

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la Recherche scientifique



Université Mohamed Khider Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrique
Filière : Electrotechnique
Option : Réseaux Electrique

Réf:.....

**Mémoire de Fin d'Etudes
En vue de l'obtention du diplôme:**

MASTER

Thème

**Etude et dimensionnement des composants
électriques d'un véhicule hybride**

**Présenté par :
Houhou Youness
Soutenu le : 06 Juin 2017**

Devant le jury composé de :

Mr Naimi Djemai

Mr Bahri Mebarek

M.^{me} Hadheri Hamida Amel

MCA

Pr

MCA

Président

Encadreur

Examineur

Année universitaire : 2016 / 2017

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la recherche scientifique



Université Mohamed Khider Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrique
Filière : Electrotechnique
Option : Réseaux Electrique

Mémoire de Fin d'Etudes
En vue de l'obtention du diplôme:

MASTER

Thème

Etude et dimensionnement des composants
électrique d'un véhicule hybride

Présenté par :

Houhou Youness

Avis favorable de l'encadreur :

Pr. Bahri Mebarek *signature*

Avis favorable du Président du Jury

Dr. Naimi Djemai

Signature

Cachet et signature

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

ملخص

السيارات الكهربائية هي إحدى الحلول المقترضة مستقبلاً لحماية البيئة و حماية الإنسان نفسه من آثار التلوث الناجم عن السيارات ذات المحركات الاحتراق الداخلي ولكن تطور السيارات مازالت بطيئة و استعمالها جد محدود لا تراه إلا في المصانع لنقل المواد الأولية و المنتجات ولهذا الغرض اخترت دراسة إحدى الجوانب السيارة وهو الجانب الطاقة الكهربائية وكيفية إنتاجها و تخزينها واستهلاكها و طريقة تسيرها . و في هذه المذكرة نقوم بدراسة خصائص المكونات الأساسية لسيارة (البطاريات، محرك كهربائي، محرك حراري) وهذا حسب منحنى السرعة، ومن خلاله استنتجنا خصائص البطاريات وطريقة تخزينها وقوة إعطائها لطاقة للمحرك الكهربائي الذي يتناسب مع منحنى السرعة.

الكلمات المفتاحية :

المركبات الكهربائية الهجين، البطاريات، محرك كهربائي، محرك حراري، التحجيم، منحنى السرعة

Résumé

Le VEH est l'une des solutions préconisées, par les constructeurs automobiles et les organismes de recherche, pour remplacer peu à peu les véhicules classiques notamment dans les centres villes. Dans ce contexte, la simulation numérique générique, rapide et précise s'impose comme le moyen incontournable dans la conception de VEH de plus en plus performants et compétitifs. Ce travail de mémoire a comme objectif principal de trouver un dimensionnement optimale des différentes composantes (batteries, moteur électrique, moteur thermique) d'une véhicule électrique par prendre en considération plusieurs contraintes à partir d'un profile de vitesse donné. Un système de rechargement est présenté pour le but d'assurer la continuité d'alimentation énergétique.

Mots-clés : véhicule électrique hybride, les batteries, moteur électrique, moteur thermique dimensionnement, profile de vitesse.

DEDICACE

Je dédie ce travail

A

Mes chers parents

Mes frères ,mes sœurs

mes collègues ,mes amies

et les personnes qui ont contribué à la

réalisation de ce travail.

REMERCIEMENTS

Tout d'abord merci au bon Dieu le tout puissant, de m'avoir donné la santé. La force, la patience et la volonté pour réaliser ce travail dans des meilleures conditions.

*Mes premiers remerciements s'adressent à mon consultant de ce mémoire, Monsieur **BAHRI MEBAREK** , professeur à l'université de Biskra département génie électrique qui a bien voulu me proposer ce thème et m'aider à sa réalisation.*

*Je remercie également aussi, **Dr.Saadi Ramzi**, **Dr. Hamoudi**, et mon collègue **Cherrad Mohamed Amir** .*

*Mes sincères remerciements aux membres du jury présidé par **Dr. Naimi Djemai** qui sont acceptés ce travail.*

*Je remercie tous les enseignants du département de **Génie Electrique***

Je remercie ma famille à qui je n'ai jamais su dire toute l'affection que j'ai pour eux, mon père, ma mère, mes frères et mes sœurs qui ont été et seront toujours présents à mes côtés, merci pour votre soutien et vos encouragements.

J'adresse mes remerciements à tous mes ami(e)s.

Merci

Sommaire

Introduction Générale	1
Chapitre I : Généralité sur les véhicules électrique hybride	
I .1. Introduction.....	5
I .2. Historique.....	5
I .3. Problématique du contrôle des véhicules hybride.....	7
I .3 .1. Les différentes architectures hybrides.....	7
A. architecture série.....	7
B. Architecture parallèle :	8
I .3.2 Les modes de fonctionnement	11
A. Le Stop-and-Start	11
B. Le mode régénération	11
C. Le mode freinage récupératif	11
D. Le mode BOOST	11
E. Le mode alternateur	11
F. Le mode thermique pur	12
G. Le mode électrique pur	12
I .4. Principaux types de véhicules hybrides.....	12
I .4.1. Le véhicule électrique avec prolongateur d'autonomie	13
I .4.2. Le véhicule thermique assisté électriquement	13
I .4.3. Le véhicule électrique hybride proprement dit	13
I .5. Hybridation des sources d'énergie embarquées.....	14
I .5.1 Principe d'hybridation des sources d'énergie.....	14
I .5 .2 Solutions d'hybridation des sources d'énergie.....	16
A. Hybridation des batteries	16
B. Bilan et choix de l'hybridation	18
I .5. 3. Couplage d'une source hybride	18

A. Architecture en cascade avec un convertisseur DC / DC coté Supercondensateur	18
B. Architecture en cascade avec un convertisseur DC / DC coté batterie	19
C. Architectures avec deux convertisseurs en cascade	19
D. Architecture avec deux convertisseurs en parallèle	20
I .6. Conclusion	21

Chapitre II : Technologies des composants de la chaine de traction hybride électrique

II .1 Introduction.....	23
II .2 Systèmes de stockage d'énergie électrique	23
II .3 Les Batteries	24
A. Batterie Plomb-acide	24
B. Batterie Nickel-cadmium.....	24
C. Batterie Lithium-ion.....	24
II .3 .1. Fonctionnement et technologies.....	27
A. L'électrolyte	28
B. L'électrode négative	28
C. L'électrode positive.....	29
II .3 .2. Grandeurs caractéristiques des batteries	30
A. La capacité	30
B. Régimes de courants de charge/décharge	31
II .3 .3. Coût des batteries Li-ion.....	32
II .4 . Le supercondensateur	33
II .4 .1. Principe de fonctionnement.....	33
II .4 .2. Technologies des Supercondensateurs.....	35
II .4 .3. Grandeurs caractéristiques des Supercondensateurs	35
A. Energie et capacité.....	35
B. Résistance interne (R_{Sc})	36
C. Etat de charge (SOC).....	36

D. État de santé (SOH).....	37
II.4 .4. Coût des supercondensateurs	37
II. 5. Les organes de traction électrique.....	38
II. 5.1. Les moteurs électriques.....	38
A. Moteurs à courant continu (MCC)	39
B. Moteurs asynchrones (MAS)	39
C. Moteurs synchrones.....	40
II. 6. Conclusion	42

Chapitre III : dimensionnement et caractéristique de VEH

III.1. Introduction	44
III.2. Cahier des charges	44
III.2.1 Cycles de conduite.....	44
A. Cycle NEDC	44
III.3. Caractéristiques et consommations du VEH.....	46
III.3.1 Dynamique du VEH	47
III.3.2 Influence de la masse de la SSE sur la consommation du VEH.....	50
III.3.3 Caractéristique et dimensionnement du moteur.....	52
III.3.4 Caractéristique et dimensionnement des batteries	52
III.3.5 Caractéristique et dimensionnement des Supercondensateur	55
III.3.6. caractéristique de génératrice de rechargement	56
III.4. Conclusions	58

Chapitre IV : modélisation et simulation d'un moteur MSAP

IV.1 Introduction.....	60
IV.2 Présentation de la machine synchrone à aimants permanents.....	60
IV.3 Domaine d'application.....	62
IV .4 Modélisation de la MSAP	62
IV.4.1 Equations de tensions et flux	63

IV.4.2 Transformation de Park	65
IV.4.3 Expression de la puissance et du couple électromagnétique :	66
IV.5 .Commande Vectorielle	68
IV.5.1 Principe de la commande vectorielle	68
IV.5.2 Bloc de compensation	70
IV.5.3 Régulation.....	71
A. Correcteur du flux	71
B. Correcteur de couple.....	72
C. Correcteur de vitesse	73
IV.6.Résultats de simulation	75
IV.7.Conclusion	76
Conclusion générale	78
Bibliographie.....	79

Liste des Figures

Chapitre I : Généralité sur les véhicules électrique

Figure. I . 1 .La Jamais Contente	5
Figure. I . 2 . La LOHNER-PORSCHE présentée à l'exposition universelle de 1900..	6
Figure. I . 3 . Véhicule hybride série.	7
Figure. I . 4 . L'architecture hybride parallèle simple arbre.....	8
Figure. I . 5 . l'architecture double arbre.....	9
Figure. I . 6 . L'architecture hybride combinée.	10
Figure. I . 7 . Spectre des différents types d'hybrides.	12
Figure. I . 8 . Principe d'hybridation des sources de stockage hybrides	15
Figure. I . 9 .Principe d'hybridation Batterie / Source de puissance.....	16
Figure. I . 10 .Architecture en cascade avec un convertisseur pour le SC	18
Figure. I . 11 .Architecture en cascade avec un convertisseur pour la batterie.....	19
Figure. I . 12 .Architecture en cascade avec deux convertisseurs en cascade	20
Figure. I . 13 .Architecture parallèle avec deux convertisseurs	21

Chapitre II : Technologies des composants de la chaine de traction hybride électrique

Figure .II . 1 .L'énergie massique en fonction de puissance massique pour différents types d'accumulateurs	25
Figure .II . 2 . Panorama des systèmes de stockage de l'énergie	26
Figure .II .3 .principe de fonctionnement d'une batterie Li-ion,	27
Figure .II .4 .matériaux actuellement utilisés dans les accumulateurs Li-ion,	29
Figure. II . 5 .Tendance coût moyen des batteries Li-ion 2010-2020	33
Figure. II . 6 .Schéma de principe du supercondensateur déchargé et chargé	34
Figure. II . 7 .Évolution du marché de supercondensateurs MAXWELL et secteurs d'applications	38

Chapitre III : dimensionnement et caractéristique de VEH

Figure. III. 1 .cycle de conduite NEDC (La vitesse en fonction du temps).....	45
Figure. III. 2 .Évolution d'accélération en fonction du temps pour une pente de (0%).....	46
Figure .III. 3 .forces sur un VE en roulement.	47

Figure. III. 4 .Évolution de la force de traction en fonction du temps pour une pente de 0% ..	48
Figure. III. 5 .Évolution de la puissance en fonction du temps pour une pente de 0%.....	49
Figure. III. 6 .profils et d'énergie nécessaires pour un VE en fonction du temps pour une pente de 0%.....	49
Figure. III. 7 .Influence de la masse du SSE sur la consommation d'un VE ((A) variation de la puissance (ΔPV) (B) variation d'élargies (ΔEV_{cons}).....	51
Figure. III. 8 .consommation d'énergie en (J) d'un VE	53
Figure. III. 9 .chaîne d'assemblage de batteries pour VE : de la cellule au pack,	53
Figure. III. 10 .l'énergie nécessaire à délivré par supercondensateurs.....	56
Figure. III. 11 .photo réal génératrice AAP 1200	57

Chapitre IV : Modélisation et simulation d'un moteur MSAP

Figure. IV. 1 .Photographie de moteur à aimants en géométries cylindriques.	61
Figure. IV. 2 .Schéma d'une machine synchrone à aimant permanent	62
Figure. IV. 3 .Machine équivalente au sens de Park	65
Figure. IV. 4 .Diagramme de phase de la MSAP dans le référentiel lié au champ tournant	68
Figure. IV. 5 .Schéma Bloc de compensation.....	71
Figure. IV. 6 .Régulation du flux	71
Figure. IV. 7 .Régulation du couple	72
Figure. IV. 8 .Régulation de la vitesse	73
Figure. IV. 9 .(A,B,C,D) représentent les résultats de simulation de la commande vectorielle appliquée a une machine synchrone (MSAP)	76

Liste des Tableaux

Chapitre I : Généralité sur les véhicules électrique

Tableau. I .1 .Caractéristiques des composants pour différents VE.....	6
Tableau. I .2 .Résumé des avantages et inconvénients des diverses architectures présentées..	14
Tableau. I .3 .Données fabricant Kokam des éléments UHP.....	17

Chapitre II : Technologies des composants de la chaine de traction hybride électrique

Tableau. II .1 .Caractéristiques des différentes batteries pour une application VE	26
Tableau. II .2 .Coût des matières premières des batteries Li-ion	32
Tableau. II .3 .Caractéristiques générales des batteries Li et supercondensateurs	35
Tableau. II .4 .Classification des principales familles des machines synchrones	40
Tableau. II .5 .Comparatif de technologies motrices électriques, + Avantage, 0 neutre, -désavantage.....	41

Chapitre III : dimensionnement et caractéristique de VE

Tableau. III. 1 .paramètres du véhicule électrique urbain,	46
Tableau. III. 2 .Résultats des calculs des paramètres.	50
Tableau. III. 3 .données fabricants des batteries Li-ion étudiées	54
Tableau. III. 4 .défroncé type des batteries.....	55
Tableau. III. 5 .Paramètre du supercondensateur	55
Tableau. III. 6 .Caractéristique génératrice AAP 1200	57
Tableau. III. 7 .dimensionnement génératrice AAP 1200	57

Introduction générale

Introduction générale

Dans son rapport de 2007, le Groupe d'Experts Intergouvernemental sur L'Evolution du Climat (GEIC) estimait que la température de la planète pourrait s'élever de 1.8°C à 4°C d'ici la fin du 21^{ème} siècle. Cette hausse des températures, liée à l'augmentation des émissions de gaz à effet de serre, notamment le dioxyde de carbone (CO₂), provoquent un accroissement de la fréquence et de l'intensité des catastrophes naturelles climatiques, la destruction de certains écosystèmes et la fonte massive des glaciers. À titre indicatif et selon le Centre National de Données sur la neige et la glace (NSIDC), la fonte des glaces a provoqué en 2008 une baisse de 33% de la surface de la banquise Arctique par rapport à la moyenne de surface minimum mesurée entre 1979 et 2000. Avec cette disparition des glaciers, c'est une partie importante de l'eau douce disponible en surface qui disparaît également.

Actuellement, le secteur des transports est à l'origine de 27% des émissions mondiales de CO₂. Il représente ainsi l'une des principales causes du réchauffement de notre planète. Pour réduire ces émissions, de nombreuses politiques ont été engagées afin d'améliorer l'efficacité énergétique des moteurs thermiques. La norme instaurée par la commission européenne, qui revoit à la baisse tous les quatre ans les émissions des véhicules neufs, et le dispositif du type « bonus-malus » écologique mis en place par le gouvernement français sont parmi les mesures qui ont poussé les constructeurs automobiles à l'amélioration des moteurs thermiques. Avec de tels dispositifs, l'Europe espère réduire de 20% les émissions de CO₂ dans le domaine du transport. Néanmoins les progrès réalisés sont insuffisants et une réelle mutation technologique est devenue nécessaire. Cette problématique est d'autant plus préoccupante que le parc automobile des pays émergents (Chine, Inde, Brésil...) est en très forte croissance. Il est donc vital de baser nos besoins énergétiques sur des sources d'énergies alternatives aux ressources fossiles productrices de CO₂ et qui sont de plus en plus coûteuses à exploiter.

C'est dans ce contexte que les constructeurs automobiles orientent leurs travaux de recherche & développement vers l'électrification des chaînes de traction. Avec l'utilisation de la technologie de motorisations toutes électriques utilisant des sources d'énergie renouvelable.

Pour l'instant, les procédés de stockage d'énergie utilisés dans les véhicules tout électriques ne permettent pas de rivaliser avec leurs homologues : faible autonomie,

longues périodes de recharge, prix d'achat important, etc.... Il est donc essentiel de lever ce verrou technologique pour permettre le développement des voitures électriques (VE).

Les batteries utilisées dans les VE de dernière génération sont basées sur la technologie Lithium-ion (Li-ion). C'est parce qu'elle a une énergie spécifique élevée ($\approx 140 \text{Wh/kg}$) que cette technologie s'est imposée sur le marché de la téléphonie mobile, informatique et maintenant de l'automobile. Cependant, ces performances en termes de temps de recharge, de durée de vie, coûts, et même d'énergie spécifique doivent progresser davantage pour pouvoir remplacer les carburants d'origine fossile (essence et diesel) dont le pouvoir énergétique est supérieur à 12kWh/kg .

Dans le domaine du transport, l'aspect d'hybridation a été initialement consacré à l'étude de la gestion d'énergie entre une source fossile et une source d'énergie électrique et à l'amélioration des performances des moteurs thermiques en présence d'un moteur électrique auxiliaire. Cependant dans cette étude, l'hybridation (batteries Li-ion/supercondensateurs) vise à améliorer les performances en termes de masse, volume, coût et durée de vie de la source d'énergie embarquée dans un véhicule électrique (VEH).

Ce travail s'intéresse pour études et dimensionnement des composants électriques d'un véhicule hybride, dimensionnement des sources de stockage d'énergie, ce manuscrit est structuré en quatre chapitres.

Le premier chapitre est dédié à une étude bibliographique concernant l'histoire du véhicule électrique et sa différente architecture possible concernant la conception interne du véhicule et ses modes de fonctionnement. Aussi le chapitre contient une partie sur l'Hybridation des sources d'énergie embarquées et une autre partie sur les convertisseurs associé aux systèmes hybrides.

Le deuxième chapitre est associé à définir les systèmes de stockage d'énergie avec détail concernant es batterie utilisé (Type, caractéristique, capacité... etc.) avec mentionner sa Vieillesse et coût, Le reste de chapitre est dédié au caractéristique des supercondensateurs et les moteurs électrique par la même façon des batteries.

Le troisième chapitre est dédié au dimensionnement des sources électrique utilisé premièrement par le choix de profil Cycle NEDC de vitesse de la véhicule et de l'adapter avec les Caractéristiques et consommations du VEH par plusieurs contraintes (le pont-influencé de

masse- accélération), Après nous aurons illustré les étapes de dimensionnement les composants choisis.

Le quatrième chapitre est dédié à la simulation du moteur choisi (MSAP) à base de logiciel MATLAB/SIMULINK avec une présentation de ses caractéristiques et modèles.

Chapitre I :

Généralité sur les véhicules

électrique hybride

I.1. Introduction

L'objectif de ce chapitre est de définir et de présenter les différentes caractéristiques du système véhicule hybride électrique avec une présentation historique sur le sujet.

Une définition générale du véhicule hybride sera tout d'abord donnée et sera accompagnée d'un court descriptif des différents types d'hybridation. L'ensemble des fonctionnalités apportées par l'hybridation électrique du véhicule sera ensuite détaillé.

I.2. Historique

L'apparition de la motorisation électrique remonte au commencement même de l'ère automobile. Les performances de ce type de motorisation furent très vite convaincantes : le 29 avril 1899, le seuil symbolique des 100 km/h fut ainsi franchi près de Paris. Le record de vitesse de 105.8 km/h fut atteint par une voiture électrique baptisée la « Jamais contente », qui était équipée de deux moteurs de 25 kW (possédant une autonomie de 85 km) et alimentée par des batteries au plomb (fournissant près de 200 V 124 a) pour un poids de 1450 kg [1].

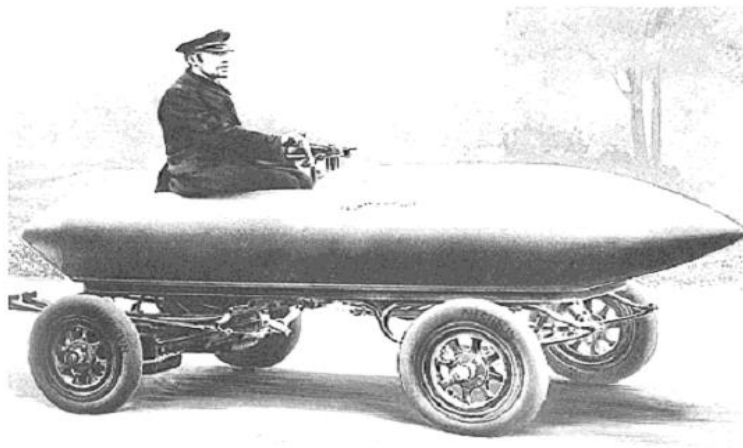


Figure. I. 1. La Jamais Contente [2]

À la même époque, Ferdinand Porsche déposa un brevet de motorisation électrique dont la spécificité était d'être incorporée aux moyeux de roues. Fruit d'une collaboration avec le constructeur automobile viennois Jacob Lochner, ce modèle se distinguait de ceux déjà existants par le fait qu'il associait motorisation électrique et thermique. En effet, le principe de ce nouveau moteur consistait à alimenter les quatre moteurs électriques au moyen d'une batterie rechargée par une dynamo, laquelle dynamo était associée à un moteur thermique. La première voiture hybride série était née [1].



Figure I.2. La LOHNER-PORSCHE présentée à l'exposition universelle de 1900 [2].

Tous les principaux fabricants des véhicules produisent des VE, dont beaucoup sont disponibles pour la vente ou à la location publique. Nombreux prototypes tels que GM EV1, Ford Think City, Toyota RAV4, Nissan Hypermini et Peugeot 106E, sont jusqu'à récemment disponibles. Ces VE utilisent des moteurs à induction, à courant continu ou des moteurs synchrones à aimants permanents ainsi que des batteries au plomb et Li-ion [1] le tableau (Tableau. I.1).

Tableau. I.1. Caractéristiques des composants pour différents VE

Type	Moteur	Batterie	Autonomie Consommation
Clio Electrique	MCC, 21.7 kW maximum, Ventilé, 16 kW permanents	NiCd, 114 V, 11.4 kWh	90 km urbains, 95 km/h maximum
Peugeot 106 Electric	MCC excitation séparée, Ventilé, 20 kW maximum, 11 kW permanents, 6700 tr/min maximum	NiCd, 120 V, 12 kWh	80 km urbains, 90 km/h maximum
BMW EI	Synchrone AP, 32 kW, 150 N.m, 8000 tr/min maximum	NaNiCl, 180 V, 21.6 kWh	160 km, 120 km/h maximum
General Motors EVI	Asynchrone à cage, Refroidi à l'eau, 100 kW à 6500 tr/min, 60 kW à 13000 tr/min (vitesse maximum)	Pb-acide, 16.8 kWh	110 km urbains 140 km route
Honda EV plus	Synchrone AP, 275 N.m à 1700 tr/min, 49 kW continus de 1700 à 8700 tr/m	NiMH, 288 V	160 km à 80% de profondeur de décharge
Chevrolet S10 pickup	Asynchrone à cage, 85 kW	Pb-acide, 312 V, 16.2 kWh	60 km urbains, 95 km route
Citroën Berlingot électrique	MCC, 28kW	NiCd, 162 V, 25 kWh	95 km urbains
Peugeot Partner électrique	moteur synchrone à aimants permanents 200 N.m 49 kW	lithium-ion d'une capacité de 22,5 kWh.	170 km. 80% de profondeur de décharge
Volvo c30	MSAP 230N.m 84Kw/111ch	lithium-ion 24Kwh 220V	Monophasé 82Kw (230v/16A)
Porsche 918 spider	MSAP 160KW	lithium-ion	-
BMW i3	MSAP 125 kW 170 ch.	batterie lithium-ion 33 kWh	12,9 kWh/100km

I.3. Problématique du contrôle des véhicules hybride

I.3 .1. Les différentes architectures hybrides

On distingue trois grandes familles d'architecture : série, parallèle et combinée. Une manière de différencier les deux premières est de considérer la nature du point de jonction entre les différentes chaînes de traction, appelé 'nœud'. Dans l'architecture 'Série', le nœud est électrique, dans l'architecture parallèle, il est mécanique [3].

A. architecture série

Ce type de véhicule est équipé d'une propulsion électrique (Figure. I.3) qui est assurée par un ou plusieurs moteurs électriques. Une source auxiliaire d'énergie permet d'effectuer les opérations de démarrages du véhicule. La source principale d'énergie assure la recharge de la source auxiliaire d'énergie et l'alimentation de la motorisation électrique. Quand on a besoin d'énergie supplémentaire, pour les reprises lors des dépassements ou dans les côtes par exemple, c'est la source auxiliaire d'énergie qui fournit ce supplément d'énergie. Le moteur thermique peut être un moteur Diesel ou à essence mais d'autres solutions sont envisagées, comme les batteries, la turbine et la pile à combustible.

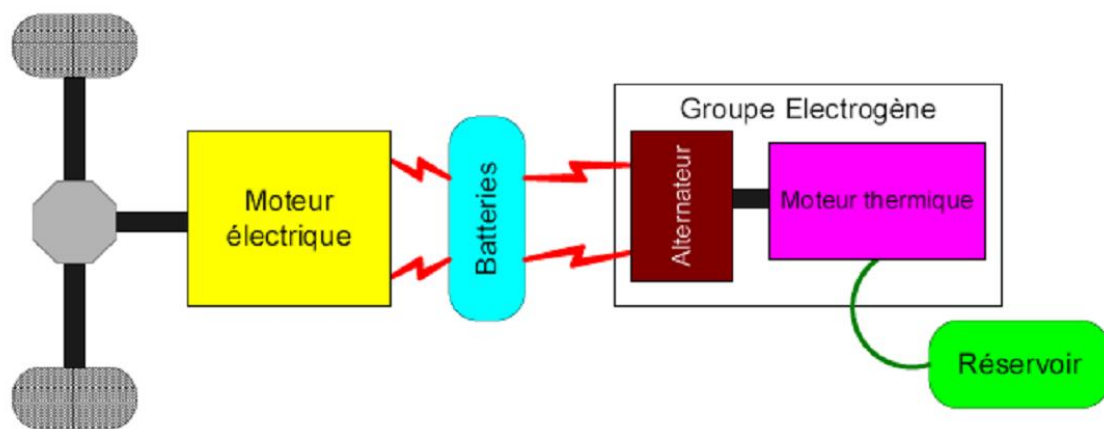


Figure. I .3: Véhicule hybride série [3]

Parmi les avantages du véhicule hybride série nous citons :

- La source principale d'énergie peut être un moteur thermique (connecté à une génératrice), des batteries, une pile à combustible....
- La liaison mécanique entre l'arbre moteur et l'axe des roues motrices est assurée via une simple boîte de vitesse.
- La possibilité d'utilisation de stratégies de contrôle simples.

- La possibilité d'utiliser deux moteurs ou même quatre, au lieu d'un, sans complexité au niveau de la transmission de la puissance aux roues.

Et parmi les inconvénients du véhicule hybride série nous citons :

- Des frais supplémentaires concernant le prix et le poids de la génératrice couplée au moteur thermique.
- Les pertes énergétiques dues à la conversion de l'énergie mécanique du moteur thermique à l'énergie électrique via la génératrice électrique.
- Le moteur de traction doit être dimensionné pour répondre à la forte demande de puissance, car il est seule source d'énergie reliée aux roues.

Un des inconvénients majeur de ce type d'architecture est le faible rendement global de l'ensemble car la puissance mécanique délivrée par le moteur thermique est tout d'abord convertie en puissance électrique par l'alternateur, éventuellement stockée dans les batteries, puis reconvertie en puissance mécanique par le moteur électrique. Cependant, du point de vue de la commande, cette architecture offre deux degrés de liberté : le régime et le couple du moteur thermique peuvent être choisis quasiment indépendamment des conditions de conduite [3].

B. Architecture parallèle :

Pour l'architecture parallèle, le point de jonction entre les différentes chaînes de traction est cette fois mécanique. Lorsque les différents moteurs sont solidaires du même arbre, via une boîte à vitesse permet la transmission de la puissance aux roues Figure. I.4, on parle d'AR

Architecture hybride parallèle simple arbre.

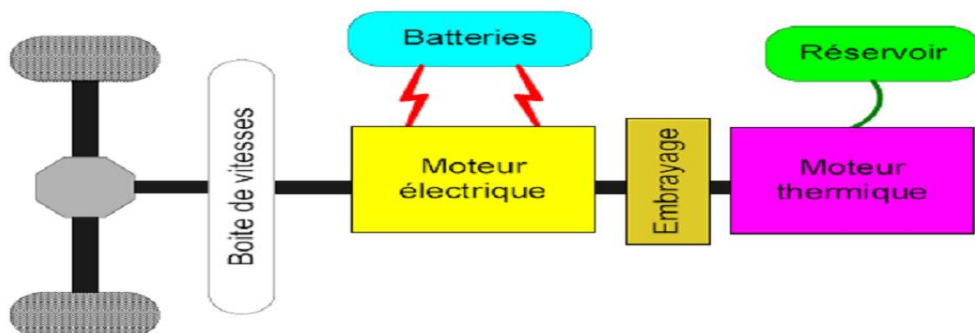


Figure. I.4:L'architecture hybride parallèle simple arbre [3].

Lorsque le moteur électrique a une très faible puissance, on parle alors d'alternateur-démarrateur et celui-ci est placé avant l'embrayage. Dans ce cas, la propulsion est quasi intégralement assurée par le moteur thermique et l'alternateur-démarrateur n'est utilisé que dans la phase de démarrage du moteur thermique. Le moteur thermique est arrêté dès que le véhicule est arrêté afin de réduire la consommation et les émissions de polluants. Lors des phases de démarrage, le moteur thermique pouvant être entraîné à régime beaucoup plus élevé qu'avec un démarreur classique, les émissions de polluants sont réduites de manière significative.

Lorsque les deux moteurs ont des puissances similaires, le moteur électrique est placé entre l'embrayage et la boîte de vitesses. Les régimes des deux moteurs sont linéairement dépendants du régime des roues. Il s'agit alors de répartir le couple aux roues nécessaire à la propulsion du véhicule entre les deux moteurs, en tenant compte des rapports de boîte. L'un des inconvénients inhérent à cette architecture est la perte de couple aux roues apparaissant lors des changements de rapports, qui dégrade le confort de conduite.

Pour remédier à cet inconvénient, la boîte de vitesses peut être remplacée par un variateur continu de vitesse. Le moteur électrique peut également être connecté sur un arbre différent, on parle dans ce cas d'architecture double arbre, Figure. I.5. On s'aperçoit que le dimensionnement des composants et la répartition de puissance sur les deux chaînes de traction sont moins contraints.

Dans l'architecture double arbre, les deux moteurs ont des régimes indépendants et à tout moment la traction du véhicule est assurée par un des deux moteurs.

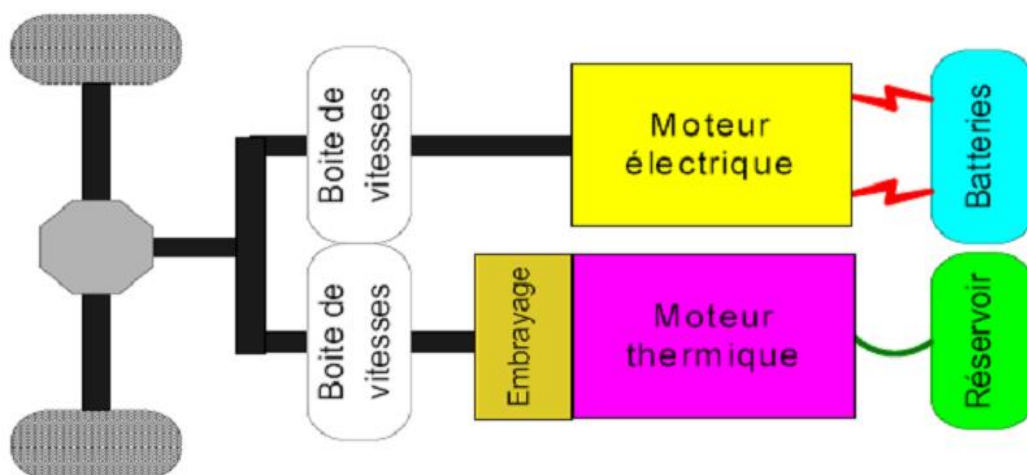


Figure. I.5: l'architecture double arbre

Lorsque le moteur électrique est relié directement aux roues, pour assurer une réduction de consommation de carburant et des émissions de polluants significative, sa puissance doit être relativement importante. L'utilisation d'un moteur électrique de moindre puissance reste possible si une deuxième boîte de vitesses est ajoutée, Figure. I.5. Cependant, pour des raisons de coût et de complexité mécanique cette dernière solution semble difficilement envisageable [4].

Dans les architectures simple et double arbre, le couple aux roues résulte de l'addition des couples fournis par les moteurs (aux rapports de réduction près). L'architecture combinée met en œuvre un train planétaire afin de réaliser une addition de vitesse, Figure. I.6.

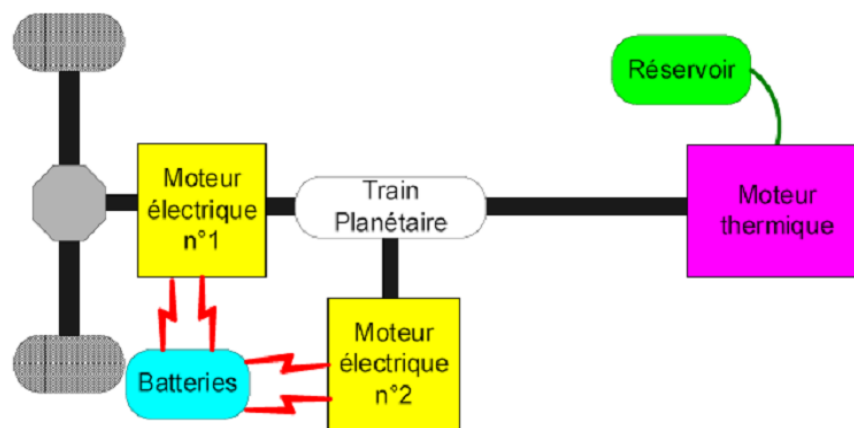


Figure. I.6: L'architecture hybride combinée.

Si seulement un moteur thermique et un moteur électrique sont utilisés, le seul degré de liberté est le choix des régimes de chacun des moteurs. Par contre, si un deuxième moteur électrique est ajouté, Figure. I.6, alors le couple et le régime du moteur thermique peuvent être choisis presque indépendamment des conditions de conduite (vitesse du véhicule, couple demandé aux roues par le conducteur).

Cette liste d'architectures est loin d'être exhaustive, mais représente les configurations les plus utilisées. D'autres ont été proposées mais elles sont généralement plus complexes (plusieurs embrayages, 3 moteurs électriques, etc.) [4].

I .3.2 Les modes de fonctionnement

A. Le Stop-and-Start :

Nommé aussi Stop-and-go ou Stop-Start selon les constructeurs, ce système permet au moteur thermique d'être démarré rapidement, et sans vibration, après un arrêt de courte durée. Cette fonctionnalité est en particulier destinée à être utilisée lors d'arrêt aux feux rouges, ou bien dans des embouteillages. Le gain apporté par ce système provient de la disparition de la consommation de carburant au ralenti, lorsque le moteur thermique n'est pas utilisé pendant plusieurs secondes. En contrepartie, une faible quantité d'énergie électrique est utilisée à chaque démarrage pour ramener le moteur à son régime de ralenti [5].

B. Le mode régénération :

Dans ce mode, le moteur électrique fournit un couple négatif, le moteur thermique fournissant alors un couple supérieur au couple de consigne (demandé par le conducteur). L'énergie provenant du moteur électrique est ensuite stockée dans les batteries, et n'est pas réutilisée ultérieurement.

C. Le mode freinage récupératif :

Il s'agit du fonctionnement d'un moteur électrique utilisé pour fournir un couple résistant, dans le but de récupérer l'énergie cinétique du véhicule sous la forme d'une énergie électrique, qui est ensuite stockée.

D. Le mode BOOST :

Le mode BOOST correspond à une assistance du moteur thermique par le moteur électrique, celui-ci développant un couple positif conjointement au moteur thermique. Ce mode peut être actionné pour décharger le moteur thermique et le placer sur un point de fonctionnement de meilleure efficacité. Il peut aussi être utilisé lors d'une importante demande de couple, lorsque le moteur thermique développe un couple insuffisant par rapport au couple de consigne.

E. Le mode alternateur :

Le mode alternateur correspond au fonctionnement classique d'un alternateur que l'on trouve sur chaque véhicule. Au lieu d'imposer un couple au moteur électrique, on impose une consigne de tension aux bornes de la batterie (ou aux bornes de la super capacité),

le moteur électrique se chargeant ensuite de réguler cette tension. Ce mode n'est pas optimal d'un point de vue énergétique, puisqu'il est utilisé, sur les véhicules traditionnels, quel que soit le point de fonctionnement du moteur thermique, même lorsque celui-ci est au ralenti.

F. Le mode thermique pur :

Il s'agit du mode classique durant lequel le moteur électrique n'est pas utilisé. Ce mode peut être utilisé pour des raisons de rendement (par exemple, lors d'un trajet sur autoroute, pour lequel le moteur thermique est utilisé à un bon rendement), ou bien parce que la batterie est déchargée.

G. Le mode électrique pur :

Il s'agit du mode pour lequel le moteur thermique est arrêté. Dans ce mode, les conséquences directes sont l'absence de bruit, l'absence de rejet de polluants ("zéro émission"), et une consommation de carburant nulle. La durée durant laquelle ce mode pourra être actif dépend de la capacité de la batterie. Si celle-ci est faible, ce mode pourra être activé durant quelques minutes tout au plus, le moteur thermique devant alors être rallumé pour ramener la batterie à un état de charge correct.

I.4. Principaux types de véhicules hybrides

Comme la montre la Figure. I.7, trois types de véhicules électriques hybrides sont communément identifiés suivant le poids relatif des deux sources d'énergie : le véhicule électrique avec prolongateur d'autonomie, le véhicule thermique assisté électriquement et le véhicule hybride proprement dit [6].

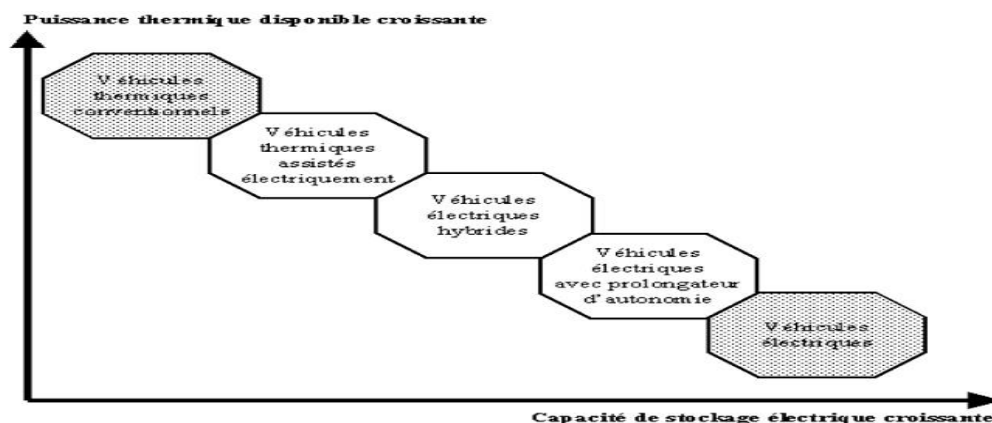


Figure. I.7: Spectre des différents types d'hybrides.

I .4.1. Le véhicule électrique avec prolongateur d'autonomie :

Le véhicule électrique avec prolongateur d'autonomie ou range extendeur, est un hybride de type série, avec une utilisation très proche du véhicule électrique. Il s'en distingue par une capacité à rouler hors des plages d'autonomie de la batterie. Pour cela, il est équipé avec une batterie de grande taille et un petit moteur thermique. Suivant l'option choisie, le moteur thermique peut fournir la puissance permettant au véhicule de continuer à fonctionner lorsque la batterie est déchargée, mais avec un niveau de puissance maximale réduit : le véhicule est alors majoritairement utilisé comme un véhicule électrique. Une autre solution consiste à fournir la puissance moyenne nécessaire au fonctionnement du véhicule par le moteur thermique et le complément par rapport à la puissance demandée par la batterie. Le fonctionnement du véhicule dans ce cas est majoritairement effectué en mode hybride .

I .4.2. Le véhicule thermique assisté électriquement :

Situé à l'autre bout du spectre des hybrides et très proche du véhicule conventionnel, le véhicule thermique assisté électriquement ou power assisté utilise un système de propulsion électrique en plus du moteur thermique pour diminuer les émissions et la consommation de carburant ; c'est un hybride de type parallèle. Le moteur thermique doit dans ce cas être capable de fournir la puissance moyenne nécessaire au véhicule pour fonctionner dans toutes les conditions de circulation .

I .4.3. Le véhicule électrique hybride proprement dit :

Le véhicule électrique hybride désignera par la suite un véhicule possédant deux sources d'énergie d'égale importance. Cet hybride a donc la capacité de rouler uniquement en électrique grâce à une batterie permettant de parcourir une distance en tout électrique significative et possède un moteur thermique suffisamment important pour fournir la puissance nécessaire à toutes les conditions de circulation. C'est l'hybride le plus flexible puisqu'il peut opérer comme un véhicule électrique (avec éventuellement une recharge de la batterie la nuit) et peut aussi être utilisé pour de longs trajets sans la limitation d'autonomie de la batterie. Après cette description des véhicules hybrides suivant trois critères, architecture, modes de fonctionnement et dimensionnement, regardons les catégories de véhicule hybride étudiées .

Une confrontation des différentes configurations est présentée dans le tableau (Tableau. I.2).

Tableau. I.2. Résumé des avantages et inconvénients des diverses architectures présentées

Configuration	Avantages	Inconvénients
- Hybride Série	<ul style="list-style-type: none"> - Autonome - puissance comparable au véhicule thermique - batterie largement sous-dimensionnée - fonctionnement en mode zéro émission 	<ul style="list-style-type: none"> - l'importance du système de motorisation - masse élevée - coût élevé
- Hybride Parallèle	<ul style="list-style-type: none"> - autonome et performant - taux d'émission zéro en mode électrique - moins polluant 	<ul style="list-style-type: none"> - encombrement élevé du système de motorisation - masse élevée - coût élevé
- Hybride combinée.	<ul style="list-style-type: none"> - autonomie élevée - le plus commercialisé - comparable aux ICE Véhicules - moins polluant 	<ul style="list-style-type: none"> - complexité de la gestion d'énergie - complexité d'agencement entre ses composants - coût et masse élevés
- Tout Electrique	<ul style="list-style-type: none"> - zéro émission - silencieux - confort d'utilisation 	<ul style="list-style-type: none"> - problème d'autonomie - utilisation urbaine - coût élevé

I.5. Hybridation des sources d'énergie embarquées

Par analogie avec les véhicules thermiques hybrides, l'hybridation n'intervient pas au niveau de la motorisation mais en amont au niveau des sources de stockage d'énergie [7]. Le principe consiste à combiner deux technologies de stockage complémentaires (énergie spécifique élevée pour la première, puissance spécifique importante et disponible sur des durées adaptées, pour la seconde). Elle permet en particulier, de dissocier les dimensionnements en puissance moyenne et en puissance transitoire. Un véhicule à batteries électrochimiques utilise ainsi en complément une source secondaire d'énergie électrique réversible en puissance, telle que des supercondensateurs ou une batterie haute puissance afin d'améliorer les performances du stockeur d'énergie et l'adapter aux besoins spécifiques du transport [8].

I.5.1 Principe d'hybridation des sources d'énergie

La densité énergétique et la densité de puissance sont des critères principaux pour choisir le système de stockage d'un véhicule électrique. Le diagramme de Ragone (Figure. I.8) illustre les performances en termes d'énergie spécifique et de puissance spécifique des

différentes technologies de stockage d'énergie électrique. À combustible et les batteries possèdent une grande densité d'énergie mais une faible densité de puissance.

A l'autre extrémité du diagramme, on trouve les supercondensateurs qui possèdent de grandes densités de puissance mais de faibles densités d'énergie. On peut également remarquer qu'il n'existe pas dans ce diagramme de systèmes ayant intrinsèquement de bonnes performances sur les deux axes à la fois. Or pour une application comme le véhicule électrique utilisant une seule source d'énergie (solution mono-source), cela pose problème.

On est en général amené à sur-dimensionner le dispositif de stockage, ou à limiter les performances en transitoire, ce qui impose de faire des compromis au niveau du volume et de la masse. Une solution alternative est d'associer deux sources entre elles : la première de forte densité d'énergie et la seconde de forte densité de puissance afin de permettre de combler une partie du vide laissé dans le diagramme de Ragone. On synthétise ainsi un nouveau système de stockage, dit « hybride » .

Cette solution d'hybridation des sources permet d'exploiter les performances de deux systèmes de stockage et donne des degrés de liberté lors de la conception de ce stockeur. On peut ainsi avoir pour objectif de maîtriser différents critères comme le volume, la masse, le coût d'investissement ou d'utilisation, ou encore sa durée de vie. Le principe d'hybridation des sources de stockage est illustré en Figure. I. 8. Il est formé de deux sources et d'un système de gestion réalisé à base de convertisseurs d'électronique de puissance permettant de gérer les flux de puissance entre les deux sources.

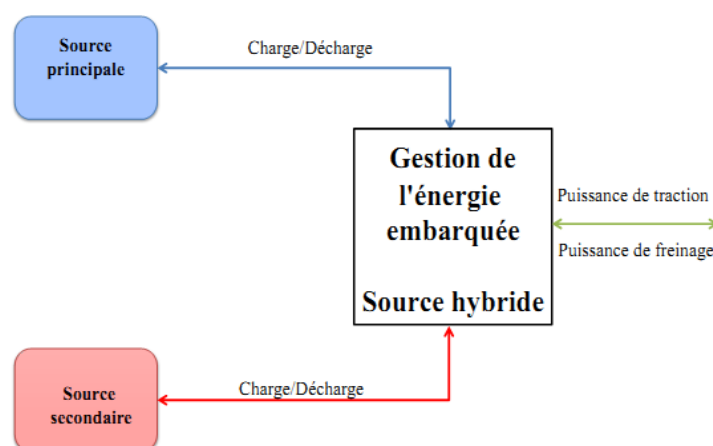


Figure. I. 8: Principe d'hybridation des sources de stockage hybrides

I.5.2 Solutions d'hybridation des sources d'énergie

L'hybridation des sources consiste à combiner deux sources ou plus. Ceci permet de proposer un très grand nombre de solutions tant au point de vue de la structure que de la gestion des flux d'énergie. En conséquence, le comportement global du système dépend à la fois du positionnement et du choix des dispositifs de stockage au sein de la source hybride. Des solutions pour hybrider les sources d'énergie couramment rencontrées en traction comme les batteries électrochimiques.

A. Hybridation des batteries

Comme vu auparavant, l'hybridation au sens énergétique se définit comme l'association de deux sources présentant des propriétés complémentaires. Dans ce contexte, les performances en puissance des batteries à Haute densité de Puissance (HP) ou des supercondensateurs, donne à ces composants la possibilité d'être associés avantageusement avec les batteries à Haute densité d'Énergie (HE) pour réaliser une source de stockage hybride. La particularité des batteries HE est qu'elles peuvent offrir une énergie spécifique beaucoup plus importante que celle des batteries HP et des supercondensateurs. Elles ont cependant l'inconvénient d'être « peu » réversible en courant et d'avoir de mauvais rendement à fort courant de décharge. Le principe d'hybridation Batteries / Sources de puissance est illustré sur la Figure. I. 9. [8].

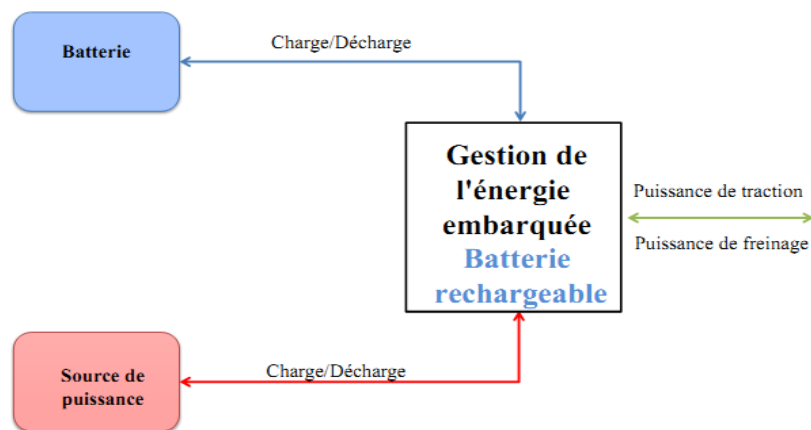


Figure. I. 9 : Principe d'hybridation Batterie / Source de puissance

Dans le domaine du transport, l'hybridation des batteries avec des supercondensateurs offre de bonnes performances en termes d'autonomie, de puissance disponible, de continuité de service. Cette hybridation permet d'obtenir un système de stockage électrique ayant une

forte densité de puissance et une forte densité d'énergie. De ce fait, on aboutit à de meilleures performances, notamment en termes de dimensionnement ou de durée de vie, qu'un système composé de batteries seules, comme c'est le cas dans la plupart des véhicules électriques actuels [9].

Une nouvelle technologie de batterie Li-ion, de type Ultra Haute Puissance (UHP), est apparue très récemment sur le marché des batteries de traction électrique. Cette technologie concurrence directement les supercondensateurs en termes de puissance massique, mais possède des énergies massiques bien plus élevées. Le Tableau. I. 3 présente les caractéristiques des batteries UHP du fabricant DowKokam.

Tableau. I. 3: Données fabricant Kokam des éléments UHP [10].

Batteries	Ko40HP
abriant	DowKokam
Tension nominale (V)	3.7
Capacité nominale (Ah)	0,45
Résistance interne (mΩ)	17
Courants Max charge/décharge	22,5/22,5
Energie spécifique (Wh /Kg)	119
Masse (kg)	0,014
Volume (l)	0 ,0073
Coût (€)	4,6

Selon , l'utilisation des batteries UHP à la place des supercondensateurs dans une source de stockage hybride en traction électrique permettrait d'obtenir une source d'énergie embarquée ayant une forte densité de puissance et une forte densité d'énergie. Elle permettrait également de réduire la masse de source de 10% par rapport celle de la source hybride batteries/supercondensateurs, ainsi que le volume et le coût de la source d'énergie embarquée de 20% et 22% respectivement. Ceci s'explique par la densité d'énergie des batteries UHP plus importante que celle des supercondensateurs. Par contre, leur fiabilité et leur durée de vie face aux supercondensateurs reste à valider et devra faire ultérieurement l'objet de travaux expérimentaux pour mieux cerner les performances de ce stockeur électrochimique pour ce contexte applicatif en prenant en compte l'ensemble des contraintes et facteurs [10].

B. Bilan et choix de l'hybridation

L'hybridation des technologies de stockage répondant aux critères techniques et économiques varient considérablement selon le cahier des charges de l'application. Pour ce qui concerne le véhicule électrique, les paramètres clés pour ce choix sont :

- Les performances en termes de densité de puissance et densité d'énergie.
- La durée de vie, la fiabilité, la sécurité d'utilisation.
- Le coût en investissement mais aussi en fonctionnement.

I.5.3. Couplage d'une source hybride

Différentes architectures électriques sont possibles pour associer ces sources d'énergie et gérer les flux de puissances des deux sources : elles peuvent être en parallèle, ou en cascade, et avec un ou deux convertisseurs. Le choix de l'architecture est principalement justifié par la simplicité de la réalisation du système et le coût global qu'elle entraîne. La partie suivante, présente succinctement les architectures les plus fréquemment rencontrées dans le domaine de l'automobile pour ces sources hybrides [11] .

A. Architecture en cascade avec un convertisseur DC / DC coté Supercondensateur

La batterie est connectée directement au bus continu alors que le pack supercondensateurs est lui connecté via un convertisseur DC/DC (Figure. I. 10) .Cette solution présente un intérêt en termes de volume et de coût puisqu'elle ne comporte qu'un seul convertisseur d'interface. Le contrôle énergétique est relativement simple. La tension du bus continu est stabilisée par la batterie, mais ne permet pas de contrôler directement son courant en cas de forte demande de puissance ou de court-circuit de la charge [12].

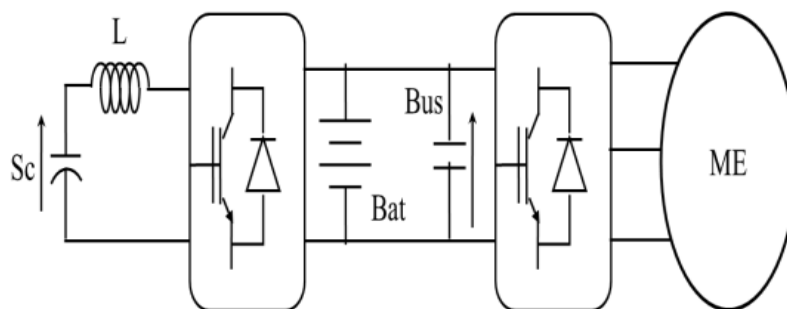


Figure. I. 10: Architecture en cascade avec un convertisseur pour le SC [13].

B. Architecture en cascade avec un convertisseur DC / DC coté batterie

Dans cette configuration, la connexion directe du pack de supercondensateurs au bus continu est présentée dans la Figure. II. 11 permet de protéger la batterie et limiter le transit de puissance traversant le convertisseur. Par contre la tension du bus continu est bien plus variable que dans le cas précédent car, si on souhaite exploiter au mieux l'énergie des supercondensateurs. Généralement, cette topologie est utilisée pour l'assistance au démarrage des véhicules thermiques mais, pour les raisons évoquées précédemment, elle est inadaptée pour une alimentation de véhicule électrique [14].

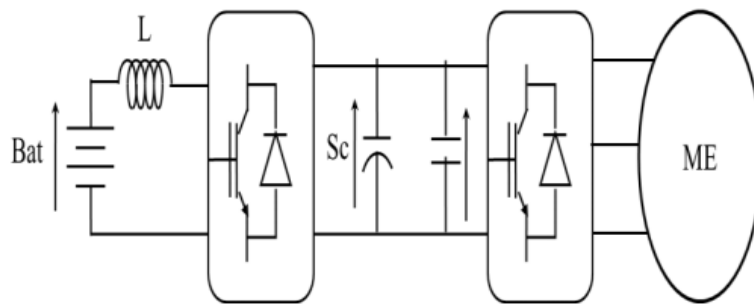


Figure. I.11: Architecture en cascade avec un convertisseur pour la batterie

C. Architectures avec deux convertisseurs en cascade

La Figure. II. 12 présentes les topologies utilisant deux convertisseurs en cascade. Dans ce cas, le deuxième convertisseur permet de limiter les variations de tension du bus continu. Pour la première version (A), la batterie est disposée en dernière position par rapport à la charge.

Le convertisseur 1 doit gérer les pics de puissance vus par les supercondensateurs. Le convertisseur 2 voit la totalité de puissance le traverser. La puissance apparente des deux convertisseurs est donc importante. De plus, cette solution présente peu d'intérêt car la variation de tension de la batterie est relativement faible.

L'utilisation de deux convertisseurs est plus justifiée pour la seconde version (B). D'une part, le convertisseur 1 ne voit que la puissance limitée de la batterie, et d'autre part le convertisseur 2 voit la même puissance transitée que pour la solution précédente. Par contre, du fait de la forte variation de la tension aux bornes des supercondensateurs, des courants importants circulent dans ces deux convertisseurs pour une puissance donnée.

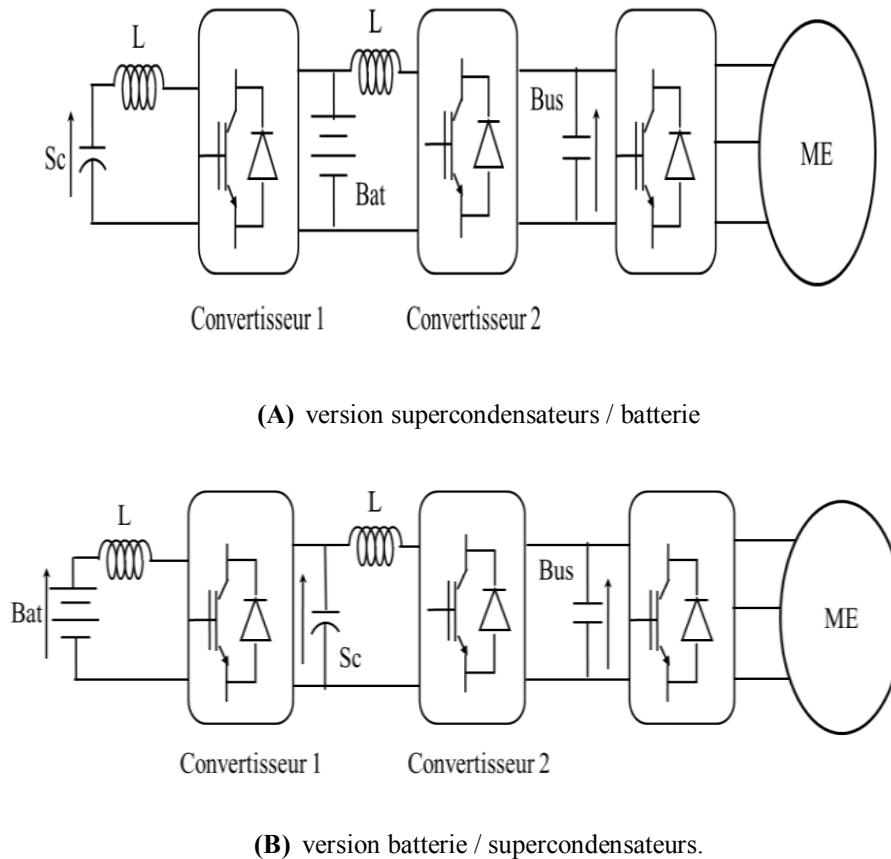


Figure. I.12: Architecture en cascade avec deux convertisseurs en cascade

Toutes ces contraintes engendrent un coût global plus important et un rendement a priori plus faible. Enfin, la fiabilité de ces configurations à deux convertisseurs en cascade face à une défaillance de l'un des éléments du système de stockage est très limitée [14].

D. Architecture avec deux convertisseurs en parallèle

En mode parallèle, les deux éléments du système hybride de stockage (batterie/supercapaciteurs) sont connectés indépendamment au bus continu par leur propre convertisseur DC/DC (Figure. II. 13).

Cette topologie présente certains avantages :

- contrôle indépendant des courants des deux stockeurs
- limitation de leurs puissances de dimensionnement
- tolérance aux défauts

Les convertisseurs étant en parallèle, l'architecture peut encore fonctionner même si des pannes surviennent au niveau d'un des convertisseurs, ce qui augmente la fiabilité du système

global. Dans le cas d'une défaillance d'un des convertisseurs, il suffit de by-passer celui-ci et de passer en mode dégradé. On se retrouve alors dans le cas d'une des configurations décrite précédemment, à savoir l'architecture en cascade avec un convertisseur DC / DC coté Supercondensateur ou batterie.

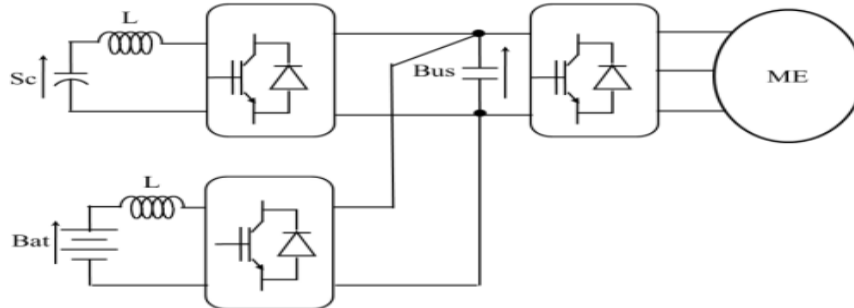


Figure. I. 13: Architecture parallèle avec deux convertisseurs

I.6. Conclusion

Dans ce chapitre, Nous avons vue une présentation historique de VEH, Après, une présentation des différentes architectures hybrides et des modes de fonctionnement possibles a été faite pour choisir le meilleur qui peut être adapté avec notre système.

Le chapitre est clôturé par une illustration des Principaux types de véhicules hybrides.

Le 2^{ème} chapitre est consacré à l'étude générale des caractéristiques des sources électrique et leurs aspects technologiques.

Chapitre II :

Technologies des composants de la chaîne de traction hybride électrique

II.1 Introduction

Ce chapitre aborde les principaux composants de la chaîne de traction du véhicule hybride électrique. L'objectif est ici de réaliser un état de l'art des technologies étant aujourd'hui utilisées dans l'électrification du véhicule pour chacun des composants de la chaîne de traction (moteur thermique, batterie, machine électrique, électronique de puissance, transmission). En se basant sur la maturité de la technologie, son adéquation avec l'architecture du véhicule, une technologie sera alors sélectionnée pour chaque composant afin d'être utilisée dans la suite de la mémoire.

II.2 Systèmes de stockage d'énergie électrique

Il existe plusieurs moyens de stocker de l'énergie électrique. Les batteries sont les plus utilisées dans les applications embarquées. De nombreuses technologies de batteries, définies par le couple électrochimique, sont proposées par les fabricants : Plomb-Acide, Ni-Cd, Ni-MH, Li-ion...etc. Ces deux dernières sont particulièrement utilisées pour l'alimentation des véhicules électrifiés. Pour les VEH, le rôle de la batterie est d'assurer les pics de consommations notamment dans les phases d'accélération et de freinage. Pour ce besoin spécifique, la technologie Ni-MH est la mieux adaptée pour ce type de véhicules grâce notamment à un coût financier qui est plus faible que les batteries Li-ion.

Cependant, la technologie Li-ion a supplanté les batteries NI-MH dans les applications de véhicule tout électrique (cas de notre étude). En effet, le VE a pour seule source d'énergie le pack de batteries, et à volume égal les batteries Li-ion stockent davantage d'énergie ce qui offre une autonomie plus importante au VE.

Dans cette partie, nous nous intéresserons aux systèmes de stockage à base de batteries.

Le principe de fonctionnement, les caractéristiques et les indices d'état utilisés pour la surveillance des accumulateurs Li-ion seront présentés. Afin de situer précisément la problématique de ce travail, on met un accent sur le vieillissement et les performances des matériaux constituant les batteries pour montrer les différences existantes entre les batteries de type : haute puissance, ultra haute puissance et haute densité d'énergie. Par la suite, le fonctionnement et les caractéristiques des supercondensateurs seront présentés, car c'est un élément qui est souvent évoqué comme source de compensation de puissance instantanée dans des applications à puissance fluctuante [10].

II .3 Les Batteries

Pour les véhicules électriques, la technologie utilisée actuellement est celle des batteries respectant les conditions suivantes [15].

- une bonne puissance massique (rapport puissance/poids en W/kg) permettant de bonnes accélérations.
- une bonne énergie massique (Wh/kg) synonyme d'une bonne autonomie.
- une tension stable engendrant des performances régulières.
- une durée de vie élevée, calculée en nombre de cycles de chargement/déchargement, conduisant à une diminution du coût pour l'utilisateur, entretien faible et recyclage facile.

Bien que la littérature technique décrive de nombreux accumulateurs, seules les batteries plomb-acide, nickel-cadmium et Lithium-ion sont aujourd'hui industriellement utilisables [16].

A. Batterie Plomb-acide

Inventée en 1859, est à la fois la batterie la plus ancienne et la plus utilisée des accumulateurs électrochimiques. Sa tension par élément est de 2V. Sa version pour automobile, beaucoup plus récente (1970-1975). Aujourd'hui, la batterie au plomb est la technologie la plus répandue dans les applications automobiles car elle est la plus mature, la moins onéreuse et la plus facile à recycler. Cependant, cette technologie présente une énergie massique faible, elle est polluante et son recyclage n'est pas rentable. Elle tend donc à disparaître compte tenu des contraintes environnementales de plus en plus drastiques.

B. Batterie Nickel-cadmium

Inventée en 1904, cette batterie est la plus performante des batteries électrochimiques et la plus largement commercialisée. Sa tension par élément est de 1.2 V. La France est la plus grosse consommatrice de batteries Nickel-Cadmium au monde pour ses véhicules électriques du groupe PSA-Renault. Réputées performantes et fiables, les batteries Ni-Cd souffrent cependant d'un effet mémoire et cette technologie est très polluante à cause de sa composante Cadmium.

C. Batterie Lithium-ion

Les batteries lithium-ion demeurent l'espoir principal du véhicule électrique pur. En effet, seul ce système pourrait, dans l'état actuel des connaissances, permettre d'augmenter considérablement l'autonomie des véhicules électriques purs grâce à ses performances massiques et volumiques de capacité énergétique. Ce système présente la tension élémentaire

Chapitre II : Technologies des composants de la chaîne de traction hybride électrique

la plus élevée (4 volt/élément, à comparer à 2V, 1V et 1,2V pour respectivement les technologies plomb, Ni/Cd et Ni/MHx). Cette haute tension élémentaire reflète la très haute réactivité du couple électrochimique mis en jeu et illustre un des inconvénients majeurs de cette technologie : la sécurité. En effet, un système élaboré de sécurité doit être associé à ce type de pile pour éviter tout dépôt de Li métal, lors de la recharge en particulier. Ce système doit gérer chaque élément séparément pour éviter tout déséquilibre de charge et établir un compromis idéal entre capacité résiduelle et sécurité. Ces systèmes de gestion, le plus souvent électroniques, tendent à augmenter considérablement le coût de la technologie. L'autre paramètre critique des batteries lithium-ion réside dans le compromis coût/durée de vie. En effet, pour obtenir des durées de vie raisonnables pour l'application véhicule électrique pur (supérieures à mille cycles), il faut ajouter à l'électrode positive des additifs augmentant dramatiquement le coût de la batterie. Des véhicules ont cependant déjà été produits, avec, en particulier, l'Altran EV de Nissan en 1998.

Le diagramme de la figure (Figure .II .1) où l'énergie massique est représentée en fonction de la puissance massique, donne une bonne représentation des performances relatives des différents couples électrochimiques [17].

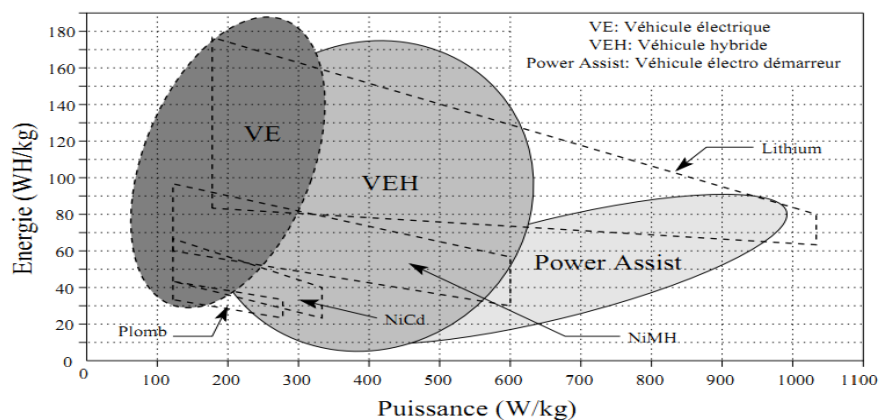


Figure .II .1 : L'énergie massique en fonction de puissance massique pour différents types d'accumulateurs

Le tableau (Tableau. II .1) présente les différentes caractéristiques pour différents types de batteries utilisées dans les véhicules électriques et hybrides [1].

Chapitre II : Technologies des composants de la chaîne de traction hybride électrique

Tableau. II .1 : Caractéristiques des différentes batteries pour une application VE

Batteries	Energie Wh/kg	Puissance W/kg	Rendement%	Cycle de vie	Coût US\$/kWh
Plomb-acide	35-50	150-400	80	500-1000	100-150
Nickel-cadmium	30-50	100-150	75	1000-2000	250-350
Nickle-métal-hydrure	60-80	200-300	70	1000-2000	200-350
Aluminium-air	200-300	100	<50		
Zinc-air	100-220	30-80	60	500	90-120
Sodium-sulfure	150-240	230	85	1000	200-350
Sodium-nikel-chlorure	90-120	130-160	80	1000	250-350
Lithium-polymère	150-200	350		1000	150
Lithium-ion	80-130	200-300	>95	1000	200

Choix

Aujourd'hui la plus mature parmi les batteries candidates aux applications puissance est incontestablement la batterie Ni-MH. Elle répond correctement aux besoins du véhicule hybride et elle est aujourd'hui disponible.

En ce qui concerne la batterie Li-ion puissance, elle a de très bonnes performances, mais des efforts doivent être faits pour améliorer les coûts. Pour les applications tout électriques les batteries Li-ion et Ni-MH sont également préconisées. Des véhicules électriques de batteries Ni-MH sont d'ailleurs aujourd'hui commercialisés.

La batterie lithium-polymère est très prometteuse de par ses performances élevées et son coût potentiellement raisonnable. Elle n'existe actuellement qu'au stade de prototype de présérie. Toutefois, par sa nécessité de devoir assurer une température de fonctionnement élevée, son utilisation pour des applications de traction électrique reste problématique.

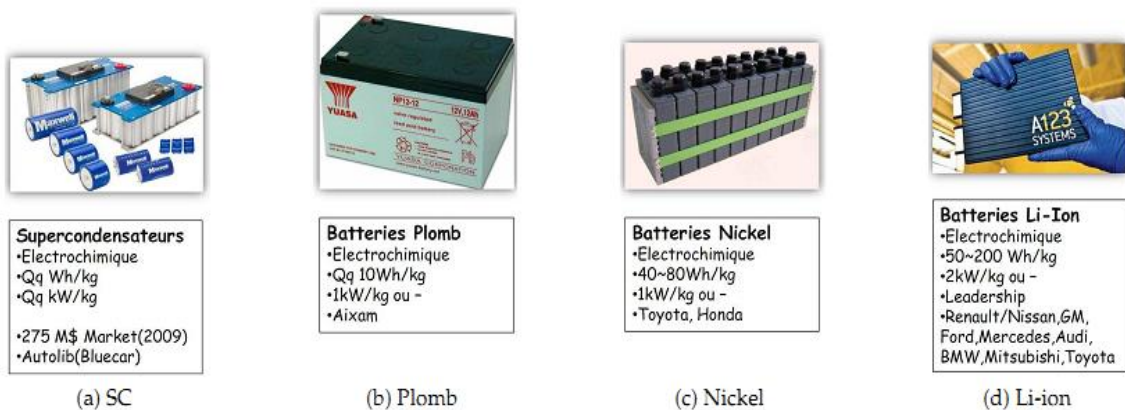
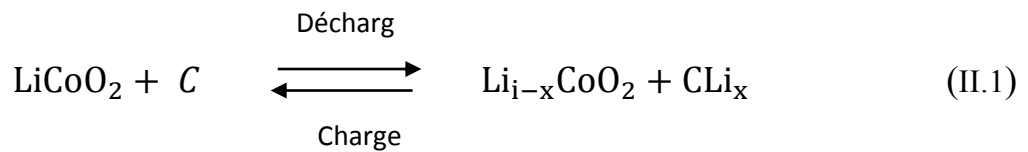


Figure .II .2 : Panorama des systèmes de stockage de l'énergie

II .3 .1. Fonctionnement et technologies

Dans l'accumulateur Li-ion, le lithium est inséré sous forme d'ions (Li^+) dans la structure cristalline, généralement en graphite, de l'électrode négative. C'est ce procédé d'insertion qui différencie la batterie Li-ion de la batterie lithium. Pendant la décharge d'une batterie Li-ion (Figure .II .3), le lithium est relâché du graphite, migre à travers l'électrolyte pour se loger dans le réseau cristallin du matériau actif de l'électrode positive. A la charge, les ions Li^+ viennent se replacer dans la structure en graphite. La réaction électrochimique globale dans le cas d'une batterie Li-ion à base de cobalt est, [18]:



Ce principe de fonctionnement est le même pour tous les types de batteries Li-ion. En revanche, la composition chimique des électrodes et de l'électrolyte varie d'une technologie à l'autre. Ces différences ont un impact sur ce qui fixe leurs caractéristiques en termes d'énergie spécifique, puissance spécifique, durée de vie...etc. Dans ce qui suit, nous allons décrire les principaux éléments des batteries Li-ion.

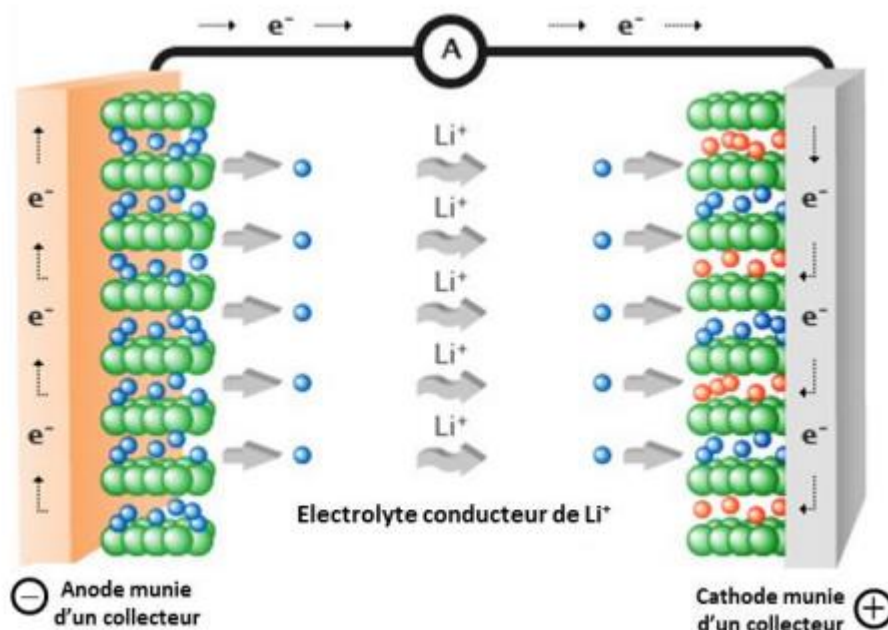


Figure .II .3: principe de fonctionnement d'une batterie Li-ion, [18].

A. L'électrolyte

Il assure le transport des ions entre les deux électrodes. On peut distinguer deux types d'électrolytes :

- Electrolyte liquide : il est composé de solvants organiques (généralement des carbonates d'alkyles) dans lesquels est dissout un sel de lithium. Il est caractérisé par une conductivité ionique relativement élevée ($>1\text{mS/cm}$). Cependant dans les batteries Li-ion, l'insertion de Li^+ dans le graphite est accompagné de molécules du solvant qui peuvent endommager l'électrode négative.
- Electrolyte polymère : il est fabriqué par la dissolution du sel de lithium et du polymère Poly-Oxyde d'Éthylène (POE) dans un solvant. Après évaporation du solvant on obtient l'électrolyte sous forme d'un film d'épaisseur comprise entre 50 et $1000\mu\text{m}$. L'électrolyte polymère assure la séparation entre les deux électrodes et diminue les risques de courts-circuits et donc d'explosion. Mais l'accumulateur doit fonctionner à température élevée ($+80^\circ\text{C}$) pour avoir une conductivité similaire à celle de l'électrolyte liquide. C'est particulièrement le cas des applications de type VE où les puissances de charge et de décharge sont importantes.

B. L'électrode négative

Les matériaux d'électrode négative des batteries Li-ion fonctionnent à bas potentiel (proche de 0V vs $\text{Li}_i/\text{Li}_i^+$). Ce sont des composés d'insertion à base de carbone sous forme graphite ou dopé par de l'étain ou du silicium, ou enfin à base d'oxydes de métaux. Les électrodes les plus répandus sont les électrodes de carbone, sous forme de graphite. Ces dernières ont une grande capacité massique théorique (372mAh/g). Cependant, le graphite est sollicité mécaniquement par l'insertion du lithium, car il est soumis à des variations de volume pouvant aller jusqu'à 40%. Ceci peut entraîner des pertes de contact avec le collecteur de courant. Pour ces raisons, des nano composites à base de titane ($\text{Li}_4\text{T}_{15}\text{O}_{12}$) ont été étudiés. Ce dernier a la propriété de ne pas se déformer selon le taux d'insertion du lithium, mais sa capacité de stockage est plus faible que les électrodes de graphite et sa tension plus élevée (Figure .II .4).

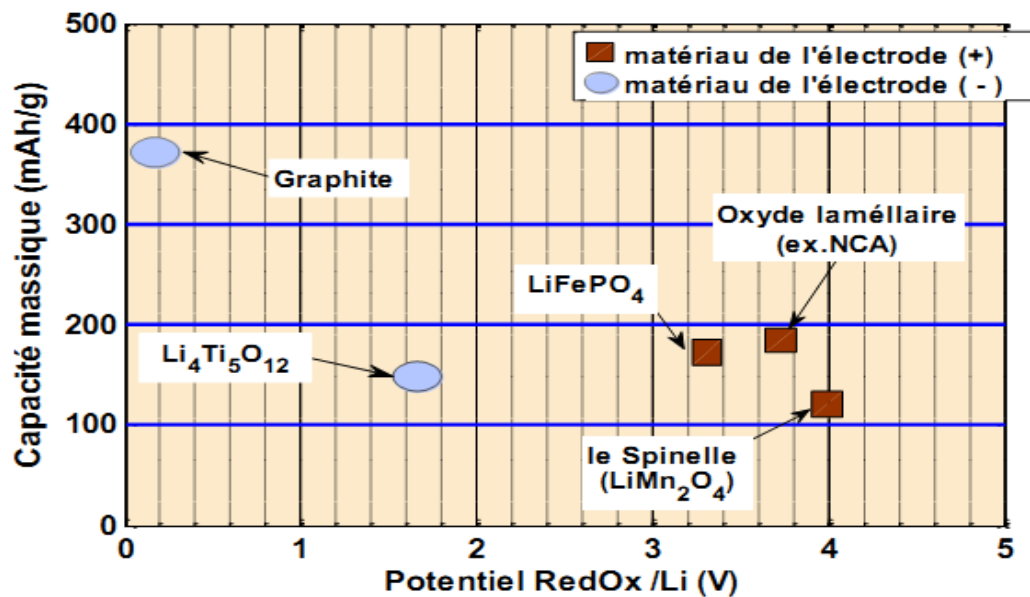


Figure .II .4: matériaux actuellement utilisés dans les accumulateurs Li-ion, [18]

C. L'électrode positive

Il existe également plusieurs matériaux qui sont utilisés pour les électrodes positives. Au sein des batteries Li-ion on retrouve, sans entrer trop dans les détails, trois grandes familles de cathodes :

- **Les oxydes lamellaires** : la structure est composée d'ions de lithium placés dans des couches de métaux de transition oxygénés. Usuellement, le Cobalt, le Nickel et le Manganèse sont les métaux utilisés. Les électrodes positives de ce type ont des densités élevées (160-200mAh/g) et une tension moyenne de 3.7V, mais elles sont peu stables. Les risques d'emballement sont donc élevés. Enfin, le métal tel le Cobalt est parfois très coûteux.
- **Les phosphates** : les électrodes en Phosphate de Fer, LiFePO_4 (LFP) sont les plus courantes. Le Phosphate est un matériau très stable, il offre un niveau de sécurité élevé et une meilleure tenue au vieillissement. Les cathodes LFP sont très utilisées, notamment en Chine par le manufacturier BYD, pour des applications VEs. Ceci, malgré une plage de tension et densité d'énergie, relativement, faibles.
- **Les spinelles** : dans cette structure $\text{LiM}_n\text{2O}_4$ (ou LMS), l'utilisation du Manganèse permet d'avoir des électrodes stables et à faible coût. Cette solution présente l'intérêt d'avoir une tension moyenne relativement élevée (> 3.8V). Par

contre sa densité d'énergie est faible et la dissolution du manganèse dans l'électrolyte diminue, fortement, la durée de vie de cette batterie.

Comme nous venons de le voir précédemment, il existe plusieurs matériaux utilisés dans les accumulateurs Li-ion qui donnent des caractéristiques différentes. Ainsi, sur le marché, on trouve des batteries désignées par l'appellation : haute puissance, ultra haute puissance ou haute densité d'énergie. De par le nom, chaque technologie est conçue de manière à répondre à des applications spécifiques. Les principales différences entre ces technologies sont : la quantité relative des matériaux constituant la cellule (même si la composition est similaire), les dimensions de cette cellule ainsi que la taille des collecteurs de courants connectés aux électrodes (Figure .II .3). Une batterie haute puissance, comparée à une de haute densité d'énergie (de même composition et même capacité), est de taille plus grande avec des collecteurs de courants plus épais pour réduire les pertes par effet joules, [12].

II .3 .2. Grandeurs caractéristiques des batteries

Une batterie peut être caractérisée par une multitude de grandeurs, dont nous donnons ci-dessous les définitions[10].

A. La capacité

C'est la quantité de charge emmagasinée, que la batterie est capable de restituer au cours d'une décharge complète, précédée d'une charge complète. La capacité est généralement donnée par rapport à un courant de décharge et des critères correspondant à l'état initial et final de la batterie .Elle est exprimée en (Ah) et correspond à :

$$-C_{el_B} = \int_{t_i}^{t_f} i. dt \quad (II.2)$$

Avec : i l'intensité de courant (A)

t_i Et t_f représentent l'état initial et final donnés, en général, par le critère de tension.

Les fabricants de batteries, fournissent souvent, ce que l'on appelle, la capacité nominale.

C'est la capacité obtenue à un courant de décharge nominal, respectant les limites de tensions spécifiées et dans des conditions de température précises.

La résistance Pour calculer en temps réel la résistance instantanée qui résulte de la somme de la résistance interne (R_{int}) et de la résistance des connectiques, on utilise la formule suivante :

$$R(t) = \frac{U(t)-U(t=0)}{i(t)-i(t=0)} \quad (II.3)$$

Avec : U et i représentent respectivement la tension et le courant mesurés.

La résistance interne matérialise le phénomène de limitation du déplacement des ions dans l'électrolyte. Elle est influencée par de nombreux paramètres tels que : la composition chimique de l'électrolyte, la température et l'état de vieillissement de la batterie.

B. Régimes de courants de charge/décharge

Le régime de courant se réfère toujours à la capacité (C) donnée par le constructeur et mesurée dans des conditions bien définies. Dans la littérature il est défini par deux notations : Rég.C et $C/Rég$. En effet, quand le régime de courant est donné par Rég.C, celui-ci représente l'intensité de courant nécessaire pour obtenir la capacité C pendant un temps de $(1/Rég)$ heures.

Par exemple, pour obtenir la capacité nominale de 40Ah d'une batterie déchargée pendant une demi-heure on doit utiliser un courant 80A. D'autre part, $C/Rég$ signifie que la batterie est déchargée pendant (Rég) heures pour obtenir la capacité C . Ainsi, lorsque que l'on parle de régime $C/2$ pour obtenir la quantité de charge de 40Ah, cela revient à décharger la batterie pendant deux heures avec un courant de décharge de 20A. Les limites d'utilisation en courant d'une batterie sont spécifiées par les régimes de charge et de décharge. En général, le régime décharge est souvent inférieur au régime de charge. Dans nos travaux, ces régimes seront largement exploités et l'on définit les courants limites de charge et de décharge en utilisant la première notation, comme suit :

$$\begin{cases} I_{el_B}^C = R_{ch} \cdot C_{el_B} \\ I_{el_B}^D = R_{dé} \cdot C_{el_B} \end{cases} \quad (II.4)$$

Avec : R_{ch} et $R_{dé}$ sont les régimes de charge et de décharge (h-1)

$I_{el_B}^C$ Et $I_{el_B}^D$ représentent les limites de courants en charge et en décharge (A).

C_{el_B} Est la capacité d'une cellule de batterie (Ah).

II.3.3 Coût des batteries Li-ion

Le coût d'une batterie Li-ion dépend de plusieurs facteurs : les matériaux, la main d'œuvre, le développement, la distribution et la durée de vie dans l'application visée. Dans ce contexte, les choix sur l'électrochimie retenue lors de la fabrication industrielle de batteries Li-ion jouent un rôle important pour le coût final des batteries. En ce qui concerne les batteries Li-ion à destination de l'électronique grand public, les matériaux contribuent à hauteur de 70% ou plus du prix total. Par contre pour les batteries de traction électrique, la contribution des matières premières reste encore minoritaire devant la contribution du processus de fabrication et des coûts de développement. Les coûts des matières premières des différents matériaux de cathode sont présentés dans le Tableau. II.2.

Tableau. II. 2: Coût des matières premières des batteries Li-ion [19]

Matières premières	Coût (\$/kg)
$L_iM_n2O_4$	10
$L_iF_ePO_4$	20
$L_iN_{i.80}Co_{15}Al_{05}O_2$	37
$L_iN_{i.22}Co_{22}Mn_{22}O_2$	39
$LiCoO_2$	60
Graphite	19
$L_{i4}T_{i5}O_{12}$	12

En ce qui concerne les véhicules hybrides et électriques, la batterie représente actuellement jusqu'à 50% de leur prix. Selon les experts de Bloomberg Energie Finance (BNEF) et Mc Kinsey, le coût moyen des batteries Li-ion au premier semestre 2014 se situe à environ 540 \$ du kWh, soit 20% de moins par rapport à 2012 et 50 % de moins par rapport à 2010 où les prix se situaient autour de 1000 \$ le kWh. Les estimations de plusieurs fabricants de batteries annoncent pour 2015 des prévisions de prix à hauteur de 300 \$ le kWh et même 150 \$ en 2020 [8]. La Figure. II. 5. Présente l'évolution du coût moyen prévu des batteries Li-ion entre 2010 et 2020.

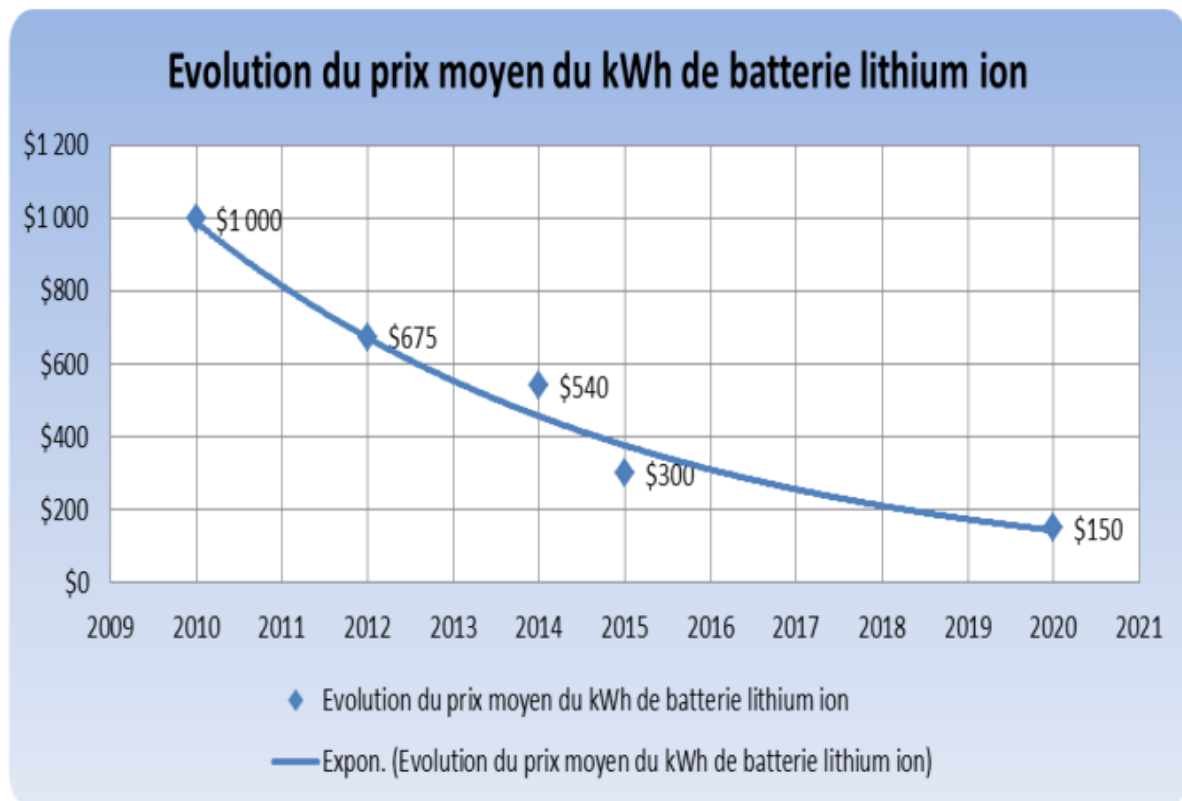


Figure. II. 5: Tendence coût moyen des batteries Li-ion 2010-2020 [8].

II .4 . Le supercondensateur

Les supercondensateurs sont des systèmes de stockage électrostatique à très haut rendement et à haute dynamique. Les premiers développements technologiques des supercondensateurs, appelé également condensateur à double-couche électrique (Electric Double Layer Capacitor - EDLC), datent de 1957. De nos jours, le marché offre des supercondensateurs dont les capacités vont de quelques Farads à 9000 Farads avec différents types de caractéristiques. Un grand nombre de fabricants de systèmes électriques et de laboratoires de recherche dans le domaine de l'électronique de puissance s'intéressent à l'utilisation de ces composants pour les applications présentant des pics de puissance importants tels que les véhicules électriques et hybrides, le stockage résidentiel d'énergie, la récupération d'énergie pour les grues et ascenseurs [8]....

II .4 .1. Principe de fonctionnement

À la différence des condensateurs classiques avec diélectrique, qui emploient un isolant et accumulent des charges sur deux armatures, les supercondensateurs emploient un électrolyte peu visqueux qui remplit les pores des électrodes et assure la mobilité des ions,

l'isolement entre les deux électrodes se faisant par l'intermédiaire du séparateur [19]. Ces supercondensateurs exploitent la double couche électrique qui apparaît à l'interface électrode -électrolyte [10]. Grâce à ce phénomène, le stockage d'énergie électrique se fait principalement sans réaction chimique. La Figure. II.6. illustre la formation d'un double couche à l'interface électrode-électrolyte selon l'état déchargé ou chargé du supercondensateur.

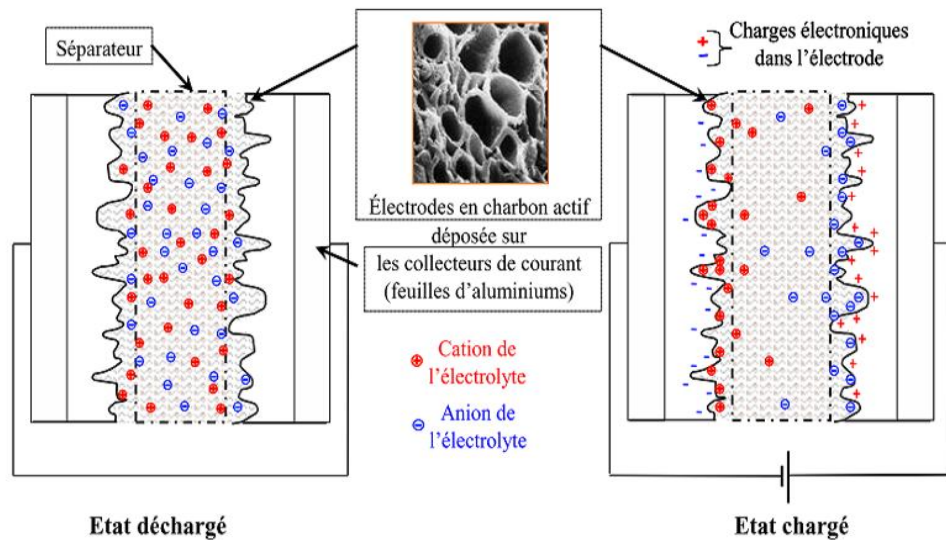


Figure. II. 6: Schéma de principe du supercondensateur déchargé et chargé [11]

Les principaux avantages des supercondensateurs par rapport aux autres solutions de stockage d'énergie sont :

- Une puissance massique élevée qui autorise des cycles de charge et décharge à très fort courant (plusieurs centaines d'ampères)
- Un très bon rendement en charge et en décharge.
- La quasi-absence de réaction chimique durant le fonctionnement permettant d'obtenir des durées de vie très élevées. Un supercondensateur peut être chargé et déchargé des millions de fois pour des conditions normales d'utilisation.
- Une relative simplicité de comportement électrique et une relative stabilité de ses caractéristiques en température par rapport aux batteries . Il est donc très simple de pouvoir prédire l'énergie disponible et le comportement électrique.

Le Tableau. II. 3 résume les caractéristiques générales des batteries Li-ion et des supercondensateurs.

Tableau. II. 3 : Caractéristiques générales des batteries Li et supercondensateurs [19]

Caractéristiques	Batterie Lithium Ion	Supercondensateur
Temps de charge	2 heures	qq secondes
Temps de décharge	2 heures	qq secondes
Cyclabilité	Inférieure à 5000	Supérieure à 500 000
Energie Spécifique (Wh/kg)	100 à 200	5 à 10
Puissance spécifique (kW/kg)	0,5 à 1	1 à 10
Rendement	De 50 % à 90 %	De 75% à 95%
Cout / Wh	0,5 à 2,5 \$ /Wh	5 à 10\$ / Wh
Cout / kW	75 à 150 \$ / kW	15 à 30 \$ / kW

II .4 .2. Technologies des Supercondensateurs

La classification des supercondensateurs peut être faite selon plusieurs critères tels que la nature du matériau de l'électrode, le type d'électrolyte, la technologie de fabrication ou encore le principe de fonctionnement. Selon ce dernier, on distingue principalement trois types de supercondensateurs:

- Les supercondensateurs électrostatiques, où les ions restent dans l'électrolyte et où le concept fondamental de la double couche est bien exploité.
- Les supercondensateurs électrochimiques mettant en jeu aux électrodes des réactions de type redox, en plus des processus électrostatiques.
- Les supercondensateurs hybrides composés de deux électrodes dissymétriques : une électrode est de type capacitif et l'autre de type pseudo capacitif ou batterie [8].

II. 4. 3. Grandeurs caractéristiques des Supercondensateurs

Un supercondensateur est principalement caractérisé par les grandeurs définies ci-dessous [10].

A. Energie et capacité

Pour un supercondensateur de capacité C_{Sc} , sous une tension V_{Sc} , l'énergie stockée E_{Sc} est donnée par l'équation suivante :

$$E_{Sc} = \frac{1}{2} \cdot C_{Sc} \cdot V_{Sc}^2 \quad (II.5)$$

La valeur de la capacité C_{Sc} est proportionnelle à la surface S d'interaction (électrode / électrolyte) et inversement proportionnelle à l'épaisseur d du diélectrique (la capacité de la double couche dépend de l'absorption des ions à la surface du matériau d'électrode) :

$$C_{Sc} = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{S}{d} \quad (\text{II.6})$$

Avec : ε_r est la permittivité relative ou constante diélectrique électrolyte, ε_0 est la permittivité absolue du vide ($8,854 \cdot 10^{-12}$ F/m).

Compte tenu des équations (II.5) et (II.6), l'énergie stockée E_{Sc} dans les supercondensateurs est donc en fonction de trois paramètres V_{Sc} , S , d . Pour accroître l'énergie stockée, il faudra donc augmenter la tension V_{Sc} , la permittivité relative ε_r , la surface S et diminuer l'épaisseur d . La valeur de C_{Sc} est un facteur clé, optimisé au travers du savoir-faire des fabricants en terme de construction et de fabrication des électrodes poreuses.

B. Résistance interne (R_{Sc})

La résistance interne ou résistance série équivalente R_{Sc} des supercondensateurs est un paramètre important qui influe directement sur la puissance délivrée par le supercondensateur. Cette résistance est la somme de différentes résistances « ioniques » et « électriques » (électrodes, connexions, électrolyte). Cependant, les contributions principales à cette résistance interne sont les résistances de la matière active, de l'électrolyte dans le séparateur et de l'interface matière active/collecteur de courant .

C. Etat de charge (SOC)

La notion d'état de charge (SOC) est dans ce cas définie relativement à l'énergie stockable. Dans certaines applications de traction électrique, le SOC est considéré comme une variable de décision. Cette grandeur est exprimée en pourcentage d'énergie et définie par la relation suivante :

$$SOC = \frac{E_{sc_res}}{E_{sc_act}} \cdot 100 \quad (\text{II.7})$$

Avec :

- E_{sc_res} : Energie restante des supercondensateurs.

- E_{sc_act} : Energie nominale actuelle des supercondensateurs (au cycle considéré).
- E_{sc_nom} : Energie nominale des supercondensateurs à l'état neuf.

En ce qui concerne la variation de SOC pendant l'utilisation des supercondensateurs, les fabricants conseillent d'utiliser leurs composants de 25% à 100% de leur SOC. Ceci permet d'exploiter 75% de la capacité énergétique [20].

D. État de santé (SOH)

Le SOC se réfère à la capacité nominale actuelle [10]. Le « SOH » (State of Health) permet de prendre en compte les pertes de capacité dues à la dégradation des supercondensateurs et de quantifier ainsi leur vieillissement afin d'évaluer l'impact sur le comportement et le fonctionnement du système alimenté. De façon normalisée, le SOH se définit en pourcentage (%), comme l'énergie totale restante par rapport à l'énergie initiale délivrée avant sa première utilisation :

$$SOH = \frac{E_{sc_act}}{E_{sc_nom}} \cdot 100 \quad (\text{II.8})$$

Avec :

E_{sc_act} : Energie actuelle des supercondensateurs en J

E_{sc_nom} : Energie nominale des supercondensateurs en J.

Le SOH est donc lié à l'énergie totale pouvant être délivrée si une décharge complète était effectuée à partir d'un état de pleine charge. Cette grandeur est généralement comprise entre 100% et 80%, puisque l'on considère généralement qu'un supercondensateur a atteint sa fin de vie lorsqu'il restitue moins de 80% de sa capacité nominale initiale.

II.4 .4. Coût des supercondensateurs

Le prix des supercondensateurs a réellement diminué ces dernières années, mais reste cependant toujours trop élevé pour permettre son développement massif. L'utilisation d'électrodes en charbon actif pour fixer les ions demande plusieurs processus de fabrication coûteux et complexes pour obtenir de bonnes performances de stockage. En effet, le prix des matières premières (charbon actif) est actuellement relativement important (de l'ordre de 30 à 50\$ par kg) et est sujet à de fortes fluctuations (il est déjà monté à 100\$ par kg). Le prix des solvants pour l'électrolyte tels le propylène de carbonate et l'acétonitrile est de

Chapitre II : Technologies des composants de la chaîne de traction hybride électrique

5 à 10\$ le litre, et celui des sels ioniques qui se dissocient dans le solvant en cations et anions de l'ordre de 50 à 100\$ par kg. Pour ces raisons, les applications commerciales (surtout pour les modules de taille moyenne ou grande) sont encore limitées, alors que les ventes potentielles seraient de l'ordre de plusieurs millions d'unités par an avec des prix plus attractifs. La technologie des supercondensateurs est en évolution constante. Les efforts se portent sur la diminution des coûts de production, comme dans le cas de la première ligne de production de supercondensateurs de graphène lancée par la Chine en janvier 2014. La baisse des prix devrait se poursuivre et les supercondensateurs devraient petit à petit trouver leur place dans les applications de stockage d'énergie électrique. Le marché des supercondensateurs était attendu en hausse de 48% par an de 2012 à 2015. La Figure II. 7 représente l'évolution du marché des supercondensateurs MAXWELL et leur utilisation dans différentes applications (transport, énergie renouvelable, électronique) [21].

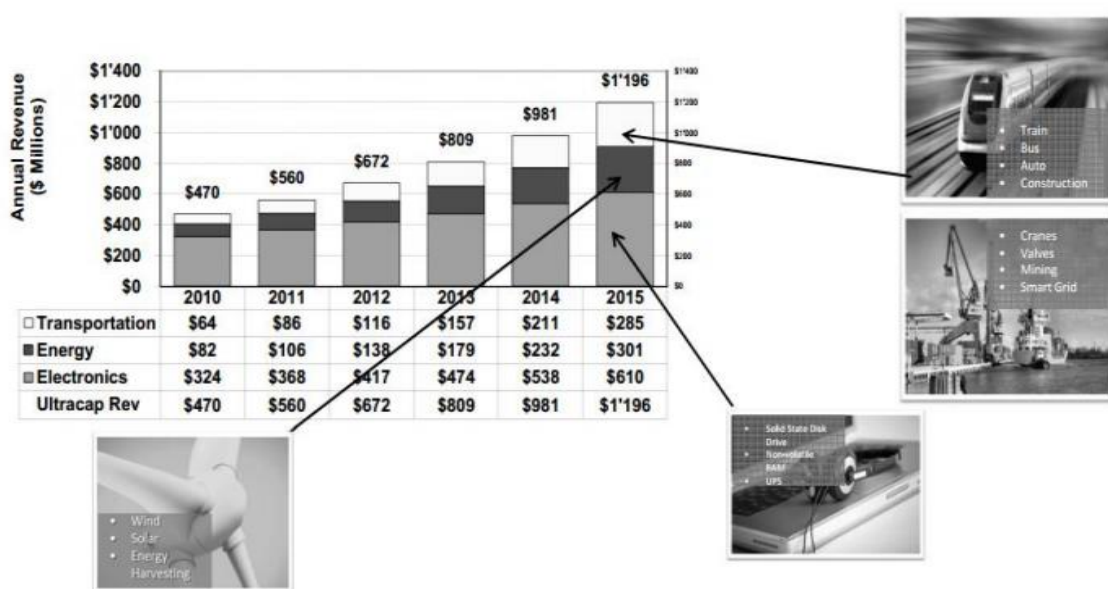


Figure II. 7: Évolution du marché de supercondensateurs MAXWELL et secteurs d'applications [22]

II. 5. Les organes de traction électrique

II. 5.1. Les moteurs électriques

Très utilisé, depuis plus d'un siècle, la machine électrique est le composant principal de la voiture électrique, elle est souple, silencieuse, ne pollue pas et elle s'adapte à toutes les situations [23].

De manière spécifique, la machine électrique de traction doit répondre aux critères suivants :

- il doit pouvoir tourner et freiner dans les deux sens de rotation ;

- il doit posséder un couple important à bas régime, ainsi qu'un bon rendement.

Donc en fonction du type du véhicule fabriqué, les constructeurs orientent leurs choix sur trois principaux types des moteurs électriques :

- la machine à courant continu
- la machine synchrone
- la machine asynchrone.

A. Le moteur à courant continu (MCC)

Le moteur à courant continu est la technologie la plus ancienne utilisée dans le domaine automobile. Elle est classique et peu chère (en tenant compte de l'électronique) car elle bénéficie d'une production importante. Mais ses performances sont limitées [23].

Avantage :

- il bénéficie d'une grande maturité industrielle ;
- sa commande est très simple, tout comme son alimentation ;
- son coût est faible par rapport aux autres machines électriques en vitesse variable, du fait de sa production et de la simplicité de son électronique.

Inconvénients :

- les balais nécessitent un entretien régulier (maintenance) ;
- elle a une inertie importante et est limitée en vitesse maximale, du fait du frottement des balais et du rotor bobiné.
- elle est limitée en couple (commutation des courants par le collecteur et pertes Joule au rotor)
- elle peut être dangereuse en milieu explosif, à cause des arcs électriques entre les balais et les lames du collecteur (à proximité d'une batterie Li-Ion par exemple, ou un réservoir d'hydrogène).
- les accélérations réalisables (! 2 500 tr/min) ne sont pas assez élevées dans certains cas.

B. Le moteur asynchrone (MAS)

La machine asynchrone bénéficie des progrès technologiques de sa commande de puissance qui lui permettent une excellente dynamique d'accélération et des vitesses de rotation élevées. [23].

Le principal avantage de la machine asynchrone est la simplicité de sa structure et donc sa robustesse.

Avantage :

- elle a de bonnes performances à puissance maximale et une vitesse maximale élevée.
- elle possède de grandes qualités de dynamique de couple (avec des accélérations supérieures à 10 000 tr/min/s).
- la machine asynchrone avec un rotor à cage est particulièrement robuste.

Inconvénients :

- le coût est élevé, essentiellement dû à l'électronique d'alimentation et de contrôle.
- le couple maximal est assez faible.
- Appel de courant très important Intensité de Démarrage = 4 à 8 Intensité Nominale.
- Démarrage brutal.

C. Moteurs synchrones

Contrairement aux machines asynchrones, le rotor des machines synchrones tourne à une vitesse égale à celle du champ tournant venant du stator. Le couple est alors produit grâce à l'interaction du champ inducteur et du champ induit. Suivant les origines de ces deux champs, on peut classifier les machines synchrones en plusieurs familles présentées dans le tableau ci-dessous. [17]

Tableau. II. 4 : Classification des principales familles des machines synchrones

Machines Synchrones						
Courants	Sinusoïdaux			Non-Sinusoïdaux		
Excitation (inducteur)	Sans	Aimants Permanents	Rotor Bobiné	Sans	Aimants Permanents	Rotor Bobiné
Familles	Machine Synchro-Réductante	Machine Synchrone à Aimants Permanents	Machine Synchrone à Rotor Bobiné	Machine à Réductance Variable	Brushless	Machine à Courant-Continu
		Machine Synchrone à Double-Excitation			Machine Pas à Pas	

➤ Avantages de la MSAP

Les machines synchrones à aimants permanents présentent plusieurs avantages par rapport aux autres types de machines :

- Puissances massives importantes et élevées.
- Absence de contacts glissants.
- Pas des pertes résistives au rotor ; ce qui facilite l'évaluation de la chaleur due aux pertes dans la machine. Ainsi, il y a suppression d'équipement de refroidissement au rotor.
- Suppression des bagues et des ballait, ce qui réduit les problèmes de maintenance.
- Possibilité de supporter des surcharges transitoires importantes et un bon comportement dynamique en accélération et en freinage.
- Grande fiabilité.
- Fonctionnement en survitesse.

➤ Inconvénients de la MSAP

Comme inconvénients de la MSAP on :

- Coût élevé des aimants.
- Interaction magnétique due au changement de structure.
- Influence des vibrations et des chocs sur la structure de la machine.
- Diminution de l'aimantation selon loi logarithmique en fonction du temps.

Par conséquent, les MSAP sont particulièrement adaptées aux applications industrielles nécessitant des performances élevées. Celles-ci comprennent évidemment les applications embarquées liées au transport telles pour les VHR et VE.

Tableau. II. 5: Comparatif de technologies motrices électriques, + Avantage, 0 neutre, - désavanta

Choix
↓

	Moteur à Courant Continu	Moteur à Induction	Moteur Synchrone à aimants permanents	Moteur à Réluctance
Rapport puissance/poids	0	+	++	+
Vitesse de rotation max.	-	+	+	+
Rendement (%)	80 - 85	85-90	90-95	90-94
Contrôlabilité	++	+	+	+
Maintenance	-	+	0	+
Coût du moteur	-	++	-	+

II. 6. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les caractéristiques des batteries Li-ion et des supercondensateurs et aussi les moteurs. L'aspect technologique des batteries Li-ion a été volontairement mis en avant pour faire ressortir l'un des objectifs de ce travail avec une présentation sur les convertisseurs utilisés.

La comparaison en termes de poids, volume et coût financier de sources d'énergie alimentant un VE et le dimensionnement des batteries Li-ion et de sources d'énergie hybrides (batteries Li-ion Supercondensateurs) sera l'objet du troisième chapitre.

Chapitre I :

Dimensionnement et

caractéristique de VEH

III.1. Introduction

Ce chapitre nous allons présenter le calcul consiste à utiliser un profil de vitesse normalisé à partir duquel on définit l'énergie qu'il faut pour propulser le véhicule.

Dans ce chapitre, nous allons présenter le dimensionnement de la batterie et des supercondensateurs pour le véhicule hybride électrique. Aussi la batterie nécessite un système de rechargement qui sera assuré par une génératrice aussi dimensionné

III.2. Cahier des charges

Cette étude a pour objectif le dimensionnement optimal de sources d'énergie électrique pour des applications automobiles. Un tel objectif est d'autant plus complexe qu'il existe plusieurs critères entrant en concurrence avec des impacts plus ou moins restrictifs. C'est pour cette raison que le cahier des charges doit être clairement défini. Nous allons aborder ce troisième chapitre par la présentation des caractéristiques du véhicule électrique que l'on souhaite alimenter par une source de stockage d'énergie et d'autres éléments du cahier de charges tels que l'architecture de la source, le type de système de stockage...etc[10].

III.2.1 Cycles de conduite

Les cycles de conduite sont composés d'un profil de vitesse et d'un profil de pente de la route. À l'origine, ces cycles étaient utilisés pour évaluer les émissions des gaz polluants et la consommation de carburant pour les véhicules thermiques. Les mêmes cycles ont été jugés utiles pour comparer l'efficacité des VEH en termes de coût, de consommation de carburant, et d'autonomie en mode purement électrique. Toutefois, les tendances réelles de conduite sont souvent beaucoup plus complexes et exigeantes (vitesse, accélération...) que celles de ces cycles d'homologation [10].

A. Cycle NEDC

Le New Européen Drive Cycle (NEDC) est un profil de conduite « homologation », proposé par le Motors Véhicule Experts Group en 1995 (MVEG-95) pour reproduire les modes de conduite sur les routes européennes. Il combine, comme montré par la Figure .III.1, un cycle urbain (ECE-15). C'est ce cycle qui a été exploité lors de l'élaboration des normes Euro évoquées dans le paragraphe-I.1.5. Cependant, le cycle NEDC manque de « sévérité ». En effet, d'après ce cycle le véhicule va de 0 à 3 km/h en 15s pendant la

conduite urbaine, et sa vitesse maximale est de 10 km/h. Cette dernière ne dure que 12s pendant tout le cycle d'essai. La distance parcourue est d'environ 2 km pour un temps de 200s.

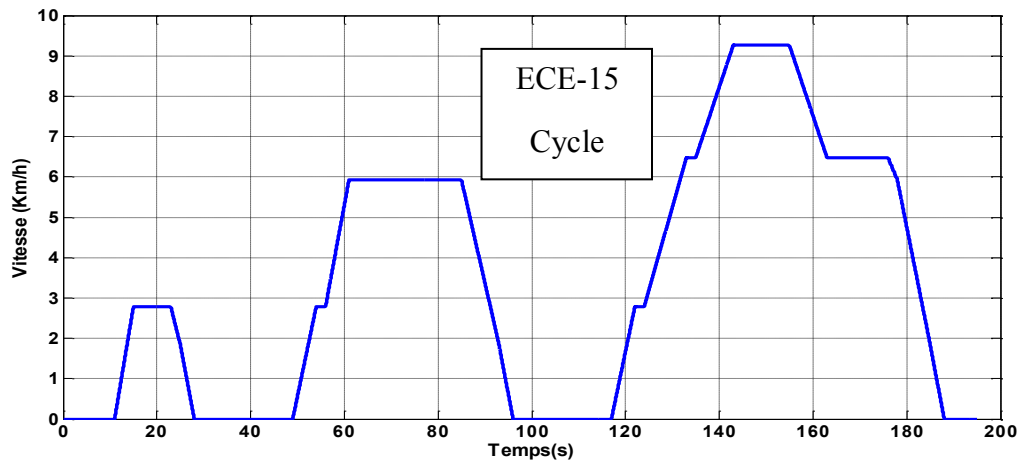


Figure. III.1. cycle de conduite NEDC (La vitesse en fonction du temps).

On distingue trois phases différentes sur ce profil de vitesse :

- la phase où la vitesse croît linéairement, la phase d'accélération ;
- la phase où la vitesse est constante, la phase constante ;
- et la phase où la vitesse décroît linéairement, la phase de décélération.

En conclusion, le comportement de la vitesse en fonction du temps est toujours sous la forme suivante (fonction affine) :

$$V(t) = a.t + b \quad (\text{III.1})$$

- si $a > 0$ phase d'accélération ;
- si $a < 0$ phase de décélération ;
- si $a = 0$ phase constante.

Grace à la courbe de la vitesse en fonction du temps (Figure III.1) on peut facilement trouver a et b sur chaque phase.

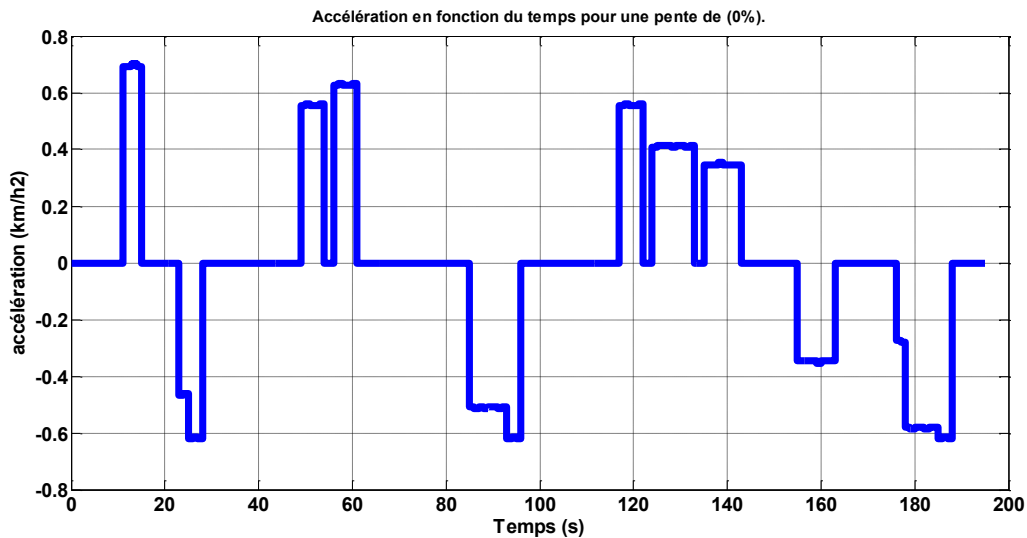


Figure. III.2. Évolution d'accélération en fonction du temps pour une pente de (0%).

III.3. Caractéristiques et consommations du VEH

Les consommations de puissance et d'énergie d'un VEH dépendent du cycle de conduite, mais également des caractéristiques du véhicule en terme de : poids, volume, coefficient de pénétration dans l'air (C_x)... etc. Notre travail est basé sur l'étude de la consommation d'un VEH de type urbain, dont les paramètres sont donnés par le Tableau. III.1. A noter que la masse (M_{VEH}), renseignée dans ce tableau, représente la masse de tous les organes du VEH (châssis, habitacle ...), mais n'inclut pas la masse du système de stockage d'énergie (M_{SSE}). Son influence, dépendant de la solution technologique choisie pour permettre la solvabilité du problème sans avoir à faire appel à un processus itératif. En effet, la proportion de la masse du SSE dans le VEH n'est pas négligeable.

Tableau .III. 1 : paramètres du véhicule électrique hybride

Paramètres du VE	Valeurs
M : masse du VEH (kg)($M_{VEH} + M_{SSE}$)	1400
S : surface frontale (m^2)	2,75
ρ : densité de l'air (kg/m^3)	1,2
C_x : coefficient de pénétration dans l'air	0,3
C_0 : coefficient de résistance au roulement à l'état statique	0,008
C_1 : coefficient de résistance au roulement à l'état dynamique	1,6e-6
r: rayon de la roue (m)	0.33

III.3.1 Dynamique du VE

La puissance et l'énergie sont imposées par la dynamique du VE sous des conditions (cycle de vitesse et profil de pente) définissant le trajet à parcourir. La puissance P_V équivaut à la puissance présente au niveau des roues et s'exprime par :

$$P_V = C_T \cdot \Omega_{roue} \quad (\text{III. 2})$$

Où le couple total C_T et la vitesse de rotation de la roue Ω_{roue} sont calculés directement à partir de la force de traction F_T et la vitesse V_{VEH} du VE :

$$\begin{cases} C_T = F_T \cdot r \\ \Omega_{roue} = V_{VEH} \cdot r^{-1} \end{cases} \quad (\text{III. 3})$$

Avec r est le rayon de la roue.

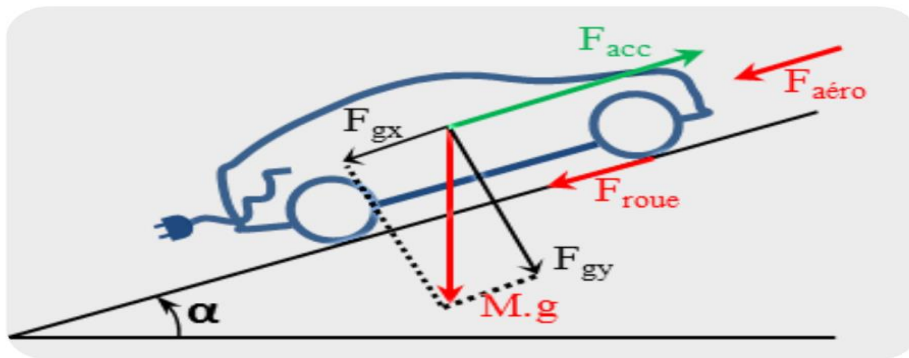


Figure .III. 3 : forces sur un VE en roulement.

La force de traction nécessaire au déplacement du VEH est donnée par la somme des forces résistantes à l'avancement ajoutée à la force d'accélération F_{acc} . Comme présenté dans la Figure .III.3, les forces résistantes au roulement, détaillées par le groupe d'équations III.4, sont :

- la force aérodynamique $F_{aéro}$,
- la force F_{roue} due au contact des roues sur la chaussée
- la force gravitationnelle F_{gx} due à la pente α .

$$\begin{cases} F_{aéro} = 0.5 \cdot \rho \cdot s \cdot C_x \cdot V_{VEH}^2 \\ F_{roue} = (M_{VEH} + M_{SSE}) \cdot g \cdot (C_0 + C_1 \cdot V_{VEH}^2) \\ F_{gx} = (M_{VEH} + M_{SSE}) \cdot g \cdot \sin(\alpha) \end{cases} \quad (\text{III. 4})$$

- Calcul la force d'accélération F_{acc} .

En faisant une projection de ces forces suivant l'axe du mouvement :

$$\begin{cases} (M_{VEH} + M_{SSE}).a = F_{acc} - F_{roue} - F_{aéro} - F_{gx} \\ F_{acc} = (M_{VEH} + M_{SSE}).a + F_{roue} + F_{aéro} + F_{gx} \end{cases} \quad (III. 5)$$

En fonction de la phase de vitesse considérée, on calcule a et la vitesse moyenne durant cette phase, et au final on trouve la force que doit développer le véhicule durant cette phase. La figure III. 4 donne l'évolution de la force de traction en fonction du temps pour une pente de 0%, à partir du cycle de vitesse NEDC.

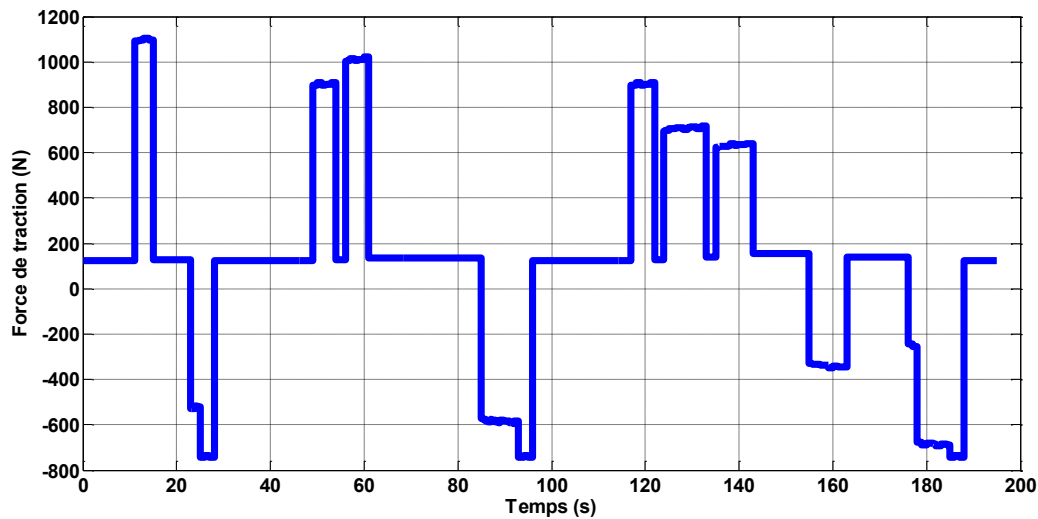


Figure III. 4 : Évolution de la force de traction en fonction du temps pour une pente de 0%

Le minimum de la force est de -744.431 N pendant une durée de 2 secondes et une vitesse allant de 6 à 0 km/h. Le maximum est de 1105.1897 N pour une durée de 1 s et une vitesse allant de 2 à 2.78 km/h.

Ces forces sont donc exprimées en fonction des masses du VEH et du SSE. Ainsi, la puissance du VEH requise pour une mission peut être exprimée de nouveau par :

$$\begin{cases} P_V = F_{acc} \cdot V_{VEH} \\ P_V = \left((M_{VEH} + M_{SSE}).\frac{dv_{VEH}}{dt} + F_{roue} + F_{aéro} + F_{gx} \right) \cdot V_{VEH} \end{cases} \quad (III. 6)$$

Les Figures (II.5- II.6) montrent la puissance et l'énergie nécessaires pour la propulsion du VEH selon le cycle de conduite. La puissance positive correspond à la puissance que le système de propulsion transmet aux roues P_{V_cons} étant la valeur

maximale de cette puissance consommée. La partie négative représente la puissance récupérée durant les phases de freinage et P_{V_rec} est la valeur maximale de puissance récupérable par la source de stockage d'énergie.

L'énergie consommée est obtenue par l'intégration, selon l'équation III.7, de la puissance du véhicule par rapport au temps du parcours (t_{cy}). Le paramètre E_{V_cons} est la valeur maximale de l'énergie consommée nécessaire à l'autonomie du VEH

$$E_{V_cons} = \int_0^{t_{cy}} P_V(t).dt \tag{III.7}$$

Les puissances P_{V_cons} , P_{V_rec} et l'énergie E_{V_cons} sont les contraintes qui vont conditionner le dimensionnement de la SEH. Ces paramètres dépendent du profil de vitesse, de la pente et de l'autonomie désirée.

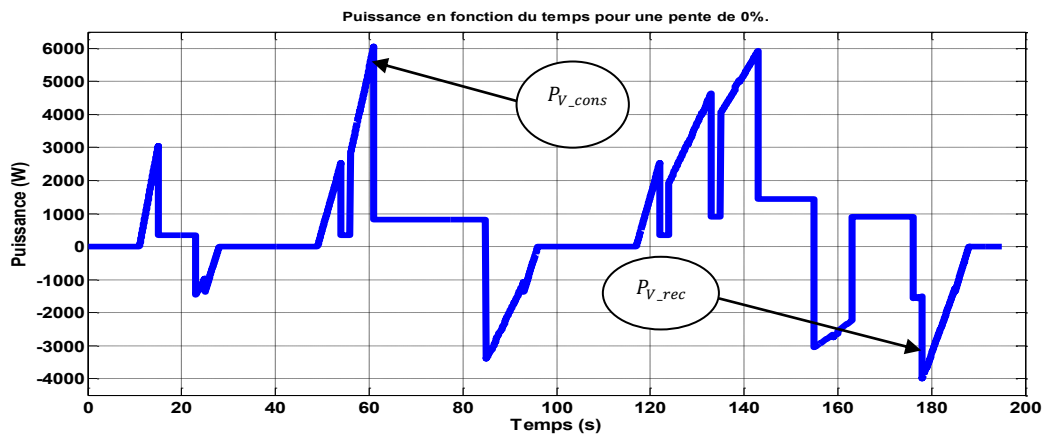


Figure. III.5: Évolution de la puissance en fonction du temps pour une pente de 0%.

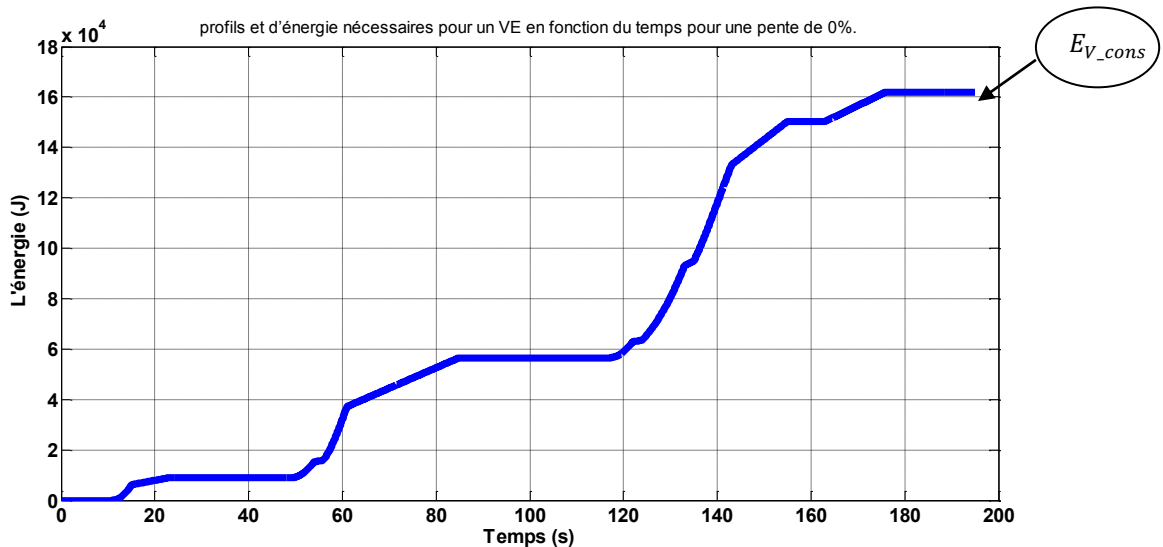


Figure. III. 6 : profils et d'énergie nécessaires pour un VEH en fonction du temps pour une pente de 0%.

Tableau .III. 2: Résultats des calculs des paramètres.

Pente %	0	2.5	5	10	16
Force de traction max(N)	1105.1897	1644.2191	2182.4174	3253.0036	4519.6521
Force de traction min(N)	-744.431	-205.4024	332.7959	1403.3821	2670.0306
Puissance max (W)	6064.8502	1.0926×10^4	1.5909×10^4	2.5823×10^4	3.7552×10^4
Puissance min(W)	-3998.8154	-807.2941	0	0	0
Energie max(J)	1.6195×10^5	3.9703×10^5	5.2546×10^5	6.1304×10^5	6.3787×10^5
Energie min(J)	-6.8101×10^4	-6973.4191	0	0	0

À partir de 5% de pente, on ne peut pas récupérer l'intégralité de l'énergie dans les supercondensateurs, si la masse du véhicule est de 1400 kg et avec les hypothèses de rendement effectuées.

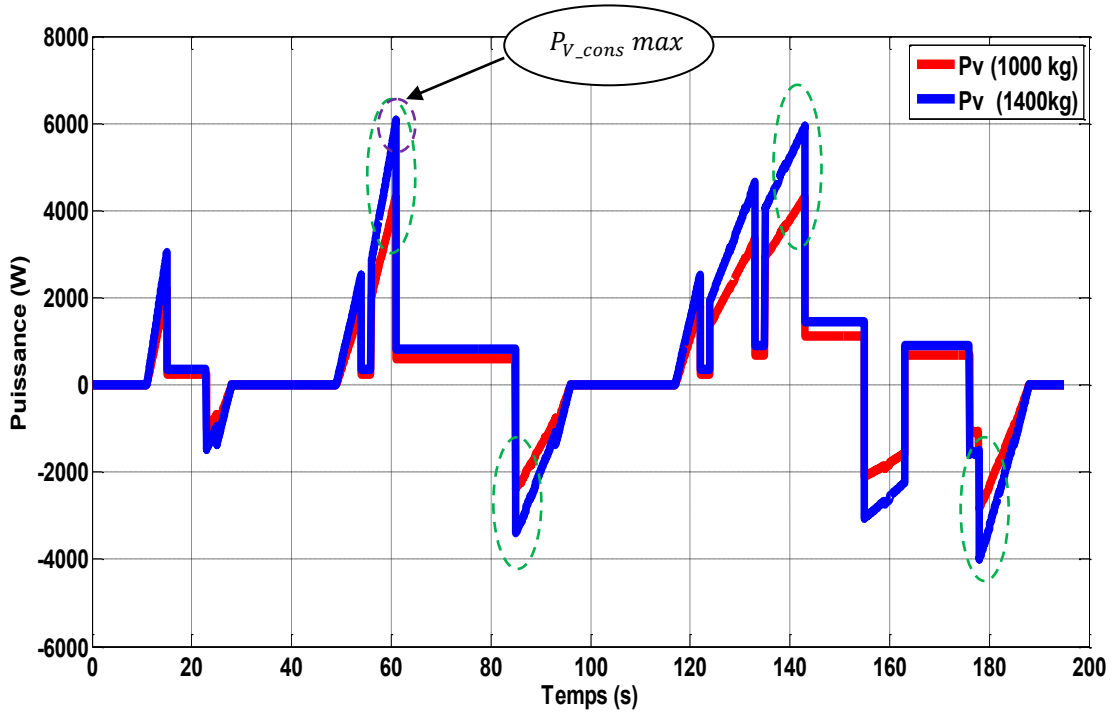
III.3.2 Influence de la masse de la SSE sur la consommation du VEH

L'intégration de la masse du SSE dans le VEH augmente la consommation du VEH. En effet, la décomposition des équations III.4 et III.5 nous permet d'exprimer la variation de la puissance (ΔP_V) et de l'énergie consommée (ΔE_{V_cons} provoquée par l'intégration du SSE dans le véhicule) :

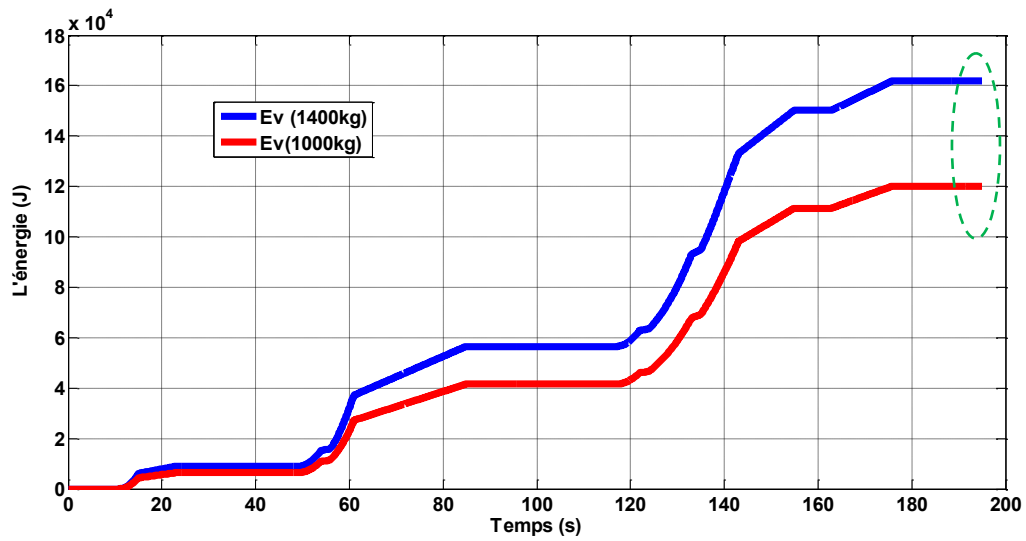
$$\Delta P_V = M_{SSE} \cdot \left(\frac{dV_{VEH}}{dt} + g((C_0 + C_1 \cdot V_{VEH}^2) + \sin(\alpha)) \right) \cdot V_{VEH} \quad (III.8)$$

$$\Delta E_{V_cons} = \int_0^{t_{cy}} \Delta P_V(t) \cdot dt \quad (III.9)$$

La surconsommation du VEH due à la masse de la source d'énergie est d'autant plus élevée que la masse de ce dernier est important. La Figure III.7 illustre cette surconsommation pour une masse de 400 kg. De ce fait, il est nécessaire de vérifier que le SSE dimensionné au préalable (sans la prise en compte de son poids ($M_{VEH} + M_{SSE} = 1400 \text{ kg}$)) est capable de fournir la puissance et l'énergie totales requises. Durant ce travail de dimensionnement, nous ne considérons que les pertes au niveau d'alimentation et les pertes de la chaîne de traction liées à la machine électrique et les organes de transmission sont négligées.



(A)



(B)

Figure .III. 7 : Influence de la masse du SSE sur la consommation d'un VEH ((A) variation de la puissance (ΔP_V) (B) variation d'énergies ($\Delta E_{V_{cons}}$).

La puissance et l'énergie consommable sont proportionnelles au poids de VEH.

III.3.3 Caractéristique et dimensionnement du moteur

D'après la Figure (**Figure. III.7(A)**) graphique le point maximal de la puissance ($6064.8502 \text{ W} \approx 7000$), suivant ces paramètres on a choisi le moteur a la référence qui fourni une puissance $\leq 7 \text{ kW}$.

- Type de Moteur choisi pour la puissance produite 7 kW :

Moteur AC / synchrone à aimant permanent / 200V / convoyeur

- **Caractéristiques :**

- AC/DC: AC
- Type: Synchrone à aimant permanent
- Voltage: 200V
- Autres caractéristiques: Convoyeur, pour pompe, à haut rendement, 4 pôles, 6 pôles, à cage d'écureuil, à aimants permanents
- Puissance: Min: 0.37 kW (0.5 hp) Max: 7.5 kW (10.06 hp)

- **Présentation type de moteur**

Les WEG WQuattro a un rendement élevé le moteur électrique qu'excède le niveau de l'efficacité IE4. Le WQuattro ce type moteur est utilisé dans plusieurs domaines te-laques pour les ventilateurs, les transporteurs à bande ... etc.

Le moteur électrique comporte un résultat de 0.37 jusqu'à 7.5 kilowatts, une armature de 80 jusqu'à 132S, l'isolation de la classe F, 200/400, 400/690 ou la polarité de poteaux de la tension 525V, 4 et 6, un rotor de camp d'écureuil et des aimants permanents d'énergie élevée (NdFeB), la vitesse synchrone (opération), la plateforme W22 mécanique, et lui viennent dans la couleur Ral6021.

Le WQuattro est un associé idéal pour assurer la plus grande productivité de n'importe quel procédé de production donné. [24].

III.3.4 Caractéristique et dimensionnement des batteries

On a choisie la batterie suivant le point maximal de consommation d'énergie (Figure. III. 8), on choisi la batterie suivant la consommation maximale d'énergie suivant sur profil 200s, $\Delta E_{V_{cons}} = 45 \text{ Wh}$

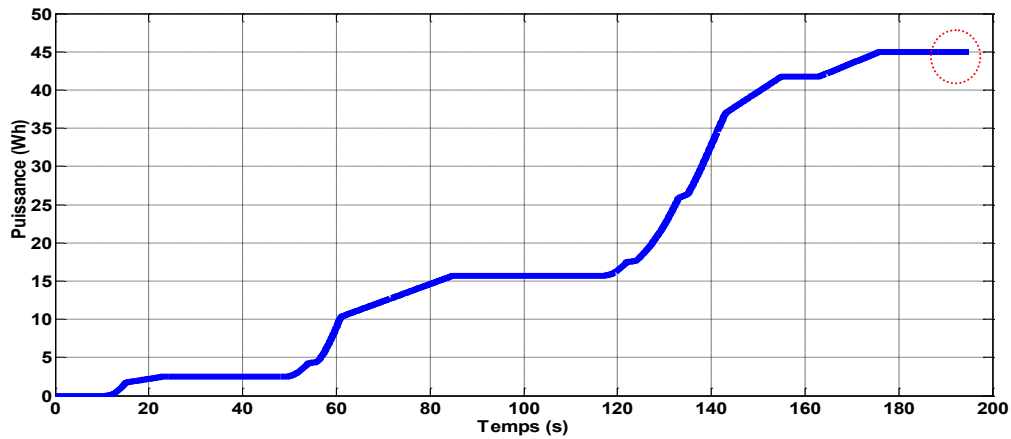


Figure .III. 8 : consommation d'énergie en (Wh) d'un VEH

➤ Les batteries Li-ion

Un VEH est alimenté par un pack de batteries. Ce pack est composé de modules mis en série et/ou en parallèle selon la tension d'alimentation et la capacité de stockage désirée. Chaque module est à son tour composé d'un nombre de cellules de batteries (cf. Figure .III.9).

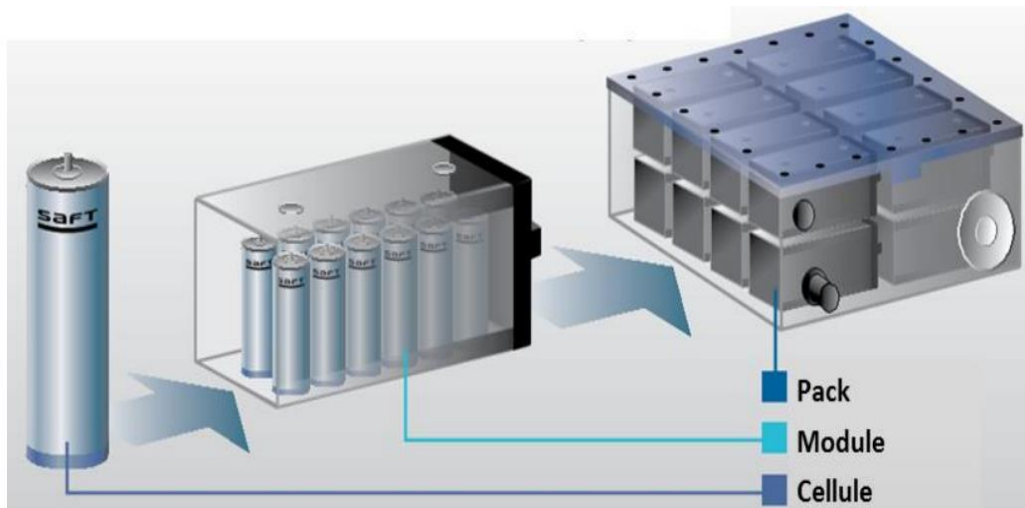


Figure .III. 9 : chaîne d'assemblage de batteries pour VEH : de la cellule au pack, [10]

Tableau .III. 3: données fabricants des batteries Li-ion étudiées, [10].

Acronyme	Batteries Li-ion HP			Batteries Li-ion HE		
	Ko40HP	Ko100HP	Sa34HP	Ko40HE	Ko100HE	Sa45HE
Fabricant	DowKokam	DowKokam	Saft	DowKokam	DowKokam	Saft
Nom commercial	SLB90216216H	SLB80460330H	VL 34P	SLB902116216	SLB80460330	VL45E Fe
Composition chimique (E. négative/ E. positive)	Graphite/ NMC	Graphite/ NMC	Graphite/ NCA	Graphite/ NMC	Graphite/ NMC	Graphite/ LFP
Tension nominale (V)	3,70	3,70	3,65	3,70	3,70	3,30
Capacité nominale (Ah)	40,00	100,00	33,00	40,00	100,00	44,00
Résistance interne (mΩ)	0,80	0,55	1,00	0,90	0,65	1,20
(Conditions de mesures)						
Courants Max charge/décharge (A)	(AC_1kHz, 23°C)	(AC_1kHz, 23°C)	(CC,25°C)	(AC_1kHz, 23°C)	(AC_1kHz, 23°C)	(CC,25°C)
Energie spécifique (Wh/kg)	80/200	200/500		40/40	100/100	6,28/50
Masse (kg)	143,68	148,00	120/500	167,25	164,44	155,55
Volume (l)	1,030	2,500	0,940	0,885	2,250	0,90
Coût (€)	0,508	1,140	0,410	0,441	1,066	0,48
	82,22	209,90		76,33		72,24
			67,80		190,81	

Lors de la composition d'un pack de batteries, les dispositifs d'assemblage et de protection représentent une masse et un volume supplémentaire. Une étude des packs de batteries existants sur le marché nous a permis d'évaluer la masse et le volume de ces dispositifs. On peut considérer que la masse et le volume supplémentaire peut être évalué à environ 40% de la masse et du volume des cellules. Cette hypothèse est valable aussi pour les packs de super condensateurs.

Le Tableau III.3 regroupe les caractéristiques des éléments de batteries Li-ion envisagés pour notre étude, représentatives des performances accessibles actuellement. De manière à étudier l'influence des performances d'une cellule sur le dimensionnement, nous avons sélectionné certaines batteries à Haute densité de Puissance (HP) et d'autres à Haute densité d'Energie (HE), commercialisées par les deux fabricants DowKokam et Saft. La particularité des batteries HP est qu'elles peuvent supporter des courants en charge et en décharge beaucoup plus importants que les batteries HE. Cette caractéristique, spécifiée par les régimes de charge et de décharge abordés dans le paragraphe I.5, représente l'un des critères de base pour le dimensionnement des batteries.

En contre partie, on constate que l'énergie spécifique des cellules HE est plus importante que celle des cellules HP. Au sein d'une même famille il existe également des disparités qui sont dus à la composition chimique de l'électrode positive.

Tableau .III.4 : différent type des batteries

	Batteries Li-ion HP			Batteries Li-ion HE		
Acronyme	Ko40HP	Ko100HP	Sa34HP	Ko40HE	Ko100HE	Sa45HE
Energie spécifique (Wh/kg)	143.68	148	128	167.25	164.44	155.55
La masse kg	1.030	2.5	0.94	0.885	2.250	0.90
L'énergie de la batterie (Wh)	148	370	120.32	148.02	370	134
N° batterie	1	1	1	1	1	1
Coût (€)	82.22	209.9	67.80	76.33	190.81	72.24

Le choix des batteries a été faite par prendre en considération leur énergie, nombre, poids et le cout.

D'après l'analyse du tableau (tableau III.4), On va choisir la batterie Ko40HE avec les caractéristiques suivantes :

- L'énergie unitaire : 148.02 Wh
- L'énergie à fourni : 45 Wh
- N° de Batterie nécessaire : 1
- Poids générale : 0.885 Kg
- Cout générale : 76.33 €

III.3.5 Caractéristique et dimensionnement des Supercondensateur

Tableau III.5 : Paramètre du supercondensateur

Supercondensateur	Capacité totale	Tension maximale de banc	Modèle de cellule
	67F	48.3 V	BCAP1200 (Maxwell technologies)

Pour cette étude, le système de stockage utilisé comme source secondaire (où de puissance) du SEH est composé de supercondensateurs Maxwell 67F/48.3V, [25]. Pour ce composant, contrairement aux batteries, les contraintes en puissance ne sont pas limitatives puisque ses limitations sont bien supérieures à ce que demande l'application. La limitation

vient surtout des besoins énergétiques. C'est pour cette raison que la méthode de gestion de son énergie est très importante.

$$E_{Sc} = \frac{1}{2} C_{sc} \cdot (U_{Sc_max})^2 \tag{III.10}$$



Figure .III. 10 : l'énergie nécessaire à délivrer par supercondensateurs

D'après la figure (III. 10) l'énergie maximale de pic à fournir par le supercondensateur est (76600 J) et le supercondensateurs utilisé peut fournir une énergie de 78151 J= 21.71 Wh

III.3.6. caractéristique de génératrice de rechargement

Le but d'utilisation d'une génératrice est de recharger la batterie utilisé quand elle fournit quantité d'énergie demandé

$$E_g = 45 \text{ wh}$$

La génératrice correspondante au notre besoin est AAP 1200 [26]



Figure .III. 11 : photo réal génératrice AAP 1200

Tableau III.6 : Caractéristique génératrice AAP 1200

Facteur de puissance	-	1.00
Phase	-	1
AC Puissance Nominale	C Courant Nominal (A)	0.90
Consommation de carburant (L/h.)	L/h	0.50
AC Courant Nominal (A)	AC Courant Nominal (A)	3.40
Puissance maximale	KW	1
Fréquence	Hz	50
Tension (V)	V	230
Niveau de bruit (dB(A))	dB(A)	66.00
L'énergie à fournir pendant 200s	Wh	50

Tableau III.7 : dimensionnement génératrice AAP 1200

Largeur	Mm	355
Longueur	Mm	465
Hauteur	Mm	385
Poids	Kg	26.0

Remarque : On peut utiliser un redresseur et un hacheur pour assurer l'équivalence des grandeurs électrique entre la génératrice et la batterie

On remarque que la génératrice consomme seulement 0.02L du carburant pour charger la batterie par l'énergie nécessaire.

III.4.Conclusions

Dans ce chapitre, nous avons présenté une synthèse de dimensionnement des sources d'énergie électrique alimentant un VEH., Un essai sur profil de vitesse normalisé : en utilisant un profil de vitesse standard (profil NEDC par exemple), Dans un premier temps, nous avons dimensionné les batteries et les supercondensateurs à partir de profile de puissance du véhicule. Enfin nous avons dimensionné une génératrice qui est destiné au système de rechargement de la batterie.

Chapitre IV :

Modélisation et simulation

d'un moteur MSAP

IV.1 Introduction

L'étude du comportement d'un moteur électrique est une tâche difficile et qui nécessite, avant tout, une bonne connaissance de son modèle dynamique afin de bien prédire, par voie de simulation, son comportement dans les différents modes de fonctionnement envisagés.

Historiquement, le moteur à courant continu (M.C.C) a constitué la seule source électromagnétique de vitesse variable en raison de son facilité de commande. Cependant, la fragilité du système balai collecteur a toujours été un inconvénient de la M.C.C, ce qui limite la puissance et la vitesse maximale et présente des difficultés de maintenance et des interruptions de fonctionnement. C'est pour cette raison qu'on a eu intérêt à utiliser des moteurs électriques à courant alternatif afin d'écartier cet inconvénient [27].

Parmi les moteurs à courant alternatif utilisés dans les entraînements à vitesse variable, le moteur synchrone à aimant permanent reste un bon candidat. Son choix devient attractif et concurrent de celui des moteurs asynchrones grâce à l'évolution des aimants permanents qu'ils soient à base d'alliage ou à terre rare. Cela leur a permis d'être utilisés comme inducteur dans les moteurs synchrones offrant ainsi, par rapport aux autres type de moteur, beaucoup davantage, entre autres, une faible inertie et un couple massique élevé [28].

Dans ce chapitre nous présentons la modélisation de la MSAP par la transformation de Park, puis nous traiterons l'association convertisseur machine. Une démonstration des résultats de simulation indiquant la validation du modèle utilisé est aussi présentée

IV.2 Présentation de la machine synchrone à aimants permanents

Le terme de la machine synchrone regroupe toutes les machines dont la vitesse de rotation de l'arbre de sortie est égale à la vitesse de rotation du champ tournant. Pour obtenir un tel fonctionnement, le champ magnétique rotorique est généré soit par des aimants, soit par un circuit d'excitation. La position du champ rotorique est alors fixe par rapport au rotor, ce qui impose en fonctionnement normal une vitesse de rotation identique entre le rotor et le champ tournant statorique.

Cette famille de machine regroupe en fait plusieurs sous familles :

- Les machines synchrone à rotor bobiné.
- Les machines synchrone à réluctance.
- Les machines synchrone à aimants permanents.

Nous intéresserons plus particulièrement vers cette dernière catégorie, en effet avec l'apparition d'aimants permanents de plus en plus performants (faible désaimantation, énergie maximale stockée plus grande, induction de saturation et champ coercitif plus élevé).

La machine synchrone à aimant permanent est devenue compétitive par rapport à la machine asynchrone, même dans le domaine de la moyenne puissance. [29]



Figure. IV. 1 : Photographie de moteur à aimants en géométries cylindriques.

Le stator de la machine synchrone à aimant permanent est identique à celui d'une machine asynchrone, il est constitué d'un empilage de tôle magnétique qui contient des encoches dans les quelles sont logés trois enroulements identiques décalés entre eux de $2\pi/3$. Le rotor de la MSAP est généralement de deux types :

- rotor possédant des pièces polaires, servant à la concentration du flux d'induction dans lequel les aimants sont orientés soit parallèlement soit perpendiculairement à l'entrefer, soit de manière plus complexe. Dans ce type de machine, l'inducteur est à pôles saillants.
- rotor sans pièces polaires, donc à entrefer constante, dans lequel l'aimantation des aimants est généralement perpendiculaire à l'entrefer [27].

La machine que nous étudierons, dans ce mémoire est à pôles saillants.

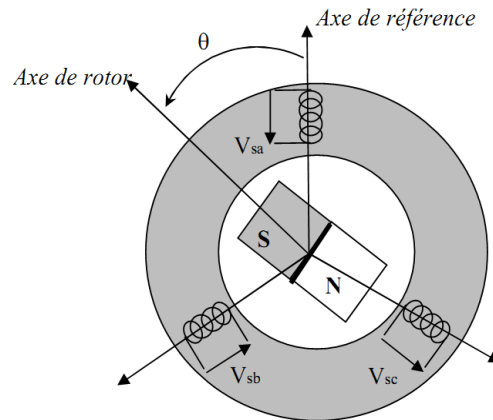


Figure. IV. 2 : Schéma d'une machine synchrone à aimant permanent [30].

IV.3 Domaine d'application

Le moteur synchrone à aimants permanents est utilisé dans une large gamme de puissance, allant de centaines de Watts (servomoteur) à plusieurs méga Watts (système de propulsion des navires), dans des applications aussi diverse que le positionnement, la synchronisation l'entraînement à vitesse variable, et la traction [31].

- il fonctionne comme compensateur synchrone.
- il est utilisé pour les entraînements qui nécessitent une vitesse de rotation constante, tels que les grands ventilateurs, les compresseurs et les pompes centrifuges, automobile et grâce au développement de l'électronique de puissance, l'association machine à aimants convertisseur de puissance a trouvé de nombreuses applications dans les domaines très divers tels que la robotique, la technologie de l'espace et dans d'autres applications plus particulières (domestique,...).

IV.4 Modélisation de la MSAP

Afin d'obtenir une formulation plus simple et de réduire la complexité du modèle de la machine, l'établissement de son modèle mathématique sera développé sur la base des hypothèses à savoir que :

- Le moteur possède une armature symétrique non saturée, les inductances propre et mutuelle sont indépendant des courants qui circulent dans les différents enroulements.
- La distribution des forces électromotrice, 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.

L'excitation étant faite par un aimant permanent, telle que le flux d'excitation est considéré comme constant, par ailleurs, l'aimant est considéré comme un enroulement sans résistance ni inductance propre et mutuelle, mais comme source de flux [32].

IV.4.1 Equations de tensions et flux

Les tensions, flux et courants statorique triphasés, sont écrits avec les notations vectorielles suivantes $[V_s]$, $[\Phi_s]$ et $[I_s]$ respectivement. L'équation tension dans le référentiel du stator s'écrit [25] :

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

Avec :

$$[V_s] = [V_{as} \ V_{bs} \ V_{cs}]^T, \quad [I_s] = [I_{as} \ I_{bs} \ I_{cs}]^T, \quad [\Phi_s] = [\Phi_{as} \ \Phi_{bs} \ \Phi_{cs}]^T$$

$$[R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix}$$

R_s Résistance des enroulements statoriques.

Les flux statoriques et rotoriques ont pour expression :

$$[\Phi_s] = [L_{ss}] \cdot [I_s] + [\Phi_f] \quad (\text{IV.2})$$

$$\text{Et } [\Phi_f] = \Phi_{sf} \begin{bmatrix} \cos(\theta) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \end{bmatrix}$$

Où :

Φ_{sf} : Valeur crête (constante) du flux crée par l'aimant permanent à travers les enroulements statoriques. Φ_{sf}

θ : Position absolue du rotor en degré électrique

$[L_{ss}]$ Étant la matrice des inductances statoriques.

Dans la machine à pôles saillants, la matrice des inductances propre statorique $[L_{ss}]$ est fonction de la position. Elle contient deux termes : $[L_{s0}]$ qui est constant, et $[L_{s2}(\theta)]$ qui est en fonction de l'angle $\theta = p \theta_m$, θ étant l'angle électrique et θ_m est la position mécanique du rotor par rapport au stator.

$$[L_{ss}] = [L_{s0}] + [L_{s2}(\theta)] \quad (IV.3)$$

Le terme $[L_{s0}]$ a pour expression

$$[L_{s0}] = \begin{bmatrix} L_{s0} & M_{s0} & M_{s0} \\ M_{s0} & L_{s0} & M_{s0} \\ M_{s0} & M_{s0} & L_{s0} \end{bmatrix} \quad (IV.4)$$

Le terme $[L_{s2}]$ s'écrit, dans le cadre de la théorie du premier harmonique

$$[L_{s2}(\theta)] = L_{s2} \begin{bmatrix} \cos(2\theta) & \cos 2(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos 2(\theta + \frac{4\pi}{3}) \\ \cos 2(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos 2(\theta + \frac{4\pi}{3}) & \cos(2\theta) \\ \cos 2(\theta + \frac{4\pi}{3}) & \cos(2\theta) & \cos 2(\theta - \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (IV.5)$$

Les inductances propre et mutuelle L_{s0} , M_{s0} , et L_{s2} sont des constantes.

En introduisant (IV.2) dans (IV.1) on aura :

$$[V_s] = [R_s] [I_s] + \frac{d}{dt} ([L_{ss}] [I_s] + [\Phi_f]) \quad (IV.6)$$

On remarque que l'équation (IV.6) est non linéaire et couplée pour supprimer ce problème on adopte des changements de variable et des transformations qui réduisent la complexité du système. Dans ce cas nous procédons à la Transformation de Park, qui consiste à transformer les enroulements immobiles (a, b, c) par des enroulements (d, q) tourne avec le rotor.

L'équation de mouvement de la machine est :

$$C_e - C_r - f \Omega = J \frac{d\Omega}{dt} \quad (IV.7)$$

Avec

J : Le couple d'inertie des masses tournantes ;

Cr : Couple résistant (ou statique) imposé par la charge mécanique ;

Ce : Couple électromagnétique ;

W : vitesse mécanique de rotation ;

f : Coefficients des frottements visqueux

IV.4.2 Transformation de Park

A l'aide de la transformation de Park, on passe des grandeurs statorique réelles (tension, flux courant) à leurs composantes fictives appelés les composantes d-q

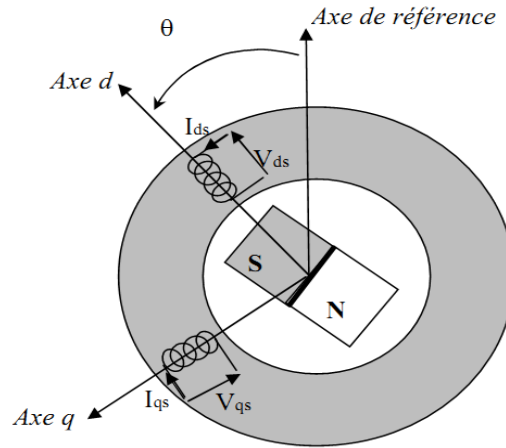


Figure. IV. 3 : Machine équivalente au sens de Park [30].

Dans le système d'équations (IV.6) effectuons le changement de la variable suivant [32]:

$$\begin{cases} [P(\theta)][V_{dqhs}] = [V_s] \\ [P(\theta)][I_{dqhs}] = [I_s] \end{cases} \quad (IV.8)$$

Avec :

$$[P(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \cos \theta & -\sin \theta \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (IV.9)$$

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

L'application de la transformation de Park à l'équation (IV.9) donne :

$$[P(\theta)][V_{dqhs}] = [R_s] [P(\theta)][I_{dqhs}] + \frac{d}{dt} ([L_{ss}] [P(\theta)][I_{dqhs}]) + \frac{d[\Phi_f]}{d\theta} \frac{d\theta}{dt} \quad (IV.10)$$

Avec

$$\frac{d}{dt} \rightarrow s$$

Si on prémultiplie tous ces termes par $[P(\theta)]^{-1}$ et en sachant que $[R_s] = R_s \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ on

peut écrire les équations simplifiées des tensions :

$$[V_{dqhs}] = [R_s] [I_{dqhs}] + [P(\theta)]^{-1} \left\{ \frac{d}{dt} ([L_{ss}] [P(\theta)] [I_{dqhs}]) + \frac{d|\Phi_f|}{d\theta} \frac{d\theta}{dt} \right\} \quad (IV.11)$$

Avec :

$$[P(\theta)]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos \theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ -\sin \theta & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (IV.12)$$

Les équations électriques dans le repère de Park :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s I_{ds} + \frac{d}{dt} \Phi_{ds} - \omega \Phi_{qs} \\ V_{qs} = R_s I_{qs} + \frac{d}{dt} \Phi_{qs} + \omega \Phi_{ds} \end{cases} \quad (IV.13)$$

Les flux s'écrivent :

$$\begin{cases} \Phi_{ds} = L_d I_d + \Phi_f \\ \Phi_{qs} = L_q I_q \end{cases} \quad (IV.14)$$

En introduisant (IV.14) dans (IV.13) on aura Le modèle électrique du MSAP sous la forme suivante :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s I_{ds} + L_{ds} \frac{d}{dt} I_{ds} - \omega L_{qs} I_{qs} \\ V_{qs} = R_s I_{qs} + L_{qs} \frac{d}{dt} I_{qs} + \omega L_{ds} I_{ds} + \omega \Phi_f \end{cases} \quad (IV.15)$$

IV.4.3 Expression de la puissance et du couple électromagnétique :

Selon Park, l'expression de la puissance s'écrit comme suit :

$$P(t) = V_{ds} I_{ds} + V_{qs} I_{qs} \quad (IV.16)$$

En remplaçant V_{ds} et V_{qs} par leur expressions il vient :

$$P(t) = \frac{2}{3} [R_s (I_{ds}^2 + I_{qs}^2) - (I_{ds} \frac{d}{dt} \Phi_{ds} + I_{qs} \frac{d}{dt} \Phi_{qs}) + \frac{d}{dt} (\Phi_{ds} I_{ds} + \Phi_{qs} I_{qs})] \quad (IV.17)$$

D'où :

Le 1^{er} terme représente la chute de tension Ohmiques (pertes par effet joule).

Le 2^{ème} terme représente la variation de l'énergie magnétique emmagasinée.

Le 3^{ème} terme représente la puissance transférée du stator au rotor à travers l'entrefer (puissance électromagnétique).

Sachant que :

$$P_e = C_e \Omega \quad (IV.18)$$

D'où :

$$C_e = \frac{3}{2} p [\Phi_{ds} I_{qs} - \Phi_{qs} I_{ds}] \quad (IV.19)$$

En remplaçant Φ_{ds} et Φ_{qs} par leur expressions il vient :

$$C_e = \frac{3}{2} p [(L_{ds} - L_{qs}) I_{ds} I_{qs} - \Phi_f I_{qs}] \quad (IV.20)$$

Avec

p : nombre de paire de pôles

D'après les équations (IV.15), (IV.20) et (IV.21), on obtient le système d'équations suivant :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d}{dt} I_{ds} = \frac{1}{L_{ds}} (V_{ds} - R_s I_{ds} + \omega L_{qs} I_{qs}) \\ \frac{d}{dt} I_{qs} = \frac{1}{L_{qs}} (V_{qs} - R_s I_{qs} - L_{ds} \omega I_{ds} - \omega \Phi_f) \\ C_e = \frac{3}{2} p [(L_{ds} - L_{qs}) I_{ds} I_{qs} - \Phi_f I_{qs}] \\ C_e - C_r - f \Omega = J \frac{d\Omega}{dt} \end{array} \right. \quad (IV.21)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{di_d}{dt} = \frac{R}{L} i_d + p \omega i_q + \frac{1}{L} u_d \\ \frac{di_q}{dt} = \frac{R}{L} i_q - p \omega i_d - \frac{\Phi_f p}{L} \omega u_d + \frac{1}{L} u_q \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{3p\Phi_f}{2J} i_d - \frac{1}{J} C_r + \frac{f}{J} \omega \end{array} \right. \quad (IV.22)$$

IV.5 .Commande Vectorielle

IV.5.1 Principe de la commande vectorielle

La commande vectorielle des machines à courants alternatifs est maintenant bien connue. De nombreux industriels commercialisent des variateurs de vitesse pilotés par des machines synchrones et asynchrones utilisant ce mode de contrôle. Le principe de la commande vectorielle est identique à celui de la commande d'une machine à courant continu à excitation séparée. Il faut cependant se placer dans un repère particulier où le couple électromagnétique s'exprime simplement en fonction des composantes des courants suivant les deux axes (axe d et axe q).

Habituellement, la composante d'axe d du courant statorique joue le rôle de l'excitation et permet de régler la valeur du flux dans la machine. La composante d'axe q joue le rôle du courant d'induit et permet de contrôler le couple [33].

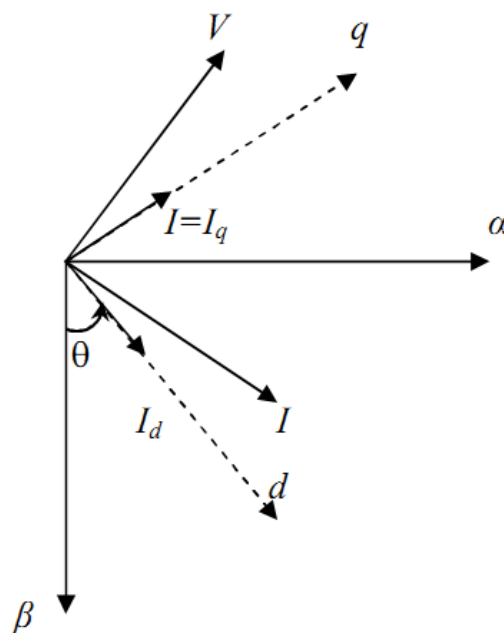


Figure. IV. 4 : Diagramme de phase de la MSAP dans le référentiel lié au champ tournant

La Figure. IV. 4 montre que la position instantanée du rotor, et par conséquent le flux rotorique est situé à un angle θ par rapport à l'axe α du référentiel (α, β) liée au stator. L'application de la commande vectorielle nécessite que l'axe de la composante I_q soit en quadrature par rapport au flux rotorique. Si le courant I_d est dans la même direction que flux rotorique, le flux statorique suivant l'axe ' d ' s'ajoute au flux des aimants, ce qui donne une augmentation au flux d'entrefer (surexcitation). D'autre part, si le courant I_d est négatif le

flux statorique sera en opposition à celui du rotor, ce qui donne une diminution du flux d'entrefer (sous excitation). Le courant I_d doit être nul, lorsque le système travaille à couple optimal linéaire.

$$I_d = 0 \rightarrow I_q = I_s \quad (\text{IV.23})$$

Donc :

$$\Phi_d = \Phi_f \quad (\text{IV.24})$$

Le couple électromagnétique devient :

$$C_e = \frac{3}{2} p \Phi_f I_d \quad (\text{IV.25})$$

$$C_e = K_t I_d \quad (\text{IV.26})$$

Dans le cas de fonctionnement en survitesse, une stratégie de défluxage est appliquée, la consigne de courant I_d n'est plus égale à zéro et le couple est limité de manière à toujours respecter la relation suivante :

$$\sqrt{I_d^2 + I_q^2} \leq I_{max} \quad (\text{IV.27})$$

Où : I_{max} est le courant maximal

Cette stratégie permet l'exploitation optimale des capacités magnétique de la machine c.à.d. un fonctionnement à couple constant si la vitesse est inférieure à la vitesse nominale à puissance constante lorsque la vitesse excède la vitesse nominale, le flux obéit à la relation non linéaire suivante :

$$\begin{aligned} \Phi_{ref} &= \Phi_{rnom} & \text{Si} & \quad \omega \leq \Omega_{nom} \\ \Phi_{ref} &= \frac{\Phi_{rnom}}{\omega / \Omega_{nom}} \Omega_{nom} & \text{Si} & \quad \omega \geq \Omega_{nom} \end{aligned} \quad (\text{IV.28})$$

Avec :

Ω_{nom} : La vitesse de rotation nominale,

Φ_{rnom} : Le flux rotorique nominale,

Φ_{ref} : Le flux rotorique de référence.

Pour ce type d'alimentation, la commande devient plus compliquée du fait qu'on doit considérer la dynamique du stator en plus de celle du rotor.

En faisant appel aux équations électriques et magnétiques, on obtient les équations suivantes faisant apparaître les variables de commande.

$$\begin{cases} R_s I_d + L_d \frac{di_d}{dt} = V_d - \omega L_q I_q \\ R_s I_q + L_q \frac{di_q}{dt} = V_q + \omega L_d I_d + \omega \Phi_f \end{cases} \quad (\text{IV.29})$$

Ces équations donnent la structure de commande en tension.

IV.5.2 Bloc de compensation

En plus du bloc de la structure de commande, il y a un bloc de compensation dont les équations sont données comme suit :

Posons :

$$\begin{cases} V_{d1} = V_d - e_q \\ V_{q1} = V_q - e_d \end{cases} \quad (\text{IV.30})$$

Sachant que :

$$\begin{cases} e_d = -(\omega L_d I_d + \omega \Phi_f) \\ e_q = \omega L_q I_q \\ V_q = V_{q1} - e_d \\ V_d = V_{d1} - e_q \end{cases} \quad (\text{IV.31})$$

La compensation a pour effet de découpler les deux axes grâce à une reconstitution en temps réel de ces perturbations ($e_d(s)$ et $e_q(s)$). Dans de telles conditions, le système devient linéaire [34].

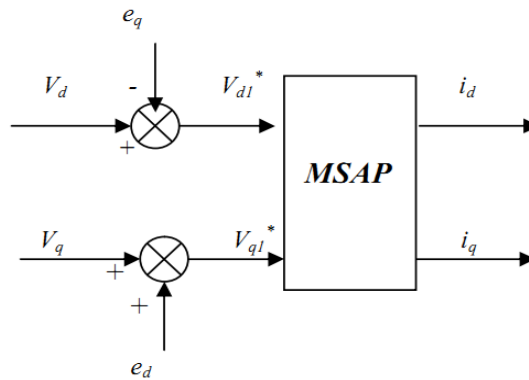


Figure. IV. 5 : Schéma Bloc de compensation

IV.5.3 Régulation

Dans le cas de notre étude on se limite à la technique de control par des régulateurs PI qui permettant des performances satisfaisantes tant du point de vue de la régulation ou bien du point de vue de la stabilité, précision et rapidité.

Notons que par analogie à la régulation utilise pour la MCC, deux boucles internes sont réalisées pour le contrôle direct du flux et du couple, ou indirectement par leurs composantes respectives en courant.

A. Correcteur du flux

Le schéma fonctionnel du contrôle de flux est donné par:

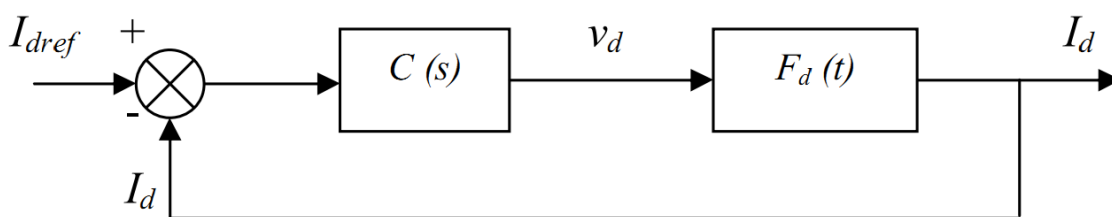


Figure. IV. 6 : Régulation du flux

$$F_d(s) = \frac{\frac{1}{R_s}}{1 + T_{ds}s} = \frac{I_{ds}}{V_{ds} s} \quad / \quad T_{ds} = \frac{L_{ds}}{R_s} \quad (IV.32)$$

Le régulateur(Reg_d) est choisit comme étant un régulateur proportionnel et intégral, avec la fonction de transfert de la forme suivante :

$$C(s) = \text{Reg}_d(s) = \frac{K_{id}}{s} \left(1 + \frac{K_{pd}}{K_{id}} s\right) \quad (\text{IV.33})$$

La fonction de transfert en boucle ouverte est:

$$FTBO_d = \frac{K_{id}}{s} \left(1 + \frac{K_{pd}}{K_{id}} s\right) \frac{\frac{1}{R_s}}{1 + T_{ds} s} \quad (\text{IV.34})$$

La démarche à suivre consiste à procéder à la compensation de la constante de temps du système, en posant : $\frac{K_{pd}}{K_{id}} = T_{ds}$

Ce qui ramène les fonctions de transfert des courants en boucle fermée aux expressions suivantes :

$$FTBF_d = \frac{1}{1 + \tau_d s} = \frac{I_{sd}}{I_{sd \text{ ref}}} \quad (\text{IV.35})$$

Avec : $\tau_d = \frac{R_s}{K_{id}}$

En choisissant ($\tau_d = T_{ds}$), donc: $K_{id} = \frac{R_s}{T_{ds}} = \frac{R_s^2}{L_d}$ / d'où: $K_{pd} = K_{id} \cdot T_{ds}$

B. Correcteur de couple

De la même manière que le calcul précédent, on détermine le régulateur du couple (crt I_q):

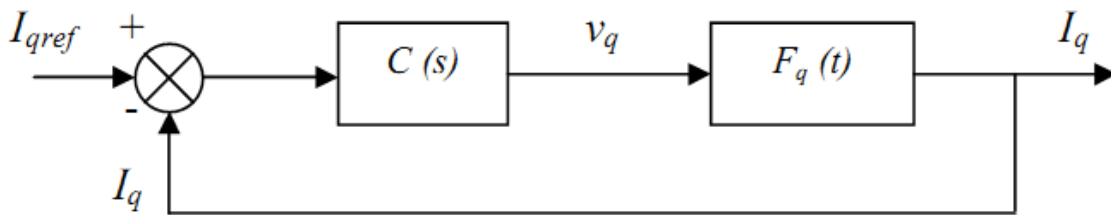


Figure. IV. 7 : Régulation du couple

Sachant que (Reg q) à une même forme que (Reg d), donc :

$$FTBO_q = \frac{K_{iq}}{s} \left(1 + \frac{K_{pq}}{K_{iq}} s\right) \frac{\frac{1}{R_s}}{1 + T_{qs} s} \quad (\text{IV.36})$$

$$FTBF_q = \frac{1}{1 + \tau_q s} = \frac{I_{sq}}{I_{sq \text{ ref}}} \quad (\text{IV.37})$$

Et :
$$\tau_q = \frac{R_s}{K_{iq}}$$

En choisissant ($\tau_q = T_{qs}$), donc:
$$K_{iq} = \frac{R_s}{T_{qs}} = \frac{R_s^2}{L_q} \quad / \text{ d'où: } K_{pq} = K_{iq} \cdot T_{qs}$$

C. Correcteur de vitesse

Le schéma fonctionnel du contrôle de vitesse est donné par:

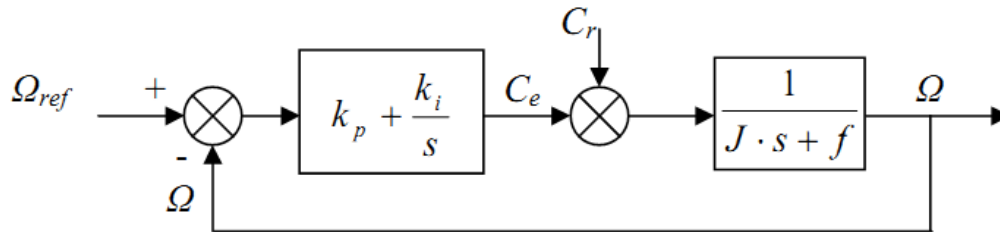


Figure. IV. 8. Régulation de la vitesse

Pour la déduction des paramètres du contrôleur, la boucle de vitesse doit avoir une dynamique plus rapide que la boucle de position. La fonction de transfert de la vitesse en boucle ouverte est donnée par ($C_r=0$), On a ajouté à cette boucle un filtre pour éliminer le dépassement dû à l'existence d'un (Zéro) :

Dans la FTBF du Système (machine + régulateur PI).

La fonction de transfert du régulateur de vitesse est donnée par :

$$K_p + \frac{K_i}{s} = \frac{K_p}{s} \left(s + \frac{K_i}{K_p} \right) \tag{IV.38}$$

La fonction de transfert de la vitesse en boucle ouverte est donnée par ($C_r=0$) :

$$FTBO_{\Omega} = \frac{K_p}{s} \left(s + \frac{K_i}{K_p} \right) \frac{1}{J s + f} \tag{IV.39}$$

En adoptant la méthode de placement de pôle et la fonction de transfert de la vitesse en boucle fermée est donnée par:

$$FTBF_{\Omega} = \frac{\Omega(s)}{\Omega_{ref}(s)} = \frac{\frac{K_p}{s} \left(s + \frac{K_i}{K_p} \right)}{J s^2 + (f + K_p) s + K_i} \tag{IV.40}$$

La $FTBF_\Omega$ possède une dynamique de 2^{ème} ordre, par identification à la forme canonique du 2^{ème} ordre l'équation caractéristique peut être représentée comme suit :

$$\frac{1}{\omega_0} s^2 + \left(\frac{2\xi}{\omega_0}\right) s + 1 \quad (\text{IV.41})$$

Alors :

$$\frac{J}{K_i} = \frac{1}{\omega_0}$$

$$\frac{f + K_p}{K_i} = \frac{2\xi}{\omega_0}$$

Avec :

ξ : Coefficient d'amortissement.

On choisit alors le coefficient d'amortissement ξ et ω_0 on déduit K_i et K_p :

Avec :

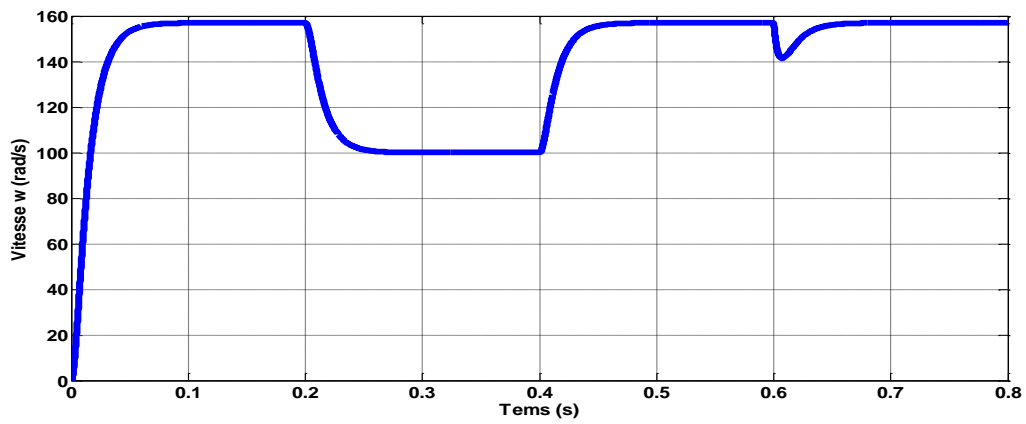
$$K_i = J\omega_0^2$$

$$K_p = \frac{2\xi K_i}{\omega_0} - f \quad (\text{IV.42})$$

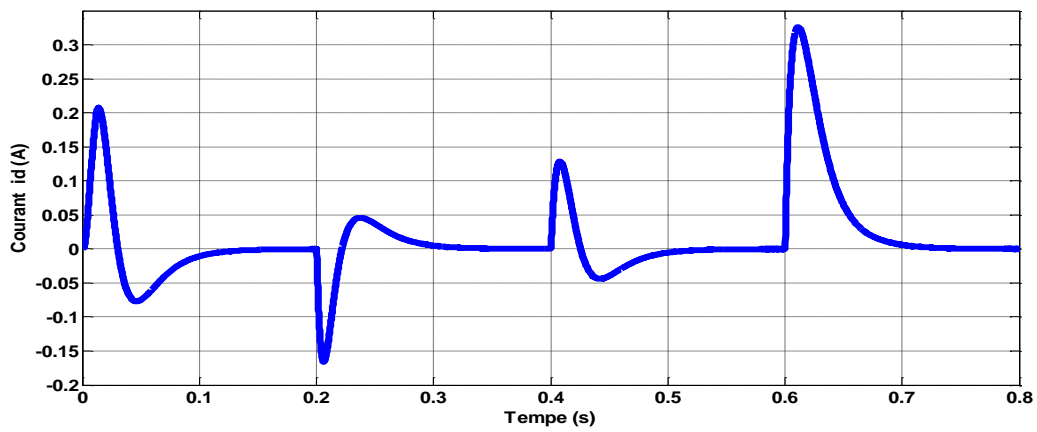
Donc :

$$\begin{cases} K_i = \frac{4J}{\tau^2} \\ K_p = K_i \cdot \tau \end{cases} \quad \text{avec : } \tau = \frac{L_q}{R_s} \quad (\text{IV.43})$$

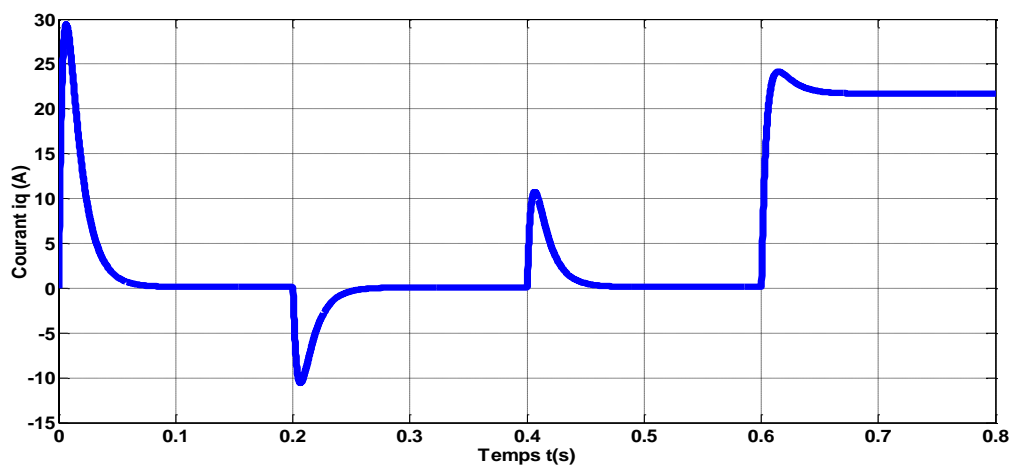
IV.6. Résultats de simulation



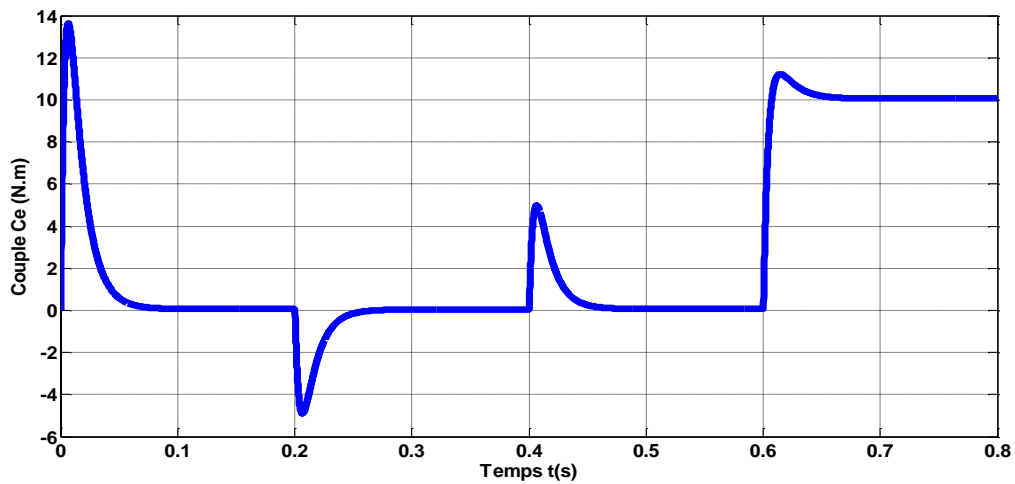
(A)



(B)



(C)



(D)

Figure. IV. 9. (A,B,C,D) représentent les résultats de simulation de la commande vectorielle appliquée à une machine synchrone (MSAP) .

Un changement de vitesse a été imposée à la machine dans l'instant 0.6 s, on a appliqué un couple de charge $C_r = 10$ N.m, d'après les figures on observe que la commande suit parfaitement sa référence sans présence de dépassement et avec un temps de réponse très acceptable le couple électromagnétique est donné par la figure (IV. 9) le défluxage est parfait.

IV.7.Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la commande vectorielle appliquée à la MSAP, cette stratégie permet le découplage entre le couple et le flux de la machine afin d'assurer une commande souple de sa vitesse.

Le réglage de la vitesse de la MSAP par le régulateur PI donne de bonnes résultats, réponse rapide de la vitesse et sans dépassement, mais un comportement sensible aux variations des paramètres (résistance statorique).

Conclusion Générale

Conclusion générale

La raréfaction et l'augmentation du coût des énergies fossiles d'une part, et la prise de conscience globale des problèmes liés au réchauffement climatique d'autre part, ont ces dernières années conduit au développement des véhicules hybrides qui sont maintenant une solution industrielle pour réduire la consommation de carburant, donc les émissions de CO₂ et les rejets de polluants. Ce constat est confirmé par le fait qu'une majorité de constructeurs automobiles disposent déjà, ou vont disposer prochainement, de véhicules hybrides dans leurs catalogues.

L'augmentation du coût des énergies fossiles et la prise de conscience globale des problèmes liés au réchauffement climatique, conduit les chercheurs et l'industrie au développement des véhicules hybrides qui sont maintenant une solution industrielle pour réduire la consommation de carburant.

Ce travail présenté dans cette mémoire porte sur le dimensionnement d'un véhicule électrique composé d'une batterie Li-ion, un Supercondensateur, un Moteur MSAP et une génératrice de recharge.

Nous avons consacré le premier chapitre sur l'historique et les différentes architectures possibles des véhicules électriques avec une présentation des différents modes de fonctionnement possible.

Dans le deuxième chapitre, on a présenté les caractéristiques des batteries, Supercondensateurs et moteurs qui peuvent être utilisés dans les véhicules électriques.

Le troisième chapitre est destiné au dimensionnement des différents composants liés au VEH, avec prise en considération de plusieurs contraintes comme le poids et l'énergie à fournir.

Le quatrième chapitre est pour simuler un système représentant un moteur MSAP avec des commentaires sur les différentes courbes.

Enfin, et dans le but d'améliorer ces types de systèmes hybrides, des perspectives sont envisagées à savoir:

- Ajout d'autres sources renouvelables
- Proposition d'une autre commande pour la gestion d'énergie entre les sources.

Bibliographie

- [1] : I. Husain (2003). *Electric and Hybrid Vehicles : Design Fundamentals*. CRC Press LLC.
- [2] : Dossier créé avec la collaboration du Groupement National pour la Formation Automobil Michel WaStRaEtE Formateur expert ANFA / Édition 2011.
- [3] S.DELPERT, « Evaluation de stratégies de commande pour véhicules hybrides parallèle », doctorat de l'Université de Valenciennes et de Hainaut Cambresis ,2002
- [4] : Samah SAKER, «Modélisation et Contrôle du système, Pile à Combustible, Convertisseurs et Supercondensateur», Université Mohamed Khider – Biskra Faculté des Sciences et de la technologie.
- [5] G.ROUSSEAU, « Véhicule hybride et commande optimale », L'école National Supérieure des Mines De Paris, 2008.
- [6] : A.DUBRAY, « Adaptation des lois de gestion d'énergie des véhicules hybrides suivant le profil de mission suivi », Doctorat de l'Institut Polytechnique de Grenoble, 2002.
- [7] : F. Ammann, “Conception d'un convertisseur d'électronique de puissance pour un système de stockage hybride batteries/super-condensateurs: application dans les véhicules électriques,” Thèse de doctorat, Université de Québec, 2012.
- [8] :D, Tedjani MESBAHI, «Influence des stratégies de gestion d'une source hybride de véhicule électrique sur son dimensionnement et sa durée de vie par intégration d'un modèle multi-physique» Thèse préparée dans les Laboratoires S2ET ESTACA'LAB-Laval & L2EP-Lille Ecole Doctorale SPI 072 (Centrale Lille)
- [9] :T. Mesbahi, N. Rizoug, P. Bartholomuse, and P. Le Moigne, “Prise en compte du vieillissement pour la modélisation d'une source hybride Batterie/ Supercondensateur,” in Symposium de Génie Électrique,Cachan, France ,2014.
- [10] :R. Sadoun, “Intérêt d'une Source d'Energie Electrique Hybride pour véhicule électrique urbain – dimensionnement et tests de cyclage,” Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Lille, 2013.
- [11] : M.-Y. Ayad, “Mise en œuvre des supercondensateurs dans les sources hybrides continues,” Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine, 2004.
- [12] : L. Gaines, R. Cuenca, *Costs of Lithium-Ion Batteries for Vehicles*, Center for Transportation Research, Energy Systems Division, Mai 2000.
- [13] : A. W. Stienecker, T. Stuart, and C. Ashtiani, “An ultracapacitor circuit for reducing sulfation in lead acid batteries for Mild Hybrid Electric Vehicles,” *J. Power Sources*, vol. 156, no. 2, pp. 755–762, Jun. 2006.

- [14] :N. Rizoug, G. Feld, B. Barbedette, and R. Sadoun, "Association of batteries and supercapacitors to supply a micro-hybrid vehicle," 2011 IEEE Veh. Power Propuls. Conf., pp. 1–6, Sep. 2011.
- [15] : M. Ehsani, Y. Gao, S. E. Gay et A. Emadi (2005). Modern electric, hybrid electric, and fuel cell vehicles : fundamentals, thyeory, and design. CRC Press LLC.
- [16] : R. Mosdale (février 2003). Transport électrique routier - Batteries pour véhicules électriques, Dans Techniques de l'ingénieur, numéro D5565.
- [17] : Aïman nouh .(contribution au développement d'un simulateur pour les véhicules électriques routiers) l'Université de Technologie de Belfort-Montbéliard et par l'Université de Franche-Comté *Thèse préparée au sein du laboratoire Systèmes et Transports (SeT), UTBM, Belfort, France*.
- [18] :Matthieu URBAIN «MODELISATION ELECTRIQUE ET ENERGETIQUE DESACCUMULATEURS LITHIUM-ION.ESTIMATION EN LIGNE DU SOC ET DU SOH» DOCTORAT DE L'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE LORRAINED ate de soutenance : 04 juin 2009
- [19] : A. Devie, "Caractérisation de l'usage des batteries Lithium-ion dans les véhicules électriques et hybrides. Application à l'étude du vieillissement et de la fiabilité," Thèse de doctorat, Université Claude Bernard Lyon 1, 2012.
- [20] : C. Laegeot, "Développement de supercondensateurs carbone/carbone : relation entre la taille des ions de l'électrolyte et la taille des pores de la matière active," Thèse de doctorat, Université de Toulouse, 2009.
- [21] : L. Delfour, "Simulation d'un supercondensateur a l'échelle atomique," Thèse de doctorat, Université de la Méditerranée Aix-Marseille II, 2011.
- [22] : "FAQ sur les supercondensateurs - Supercondensateur." [Online]. Available <http://www.supercondensateur.com/faq>. [Accessed: 29-Dec-2014].
- [23] : Ahmed BOUCHERIT «Conception d'un convertisseur de puissance pour les véhicules électriques multi-sources» DOCTEUR DE L'UNIVERSITE DE TECHNOLOGIE DE BELFORT-MONTBELIARD Soutenue le 16 décembre 2011 .
- [24] : <http://www.aksa.com.tr/Content/Front/images/urunler/FR/AAP-1200.pdf>
- [25] :D. Ilyes TEGANI (Optimisation et contrôle d'un micro smart grid utilisant une pile à combustible, des supercondensateurs, des) Université Mohamed Khider – Biskra 2016batteries, une éolienne et une source photovoltaïque.

[26] : <http://www.directindustry.fr/prod/weg/product-12491-478137.html>

[27] : A. KADDOURI " Étude d'une Commande Non Linéaire Adaptative d'une machine Synchrone à Aimants Permanents ", Thèse de Doctorat, Université Laval, Québec,2000.

[28] : W. Leonhard, "Control of AC Drives", spring, Verlag, Berlin, 1984.

[29] : BENBRAHIM AMEL "Commande Prédicative Généralisée d'une Machine Synchrone à Aimants Permanents" Magistère en Electrotechnique, Université de BATNA, 2009.

[30] : F. Khatounian " Contribution a la Modélisation, L'Identification et à la Commande d'une Interface Haptique à un Degré de Liberté Entraînée par une Machine Synchrone à Aimants Permanents " Thèse de Doctorat, De L'Ecole Normale Supérieure de Cachan, France, 2006.

[31] : A. Kassatkine, " Electrotechnique élémentaire", Eddition Mir, Moscou, 1987.

[32] : J.Lesenne, F.Notelet, G.Seguir, " Introduction à l'éctrotechnique approfondie ", Technique et Documentation, Paris XI, 1981.

[33] : F. Labrique et G. Séguier, "La conversion Continu-Alternatif", Technique et Documentation, Paris, 1995.

[34] : LAHOUEL DALILA "Commande Non Linéaire Adaptative D'une Machine Synchrone à Aimants Permanents" , Magistère en Electrotechnique ,Université de BATNA , 2009