée par la commande vectorielle et elles ont le même profil que la vitesse de véhicule.

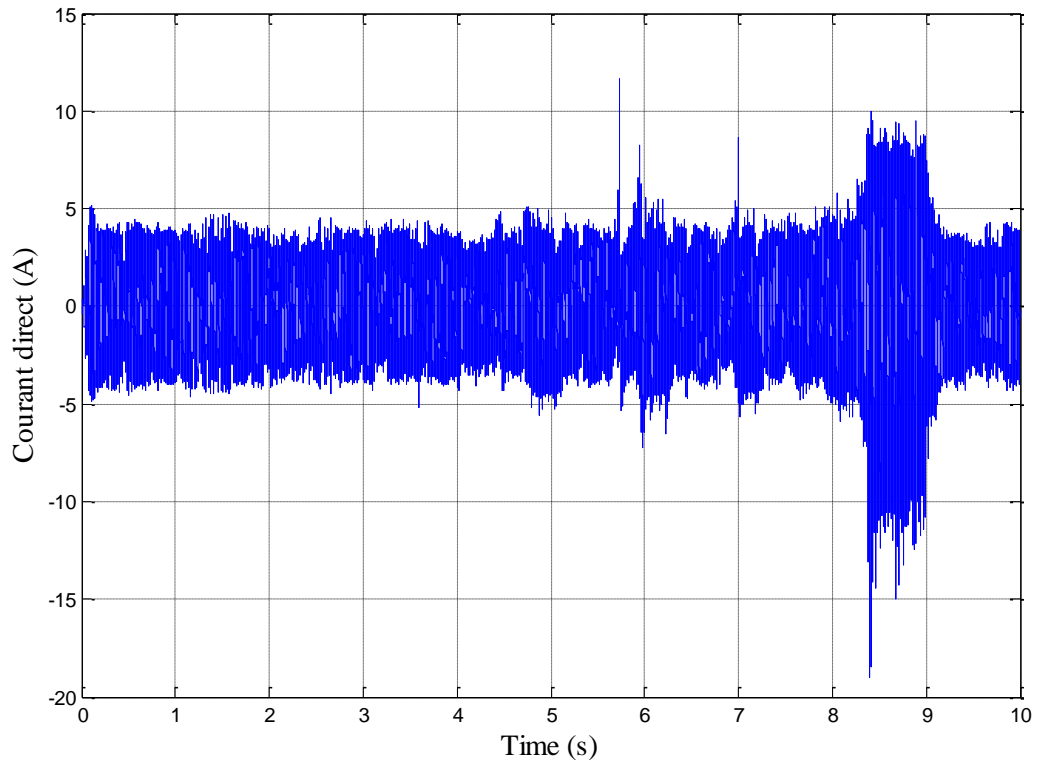


Figure 51: Le courant direct.

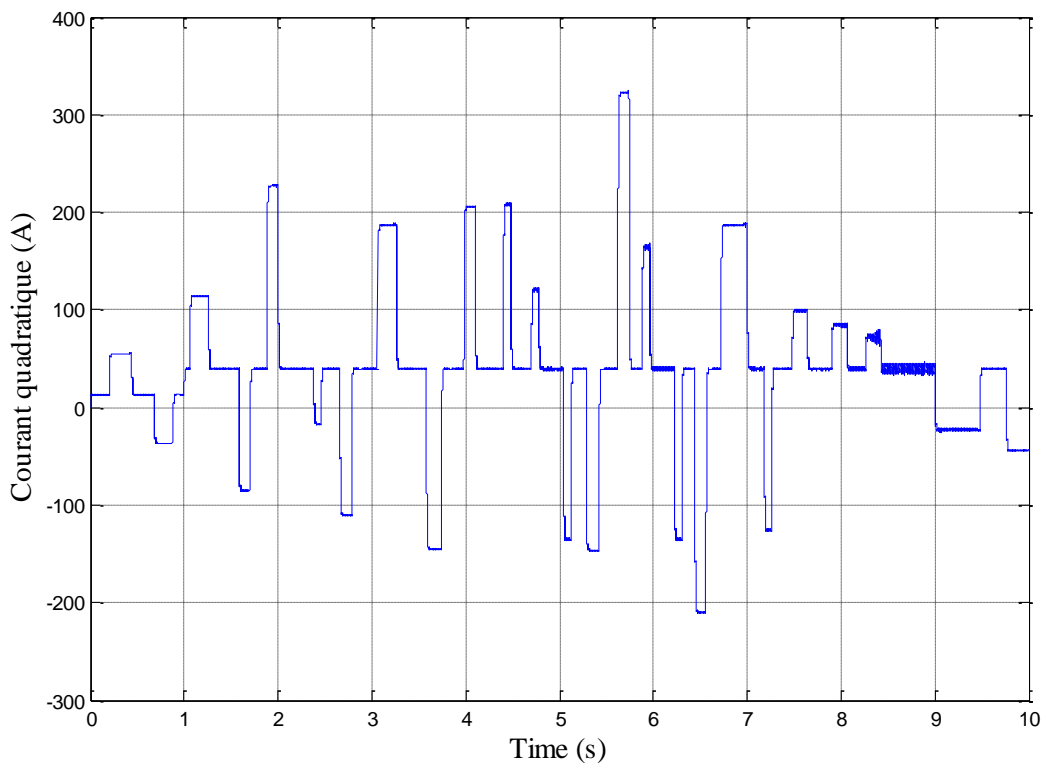


Figure 52: Le courant quadratique.

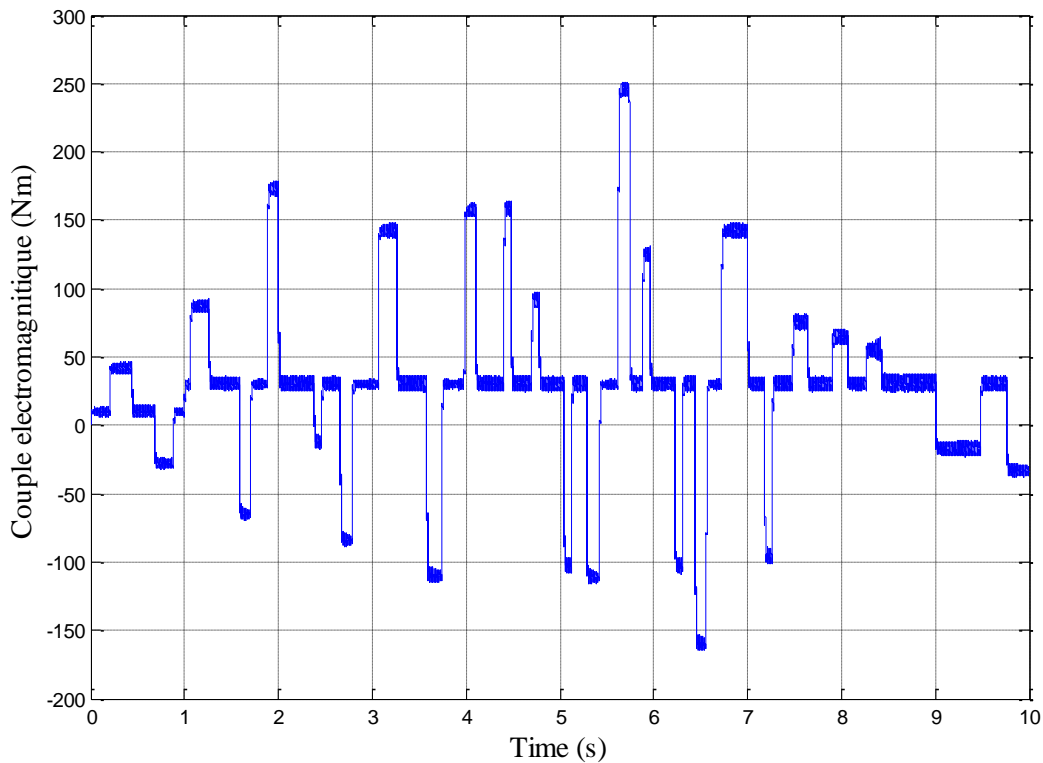


Figure 53: Couple électromagnétique.

Les figures 51, 52, 53. Représentent respectivement le courant direct, le courant quadratique et le couple électromagnétique. L'annulation du courant direct qui correspond à l'alignement du flux d'excitation sur l'axe direct fait que l'angle α entre le vecteur force électromotrice E_s de la machine et son courant i_s est nul. Ce qui ne permet pas d'avoir un facteur de puissance unitaire, Le courant quadratique de référence i_q^* est obtenu par la boucle de régulation de la vitesse de rotation de la machine synchrone (utilisant un régulateur PI) il s'agit d'un pilotage vectoriel de la MSAP qui nécessite la connaissance de la position du vecteur flux rotorique. Qu'elle peut être obtenue grâce à la mesure de la position angulaire du rotor à l'aide d'un capteur de position, ou à partir d'une estimation analytique,

- Les résultats de simulation montrent que le découplage est maintenu quel que soit la variation de la charge (dans le régime permanent) ;
- Le courant i_d prend la même valeur de référence zéro ;
- La variation de la vitesse est rapide avec petit dépassement de 1% lors du changement de la valeur du couple résistant et sans erreur statique, le rejet de perturbation est aussi rapide avec un temps de réponse d'une seconde 1.8 s.

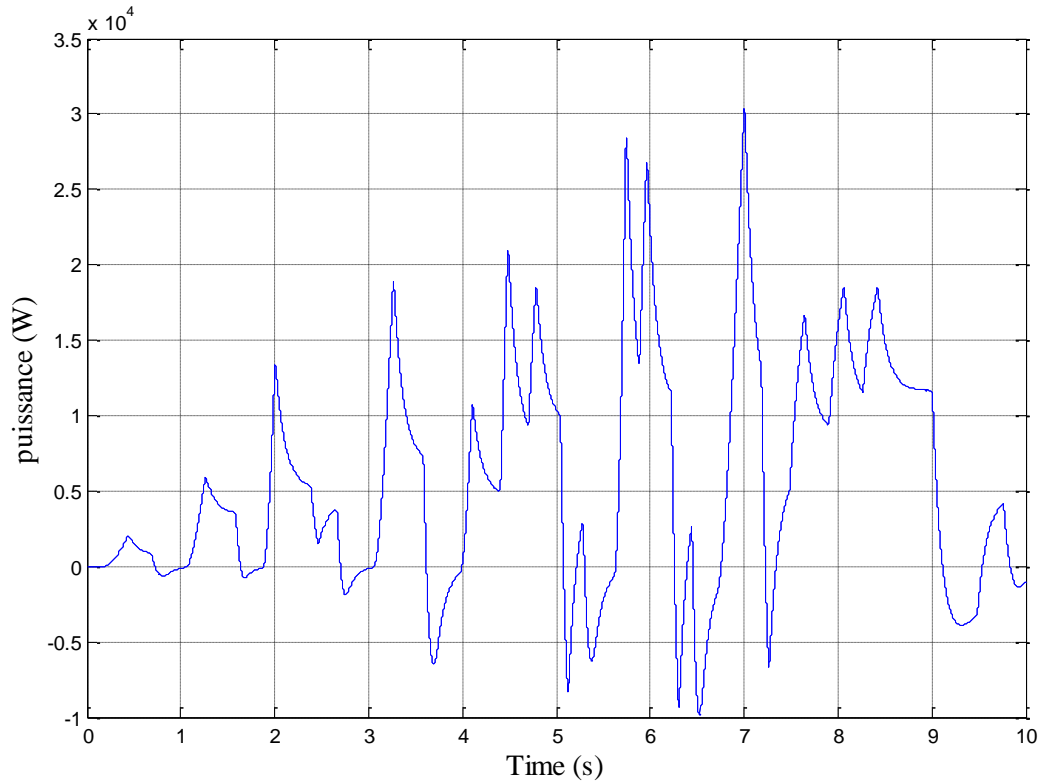


Figure 54: Profil de la puissance demandé.

La Figure 54 montre l'allure de la puissance demandée par le véhicule par rapport au cycle de vitesse proposé qui comporte les trois de mode de fonctionnement à savoir, accélération, décélération et l'arrêt.

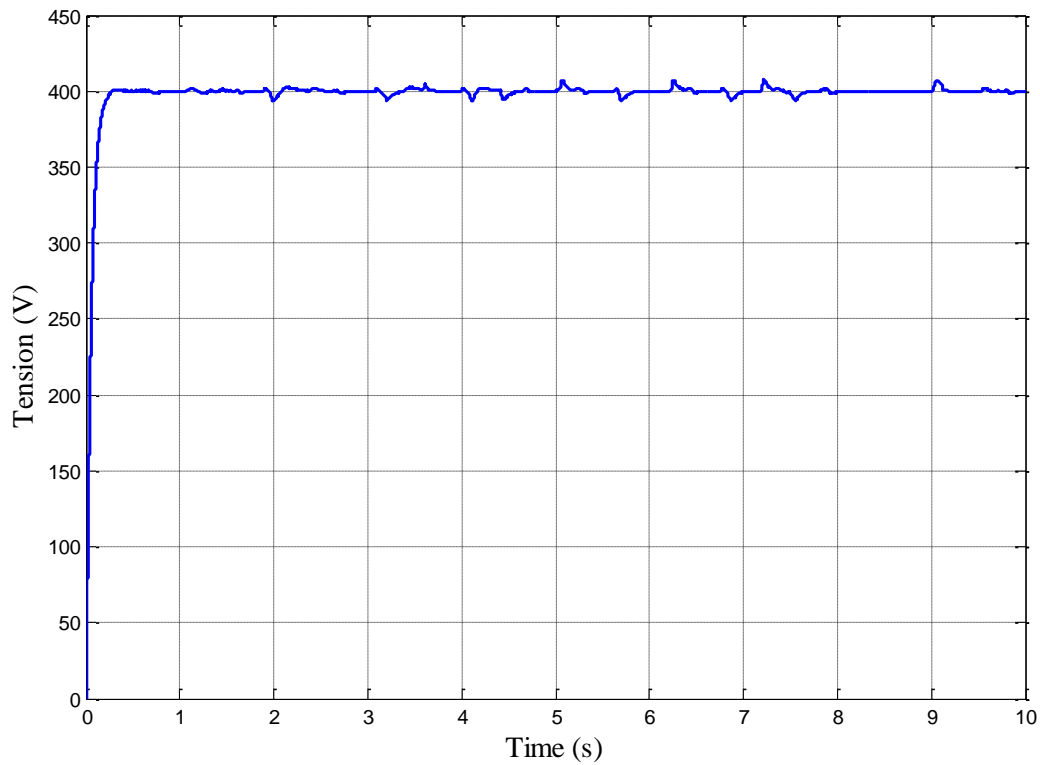


Figure 55: Tension au niveau du bus continu.

La Figure 55 montre le comportement de la tension au niveau du bus continu on remarque que la tension est stable après 0.15 ms qui est le temps de réponse, elle atteint de près la valeur maximale qui est de 400V durant toutes les phases de fonctionnement.

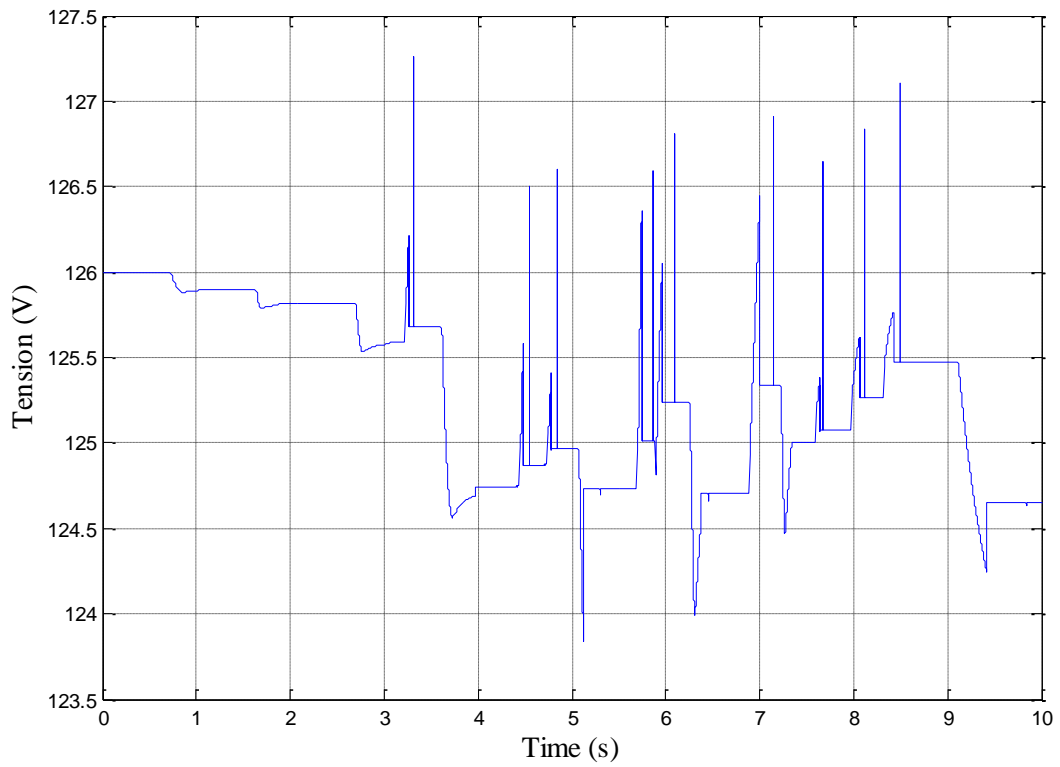


Figure 56 : Tension du supercondensateur.

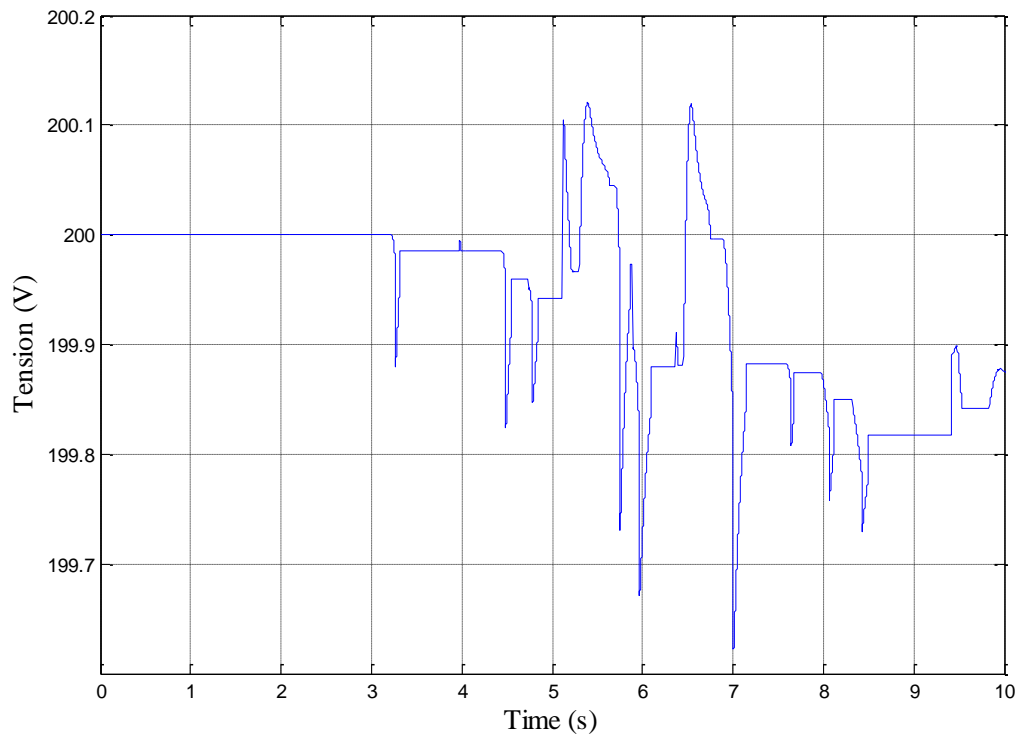


Figure 57 : Tension de la batterie.

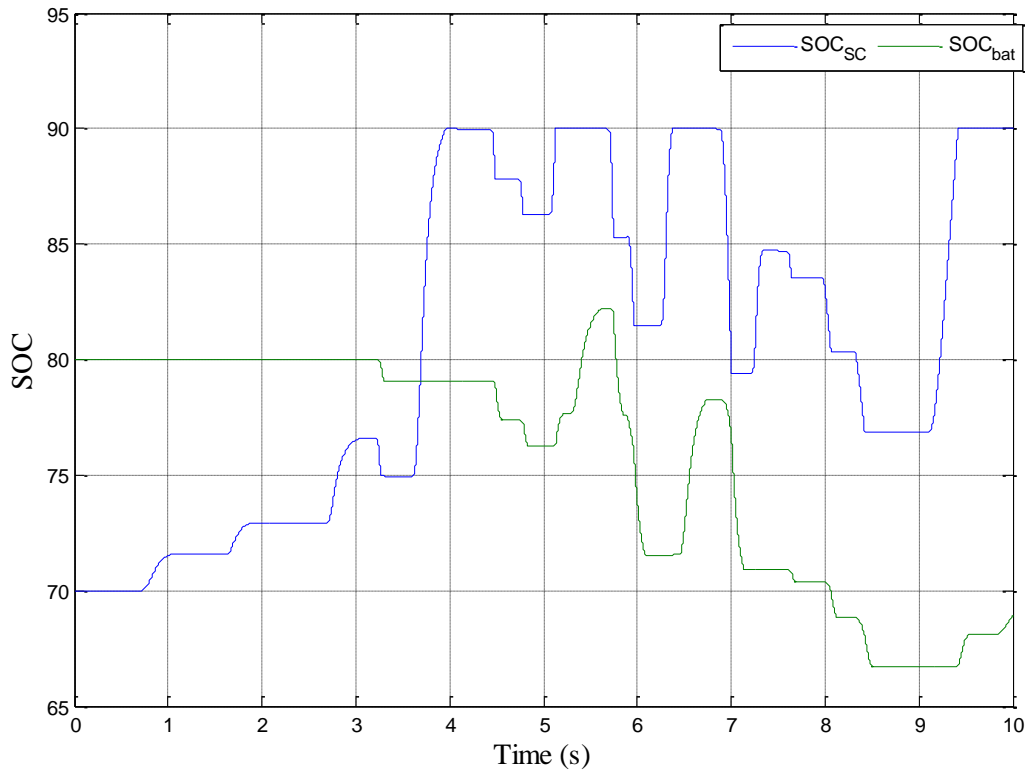


Figure 58 : état de charge des SCs et la batterie.

Les figures 56,57,58, représentent la tension du supercondensateur, tension de la batterie et l'état de charge de ses deux derniers, l'état de charge des super condensateurs (SOC Stat Of Charge), on remarque qu'elle est protégée entre les deux niveaux de charges, décharge pendant le fonctionnement moteur correspondant à une diminution du soc (state of charge), pour alimenter le moteur électrique, et recharge pendant le fonctionnement générateur correspondant à une augmentation du soc, et récupération de l'énergie cinétique des roues.

L'état de charge des batteries durant le cycle de vitesse imposé, lorsque la pile à combustible reprend aux besoins de la charge, et déchargent lorsque la demande en puissance dépasse la puissance nominale de la pile à combustible.

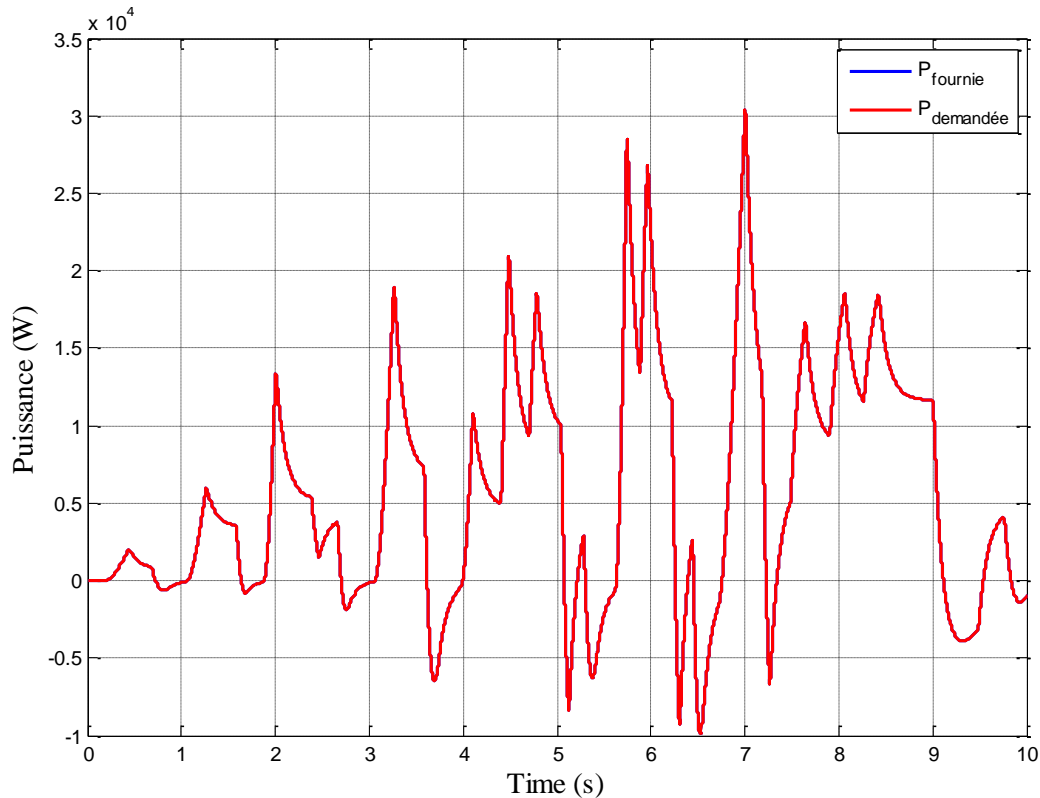


Figure 59 : conservation des puissances.

La figure 59 ci-dessus représente la conservation des puissance au niveau du système électrique telle que la puissance fournie égale a la puissance fournie , ce qui valide la gestion d'énergie faite dans notre travail, sachant que chaque source répond selon son état de charge et sa capacité pour, un assurer le fonctionnement du véhicule électrique , deux pour garder l'état de santé de la source pour augmenter sa durée de vie.

V. Conclusion :

Dans ce chapitre, on a mis au point des stratégies de commande sur la MSAP et sur les composantes d'électroniques de puissance, afin de l'appliquer sur notre véhicule hybride en mettant en évidence les sources d'énergie.

On constate que la commande vectoriel, nous a permis de rendre un model non linéaire et couplé à un model linéaire et non couplée ; ainsi on ajoutant le régulateur de type PI, il nous a permet d'obtenir de meilleures résultats, et diminuer les oscillations de couple électromagnétique.

On a vu 9 modes d'opérations, qui peuvent être identifiées (traction, freinage, arrêt) dans un véhicule hybride à pile à combustible, Ces derniers induisent des flux d'énergie différents, selon les type d'énergies utilisée (pile à combustible, batterie, supercondensateur).


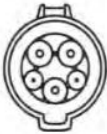

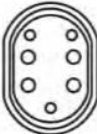



Conclusion
générale

Pendant ces trois dernières décennies le débat écologique ne cesse de s'accroître, le réchauffement climatique dû aux émissions de gaz carbonique. L'une des principales causes sont les véhicules routiers. Donc, depuis, les constructeurs automobiles se sont penchées sur la question afin de trouver une alternative à ce problème. Alors ils se sont dirigés vers les véhicules électriques avec l'avancée technologique surtout dans le domaine de la gestion et du stockage de l'énergie électrique, des nouvelles structures alternatives aux véhicules conventionnels, qui rassemble les avantages des propulsions thermique et électrique, ces derniers sont véhicules hybrides. Le but principal de ce travail était de mettre en évidence les différentes sources d'énergies électriques dans le véhicule hybride, de voir leurs avancées technologiques en termes d'autonomie qui demeure le problème majeur de ces derniers. Et de mettre en place un système de commande pour le moteur électrique qui n'est autre que la machine synchrone à aimants permanents et de simuler l'ensemble de la chaîne, et d'interpréter les résultats.

Au cours de ce travail, nous avons tout d'abord présenté un état de l'art détaillé sur le véhicule électrique puis par la suite dans le deuxième chapitre on a cité les différents organes de notre système hybride parallèle à simple arbre tant du côté électrique à savoir le moteur électrique avec les convertisseurs et les différentes sources d'énergie électrique (batterie, super condensateur, pile à combustible) et aussi d'un point de vue mécanique avec le moteur thermique ainsi que la boîte de vitesse et le différentiel. Par la suite dans le chapitre trois on a modélisé chacun des éléments ce qui nous a permis d'implanter l'ensemble sous environnement Matlab-Simulink afin de le simuler et d'obtenir des résultats dans le chapitre quatre. Cette étude nous a permis de choisir la structure à couplage parallèle à simple arbre entre le moteur à combustion interne et la machine électrique.

Annexe

Annexe 1 : Types de prises et propriétés respectives.

Prises							
	Domestique	Type1	Type 2	Type 3	Type 4 Chademo	Combo	Combo
Côté	Infrastructure	Véhicule	Infrastructure Véhicule	Infrastructure	Véhicule	Véhicule	Véhicule
Courant	AC	AC	AC	AC	DC	AC	DC
Phase	Mono	Mono	Mono/Tri	Mono Tri	DC	Mono Tri	DC
Courant Maxi	8 A	32 A	70 A	32 A	125 A	70 A Mono	125 A
Broches	3	5	7	7	10	7	2
kVA	2 kVA	3-7 kVA	3-43 kVA	3-22 kVA	50 KVA	43 kVA	50 kVA
Tension Maxi	250 V	250 V	500 V	500 V	500v	500 V	500 V

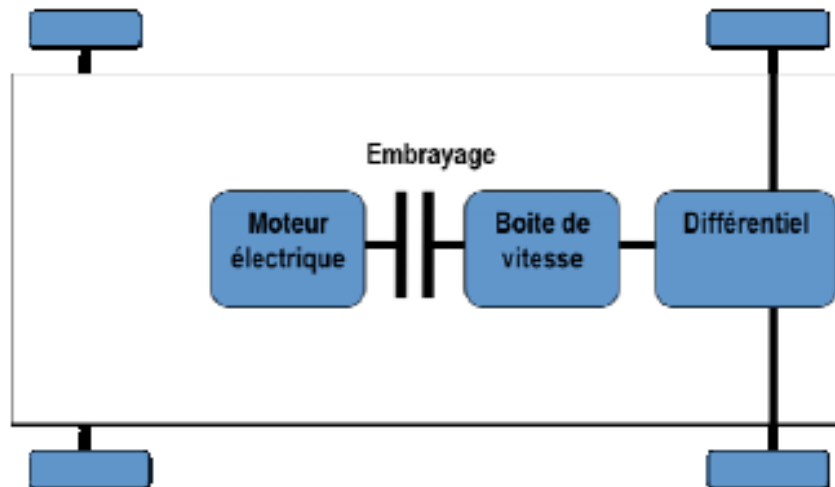
Source: HBC Group – Automotive consultancy. 2014

Annexe 2 : Types de courants et de puissances pour charger les batteries.

Durée de recharge	Alimentation	Puissance	Tension	Intensité maxi
12-14 heures	Monophasé	2kW	230 VAC	8 A
6-8 heures	Monophasé	3,7kW	230 VAC	16 A
2-3 heures	Triphasé	11kW	400 VAC	16 A
3-4 heures	Monophasé	7kW	230 VAC	32 A
1-2 heures	Triphasé	22kW	400 VAC	32 A
20-30 minutes	Triphasé	43kW	400 VAC	63 A
20-30 minutes	Continu	50kW	400 - 500 VDC	100 - 125 A

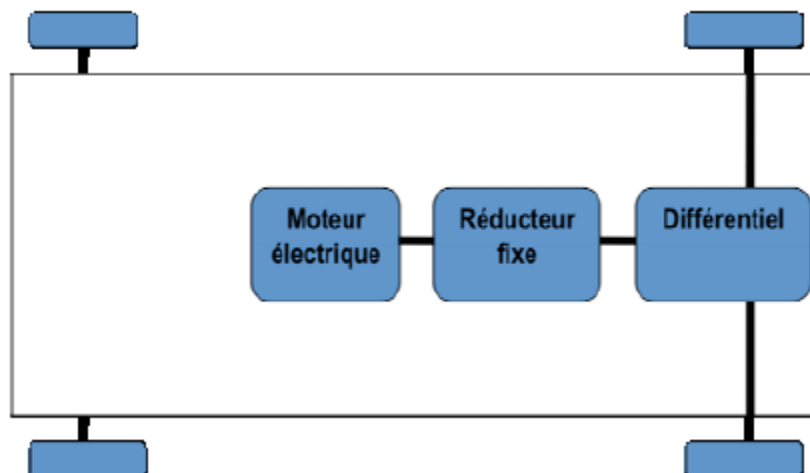
Source: HBC Group – Automotive consultancy. 2014

Annexe 3 : Architecture de véhicule électrique avec moteur unique centralisé et boîte de vitesse.



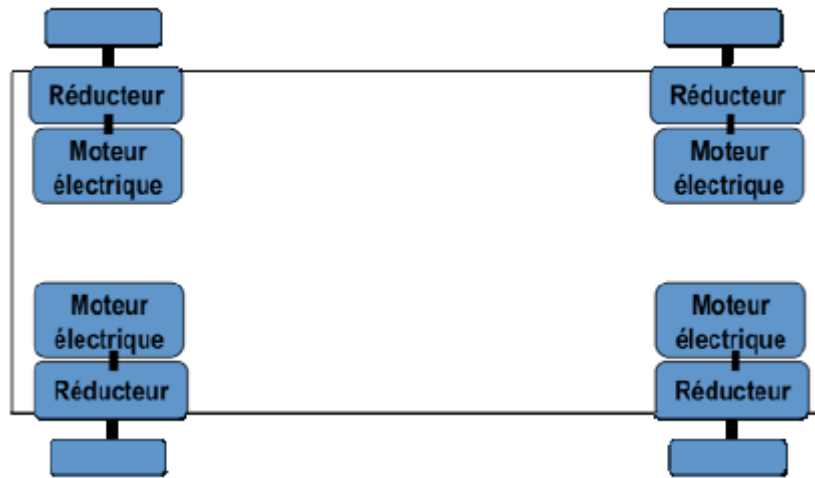
Source: Christophe ESPANET. Université de Franche-Comté, Institut FEMTO-ST Département ENISYS, Parc Technologique – 2, avenue Jean Moulin – F90000 BELFORT.

Annexe 4 : Architecture de véhicule électrique avec moteur unique centralisé et réducteur fixe.



Source: Christophe ESPANET. Université de Franche-Comté, Institut FEMTO-ST Département ENISYS, Parc Technologique – 2, avenue Jean Moulin – F90000 BELFORT.

Annexe 5 : Architecture de véhicule électrique avec moteurs à proximité des roues.



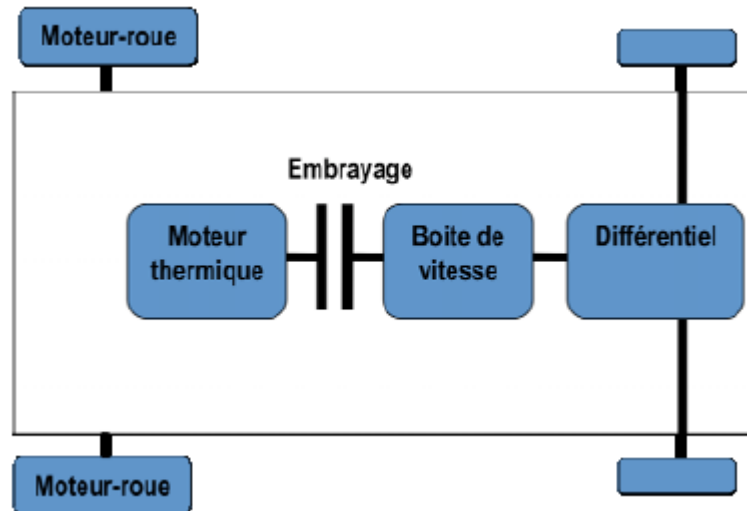
Source: Christophe ESPANET. Université de Franche-Comté, Institut FEMTO-ST Département ENISYS, Parc Technologique – 2, avenue Jean Moulin – F90000 BELFORT.

Annexe 6 : Architecture de véhicule électrique avec moteurs intégrés dans les roues.



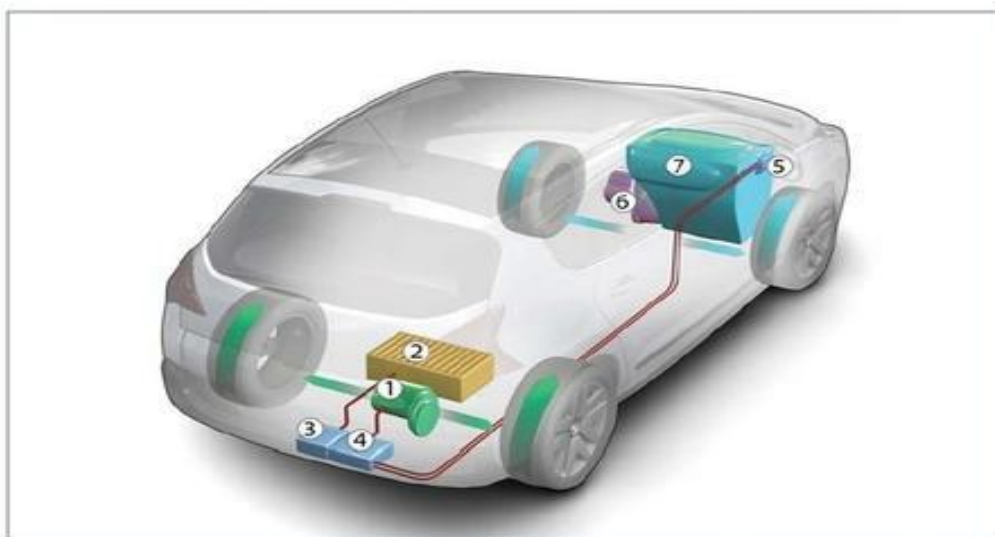
Source: Christophe ESPANET. Université de Franche-Comté, Institut FEMTO-ST Département ENISYS, Parc Technologique – 2, avenue Jean Moulin – F90000 BELFORT.

Annexe 7 : Architecture de véhicule hybride électrique simplifié avec moteurs électriques intégrés dans les roues arrière et couplage des puissances ‘thermiques’ et ‘électriques’ par la route.



Source: Christophe ESPANET. Université de Franche-Comté, Institut FEMTO-ST Département ENISYS, Parc Technologique – 2, avenue Jean Moulin – F90000 BELFORT.

Annexe 8 : Schéma fonctionnel de la Peugeot 3008 hybride.



- 1 - Moteur électrique entraînant les roues arrière
 - 2 - Pack batterie haute tension
 - 3 - Superviseur chaîne de transmission hybride (PTMIU – Power Train Management Unit)
 - 4 - Électronique de puissance (onduleur et convertisseur)
 - 5 - STOP & START haute tension
 - 6 - Boîte de vitesses mécanique pilotée à 6 rapports (BMP6)
 - 7 - Moteur thermique 2.0 l HDi FAP entraînant les roues avant
- Flux électrique

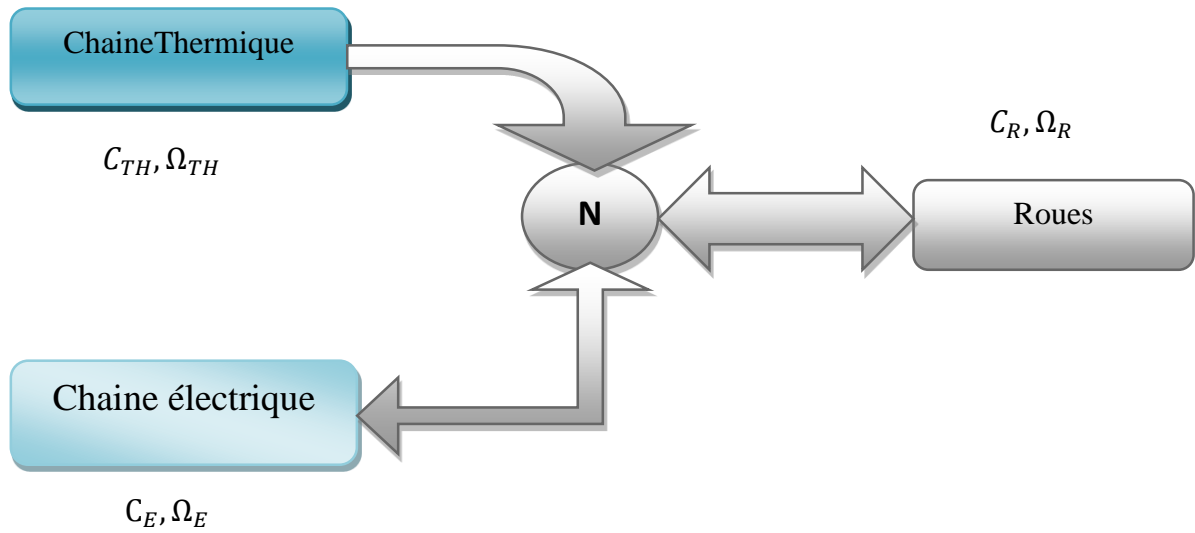
Source :

[http://www.automobilemagazine.fr/media/galleries/photos/peugeot/les_peugeot_du_futur_fuies_et_scoops/\(photo\)/432822](http://www.automobilemagazine.fr/media/galleries/photos/peugeot/les_peugeot_du_futur_fuies_et_scoops/(photo)/432822)

Annexe 9: Caractéristiques de la Peugeot 3008.

3008 HYbrid4		
MOTEURS		
2.0 I HDi FAP (traction)	Cylindrée (cm ³)	1997
	Puissance maxi	120 kW (163 ch) à 3 750 tr/min
	Couple maxi	300 Nm à 1 580 tr/min
ELECTRIQUE (propulsion)	Type	Synchrone à aimants permanents
	Puissance en continu / maxi	20 kW (27 ch) / 27 kW (37 ch)
	Couple en continu / maxi	100 Nm / 200 Nm
HDI + électrique	Puissance maxi	147 kW (200 ch)
TRANSMISSION		
Boîte de vitesses mécanique pilotée à 6 rapports (BMP6)		
PERFORMANCES (conducteur seul)		
Accélérations :	0 à 1000 m (s)	29,9
	0 à 100 km/h (s)	8,8
Reprises :	30 à 60 km/h en position auto (s)	3,0
	80 à 120 km/h en position auto (s)	6,6
	Vitesse maximale (km/h)	209
CONSOUMATIONS		
CYCLE MVEG	Réservoir de carburant (l)	60
	Cycle mixte (l/100 km)	3,8
	CO ₂ (g/km)	99
ZEV Zero Emission Vehicle	Consommation de carburant (l/100 km)	0
	CO ₂ (g/km)	0
	Autonomie maxi en vitesse stabilisée	4,5 km
DIMENSIONS (m)		
	Longueur hors tout	4,365
	Largeur caisse hors tout	1,837
	Hauteur en ordre de marche - avec les pleins	1,639
	Empattement	2,613
	Porte-à-faux AV / AR	0,916 / 0,836
	Voie AV / AR	1,532 / 1,527
ELEMENTS SPECIFIQUES		
Batterie haute tension de type Nickel Metal Hydrure, tension 200 V, capacité : 5,5 Ah		
Convertisseur 200 V au 12 V pour assurer alimentation du réseau de bord en mode ZEV		
Onduleur ; gamme de tension de fonctionnement : 150 à 270 V ; refroidissement liquide		
PTMU : superviseur GMP assurant la consommation optimale		

Source : http://www.idd-infos.fr/Technique-PEUGEOT-3008-HYBRID-4_a882.html

Annexe 10 : Echange énergétique entre MCI, ME et Roues.

Source : B. AMROUCHE «Étude et commande des véhicules hybrides parallèles», Mémoire de fin d'études, Université A.MIRA Bejaïa, 2013.

Bibliographie

- [1] : Arval, le corporate vehicle observatory France, 2010, pp.22, Tout savoir sur les véhicules électriques.
- [2] : Méthodes de gestion d'énergie pour un véhicule électrique hybride et un véhicule électrique à batteries en utilisant l'estimation en ligne de la masse, mémoire de la maîtrise en ingénierie, Khalil Maalej, l'université du Québec à Trois-Rivières, aout 2014.
- [3]: https://fr.wikipedia.org/wiki/Voiture_%C3%A9lectrique.
- [4]: Matulka, R. (2014, September 15). Energy.gov. History of the Electric Car: <https://www.energy.gov/articles/history-electric-car>.
- [5]: Curtis D. Anderson, J. A. (2010). *Electric and Hybrid Cars: A History*. McFarland; 2 edition.
- [6]: Strohl, D. (2010, June 18). *Wired.com*. Ford, Edison and the Cheap EV That Almost Was: <https://www.wired.com/2010/06/henry-ford-thomasedison-ev/>
- [7]: Thompson, C. (2015, December 17). *Tech Insider*, from the fascinating evolution of the electric-car:<http://www.businessinsider.com/electricautomobile-history-2015-12?r=US&IR=T&IR=T/#the-electric-cars-first-heyday-was-inthe-late-1800s-and-early-1900s1>
- [8]: S. Campanari, G. Manzolini, F. Garcia de la Iglesia,. 2008, p. 466,. Journal of power, Energy analysis of electric vehicles using batteries or fuel cells through well-to-wheel driving cycle simulations.
- [9]: Smith, W.J., 2010. P. 4515. Energy. Can EV (electric vehicles) address Ireland's CO2 emissions from transport?
- [10]: Von Helmlolt. R., U. Eberle, 2007, p 834, Journal of power sources. Fuel cell vehicles: Status 2007.
- [11]: <http://voiture-electrique.centerblog.net/4-les-composants-necessaires-au-fonctionnement-du-v-e>
- [12] : LOUKAKOU BOUNZEKI MBEMBA, Modélisation, Conception et Expérimentation d'un véhicule hybride léger pour usages urbains, thèse doctorat ; 2012.
- [13] : BMW [En ligne] // http://www.bmw-i.fr/fr_fr/bmw-i3/. - Novembre 2011.

[14]: Depoorter, S., & Assimon, P. M. (2011). Les véhicules électriques en perspective: Analyse coûts-avantages et demande potentielle. Commissariat Général au Développement Durable.

[15]: Sweden Green Highway [En ligne] // <http://www.swomm.info/2010/09/sweden-and-norway's-green-highway/>. - 2011.

[16]: Jean DUCLOS, Jean-Henri PIERRARD ; Vers une deuxième génération de véhicules? , Paris — 1974

[17]: Vyas Singh Chauhan, Mémoire de Master sur «Simulation de véhicule électrique incluant différents composants de groupes motopropulseurs», 7/30/2017, université technique Tchèque, Prague.

[18]:<http://www.fiches-auto.fr/articles-auto/fonctionnement-d-une-auto/s-1946-fonctionnement-d-une-voiture-electrique.php>

[19]: <http://www.techniques-pilotage.fr/dossiers/la-voiture-hybride.html>

[20]: B. Multon, 'Motorisation des véhicules électriques', Techniques de l'Ingénieur, Référence E3996, Février 2001.

[21]: H.C.M. Mai, F. Charih, F. Dubas, D. Chamagne, C. Espanet, 'Comparaison de deux types de bobinage d'une MSYAP pour la propulsion d'un véhicule hybride urbain', Électrotechnique du Futur, Compiègne, 24-25 Septembre 2009.

[22]: http://www.idd-infos.fr/Technique-PEUGEOT-3008-HYBRID-4_a882.html

[23]: https://fr.wikipedia.org/wiki/Tesla_Model_S

[24]: http://www.loveve.fr/wa_files/Pr_C3_A9sentation_20technique_20Model_20S.pdf

[25]: https://en.wikipedia.org/wiki/Honda_Clarity.

[26]: HBC Group – Automotive consultancy. 2014, Slides 9, 13, 38, 41, 42, 46, 48, 55, 56, 59, 61 - 63, 67, 69, 70, 78 - 82, 84, 85, 106.rapport des nouvelles énergies.

- [27] : J. Beretta « Le génie électrique automobile, la traction électrique », H. Science, éd. LAVOISIER.2005.
- [28] : A. Nouh « Contribution au Développement d'un Simulateur Pour Les Véhicules Electriques Routiers », Thèse de Doctorat UNIVERSITÉ de Franche Comté, 2008.
- [29] : D. Bouquain «Contribution à la modélisation et à l'optimisation des architectures des véhicules hybride», Thèse doctorat, Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, 2008.
- [30] : B. AMROUCHE «Étude et commande des véhicules hybrides parallèles», Mémoire de fin d'études, Université A.MIRA Bejaïa, 2013.
- [31] : Jack Robert, Jean Alzieu “Accumulateurs - Considérations théoriques” – Technique de L'ingénieur – D3351 – Novembre 2004.
- [32] : Daour Diop “Contribution à la gestion de l'énergie d'un véhicule hybride série” Thèse de l'université de Franche comté – Juin 2004.
- [33] : Mohamed Ansoumane Camarta “Modélisation du stockage de l'énergie photovoltaïque par supercondensateurs” Thèse de l'université de Paris Est Créteil – Juillet 2004.
- [34] : Jack Robert, Jean Alzieu “Accumulateurs - Accumulateurs au plomb” – Technique de L'ingénieur – D3351 – Novembre 2004.
- [35]: S. Thiers. Cours de piles a combustible - EPF -5eme année - septembre 2009.
- [36] : .Découverte N⁰344-345 janvier-février 2007 la pile à combustible.
- [37]: J. Larminie et A. Dicks, Fuel Cell Systems Explained, John Wiley and Sons, Inc., New York, 2003.

[38] : A. NEFFATI, Stratégies de gestion de l'énergie électrique d'un système multi source : décision floue optimisée pour véhicule électrique hybride ; Université de Toulouse III Paul Sabatier (UT3 Paul Sabatier),2013.

[39]: H. Gualous, R. Gallay, and A. Berthon. Utilisation des supercondensateurs pour le stockage de l'énergie embarquée : applications transport. In REE, 2004.

[40]: Nordine Maherzi "Etude, Conception et réalisation d'un convertisseur d'énergie DC/DC associé à des supercondensateurs" Thèse du Conservatoire National des Arts et MétiersnLYON – Novembre 2010

[41]: M.F. ROSE, C. JHONSON, T. OWENS, B. STEPHENS, "Limiting factors for carbonbased chemical double-layer capacitors", Journal of Power Sources, Vol. 47, Fasc. 3, pp. 303-312, Switzerland, 1994

[42]: J.S. LAI, S. LEVY, M.F. ROSE, "High energy density double-layer capacitors for energy storage applications", Seventh Annual Battery Conference, IEEE AES Magazine, pp. 14-19, April 1992.

[43] : J.F. FAUVARQUE, "Présentation générale des supercondensateurs à double couche électrochimique", Journées d'Etudes sur les Supercondensateurs, Paris, Février 1998.

[44] : F. Benchabane, "Commande en position et en vitesse par mode de glissement d'un moteur synchrone triphasé à aimants permanents avec minimisation du chattring", Thèse de Magister, Université de Biskra, 2005.

[45] : M. Carriere Sébastien « Synthèse croisée de régulateurs et d'observateurs pour le contrôle robuste de la machine synchrone », Thèse de doctorat, l'Institut National Polytechnique de Toulouse, France, 2010.

- [46] : D. Lahouel « Commande non linéaire adaptative d'une machine synchrone à aimants permanents » mémoire de magister, Université de Batna Algérie, 2009.
- [47] : A. Benbrahim « Commande prédictive généralisée d'une machine synchrone à aimants permanents » mémoire de magister, Université de Batna, Algérie, 2009.
- [48] : N. Bounasla «Commande par Mode de Glissement d'Ordre Supérieur de la Machine Synchrone à Aimants Permanents », Université ferhat ABBAS Sétif ,2014.
- [49] :R. Abdessemed, “Modélisation et simulation des machines électriques”, Presse de Université de Batna, 2011.
- [50] :N. Senhadji « commande du moteur synchrone à aimants permanents par backstepping » ; Université Abou Bekr Belkaid – Tlemcen ; 2015.
- [51] : M. Loucif. Commande Vectorielle Sans Capteur Mécanique A Flux Rotorique Orienté Basée Sur L'estimation De La Vitesse D'un Moteur Asynchrone Par Un Filtre De Kalman Etendu, Mémoire de Master, Université abou bekr belkaid Tlemcen, 2011
- [52] :F. Amrouche, B. Mahmah, M. Belhamel et H. Benmoussa, ‘Modélisation d'une Pile à Combustible PEMFC Alimentée Directement en Hydrogène-Oxygène et Validation Expérimentale’, Revue des Energies Renouvelables, Vol. 8, N°2, pp. 109 – 120, 2005.
- [53] : M. Belatel *, F.Z. Aissous et F. Ferhat Contribution à l'étude d'une pile à combustible de type PEMFC utilisée pour la production d'énergie électrique verte Revue des Energies Renouvelables Vol. 15 N°1 (2012) 13 – 28 13
- [54]: J.C. 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 Fuel Cell Stack’, Journal of Power Sources, Vol. 49, pp. 349 - 356, 1994.

[55] : Mamadou Bailo Camara, Super-condensateurs pour échange dynamique d'énergie a bord du véhicule électrique hybride. Modélisation, étude des convertisseurs et commande, These de l'Universite de Franche-Comte, Dec. 2007.

[56] : Mohamed.N , Sid, H. Alloui, K. Marouani M.Becherif Gestion Optimale de l'Energie d'un Système Multi-sources : Application au véhicule électrique Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables, Ghardaïa – Algérie 13 et 14 Octobre 2014

[57] : K. Nabti, “Stratégies de commande et techniques intelligentes appliquées aux machines de type synchrone”, Thèse de Doctorat, Université de Constantine, 2010.

[58] : G. Grellet, and G. Clerc, “ Actionneur électriques, principes, modèles, commande ” Eyrolles, 1997.

[59] :N.S. Amirouche, “Contribution à la commande adaptative et neuronale d'une machine synchrone à aimants permanents”, Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Polytechnique, 2007.

[60] : A. MASSOUM « Contribution à la Commande Singulièrement Perturbée d'une Machine Synchrone à Aimants Permanents : Commande à Structure Variable (CSV); Commande Neuro-Floue », Thèse de doctorat, Université de Djilali Liabes , SBA , Algerie, 2007.

[61] : R. Longchamp « Commande numérique de systèmes dynamiques », Presses Polytechnique et Universitaires Romandes ; 2006.

[62] : A. Chouchou, A. Tlemcani « Commande vectorielle avec un réglage adaptatif d'une machine synchrone a aimants permanents », PFE ; 1997.

[63] : F. Labrique, G. Segurier, R. Bausiere« Les convertisseurs de l'électronique de puissance », vol 4 ; édition TEC DOC ; 1994.

[64] : L.KHELLAFI Modélisation, Optimisation et Gestion Énergétique de l'étage d'alimentation dans les Véhicules Électriques Hybrides Thèse de doctorat UNIVERSITÉ DE BATNA 28/06/2012.

[65] : H.NEHMI optimisation énergétique en temps réel d'un véhicule à pile à combustible et supercondensateurs université du québec à trois-rivières août 2015.

[66]: B. K. « Bose power electronics and AC drives»,Printice-Hall; 1986.