

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République algérienne démocratique populaire  
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي  
Ministère de l'enseignement supérieur et de la  
Recherche scientifique  
جامعة حسيبة بن بوعلي  
Université Hassiba Ben Bouali Chlef  
Faculté de technologie



Département électrotechnique

**MEMOIRE DE MAGISTER EN GENIE ELECTRIQUE**

Option : entraînement des systèmes électriques

**Présenté par Mr GHARBI HENNI**

Ingénieur d'Etat en électrotechnique

**THEME**

**Modélisation et Commande d'un  
véhicule électrique hybride**

**JURY**

Bachir BELMADANI  
Med Sghir BOUCHERIT  
Khelifa BENMANSOUR

Mohamed TADJINE  
Abdelkader DJAHBAR

Professeur à UHBB Chlef  
Professeur à ENP el-harrach  
Maitre de Conférence  
université de Médéa  
Professeur à ENP el-harrach  
Maitre de Conférence  
UHBB Chlef

Président  
Encadreur  
Co encadreur

Examineur  
Examineur

Année 2014/2015

# DEDICACE

*Je dédie ce modeste travail,  
A mes parents, à ma femme et mes enfants : malek,  
hadjer et surtout le petit abdeljetah.  
A tous mes amis de la promotion école doctorale  
génie électrique 2012-2013.*

## **REMERCIEMENTS**

Je tiens à remercier chaleureusement mes encadreurs M.S. BOUHRIT et K. BENMANSOUR pour ces conseils bénéfiques et judicieux.  
Comme Je remercie tous ceux qui, d'une manière ou d'une autre, ont contribué à la réussite de ce travail et en particulier Guenidi Sif Eddine .  
Par ailleurs j'exprime mon gratitude envers tous mes enseignants de poste graduation.

# Table des matières

<b>INTRODUCTION GENERALE.....</b>	<b>1</b>
<b>1 – PRESENTATION DES VEHICULES ELECTRIQUES HYBRIDES</b>	
1.1 Introduction.....	3
1.2 Le véhicule hybride : du pourquoi au comment .....	3
1.3 Classification par hybridation du véhicule.....	5
1.3.1 Les voitures micro hybrides .....	5
1.3.2 Les semi hybrides.....	5
1.3.3 Le <i>full</i> hybride.....	6
1.3.4 Hybride rechargeable.....	6
1.4 Le taux d'hybridation (TH).....	6
1.5 Classification par architecture des véhicules hybride.....	8
1.5.1 L'hybride série.....	8
1.5.2 L'hybride parallèle.....	9
1.5.3 La combinaison des deux.....	10
1.6 Principaux modes de fonctionnement d'un VHE.....	12
1.7 Perspective de l'automobile hybride.....	15
<b>2- MODELISATION DES ORGANES DU VEHICULE ELECTRIQUE</b>	
<b>    HYBRIDE</b>	
2.1 Vue globale du groupe motopropulseur.....	18
2.2 Description des modèles.....	19
2.2.1 Le modèle dynamique du véhicule.....	19
2.2.2 Les résistances du véhicule .....	20
2.2.3 Modèle du pneumatique.....	27
2.2.3 Le moteur thermique.....	28
2.2.4 La boîte vitesse.....	28

2.2.5	La batterie.....	29
2.2.6	La Motorisation électrique .....	36
2.2.6.1	Moteurs asynchrones (MAS).....	37
2.2.6.2	Moteurs à courant continu (MCC) .....	38
2.2.6.3	Moteurs synchrones .....	39
2.2.6.3.1	Le moteur synchrone à aimants permanents (MSAP) ....	39
2.2.6.3.2	Le moteur synchrone à rotor bobiné (MSRB).....	39
2.2.6.3.3	Le moteur à réluctance variable (MRV).....	40
2.2.6.3.4	Le moteur synchrone à double excitation (MSDE).....	40
2.2.6.4	Le choix du moteur électrique.....	44
2.2.6.5	Modélisation de la machine asynchrone.....	44
2.2.7	Commande vectorielles d'un moteur asynchrone.....	54
2.2.7.1	Théorie de la commande vectorielle de la MAS .....	55
2.2.7.1.1	Modèle de la machine asynchrone .....	55
2.2.7.1.2	Principe de la commande vectorielle .....	56
2.2.7.1.3	Orientation du flux rotorique .....	57
2.2.7.1.4	Méthode directe de la commande vectorielle.....	59
2.2.7.2	Mise en œuvre de la commande vectorielle de la MA .....	62
2.2.7.2.1	Mise en évidence du découplage entre les axes d-q .....	62
2.2.7.2.2	Commande vectorielle avec découplage par compensation .....	63
2.2.7.3	Régulation de vitesse de la machine asynchrone .....	69
2.2.7.3.1	Synthèse du correcteur PI (de vitesse) .....	69
2.2.7.3.2	Limitation du courant $I_{sq}$ .....	71
2.2.7.3.3	Technique de défluxage.....	71
2.2.8	Train planétaire.....	74
2.2.9	Convertisseurs électroniques continu-alternatif.....	74
2.2.10	Contrôleur électronique.....	75
2.2.10.1	Les éléments de base d'une « ECU » (Electronic Control Unit)..	76

### **3- GESTION D'ENERGIE D'UN VEHICULE HYBRIDE**

3.1 Introduction.....	79
3.2 Principe de la commande d'un véhicule hybride.....	79
3.3 Présentation générale des lois de gestion d'énergie.....	80
3.4 Stratégie de commande.....	82
3.4.1 principe.....	82
3.4.2 Paramètres d'entrées et variables de sortie.....	83
3.5.3 Objectif de la stratégie de commande.....	83
3.5 Types de stratégies.....	84
3.5.1 Stratégie par règle fixe rule-based.....	85
3.5.1.1 stratégie de commande flue.....	86
3.5.1.2 Stratégie floue basée sur le rendement .....	87
3.5.1.3 fuzzy torque distribution control.....	88
3.5.2 Stratégie par fonction d'optimisation.....	79
3.5.2.1 exemple de fonction par optimisation en temps réel.....	90
3.6 Conclusion.....	90

#### **4- SIMULATION ET STRATEGIES DE COMMANDE**

##### **D'OPTIMISATION GLOBALE**

Introduction.....	92
4.1 Architecture choisie.....	92
4.2 Choix et dimensionnement des composants du groupe motopropulseur .93	
4.2.1 le véhicule .....	93
4.2.2 Le moteur thermique.....	93
4.2.3 Le moteur électrique.....	94
4.2.4 La batterie.....	95
4.3 Simulation du véhicule hybride .....	96
4.3.1 Notion du cycle de vitesse.....	96
4.3.2 Hypothèses .....	98

4.3 .3 Illustration des différents modes de fonctionnement.....	99
4.3.3.1 Le mode tout électrique .....	99
4.3.3.1.1 Première période dans la zone urbain.....	99
4.3.3.1.2 Deuxième période de zone urbain.....	101
4.3.3. 2 Le mode hybride(troisième période) .....	102
4.4 Conclusion .....	110
<b>5- CONCLUSION.....</b>	<b>111</b>

# RESUME

Ces dernières décennies une grande attention est donnée par la communauté mondiale au problème environnemental, notamment la réduction de la couche d'ozone. Parmi, les causes fondamentales de l'augmentation de la couche d'ozone, vient les émissions des gaz nocifs à l'environnement, en particulier par les véhicules classiques (fonctionnant avec des moteurs à combustion). Dans, ce travail, on s'intéresse à l'introduction des moteurs électriques qui sont non polluants dans les véhicules automobiles. Ces véhicules qui sont hybrides fonctionnent simultanément avec deux types de moteurs.

Tout d'abord, une modélisation rigoureuse de la problématique est nécessaire. Ensuite, les problèmes de commande et de gestion des flux d'énergie sont à faire. Ce mémoire est consacré à la modélisation, la commande et à la supervision par simulation d'un certain nombre d'éléments du véhicule électrique.

**Mots Clés :** Véhicules électriques hybrides, gestion d'énergie, stratégie de commande

## **Abstract :**

In recent decades much attention is given by the global community to the environmental problem, including the reduction of the ozone layer. Among the root causes of the increase of the ozone layer, has emissions of harmful gases to the environment, particularly by conventional vehicles (operating with combustion engines). In this work, we are interested in the introduction of electric motors that are non-polluting in motor vehicles. These hybrid vehicles are operated simultaneously with two types of engines.

First, a rigorous modeling of the problem is needed. Then, the problems of control and management of energy flows to be made. This thesis is devoted to the modeling, control and supervision by simulation of a number of elements of the electric vehicle.

**Key Words :** Hybrid electric vehicle, Energie Management, Control Strategie.

## **ملخص:**

في العقود الأخيرة كثرت الاهتمام من قبل المجتمع الدولي لمشكلة البيئية، بما في ذلك الحد من طبقة الأوزون. ومن بين الأسباب الجذرية لزيادة طبقة الأوزون، انبعاثات الغازات الضارة بالبيئة، ولا سيما من قبل السيارات التقليدية (التشغيل مع محركات الاحتراق). وفي هذا العمل، ونحن مهتمون بالمحركات الكهربائية في السيارات التي هي غير الملوثة. يتم تشغيل المركبات الهجينة في وقت واحد مع نوعين من المحركات.

أولاً، نموذج دقيق للمشكلة ضروري. بعد ذلك، مشاكل التحكم وإدارة الطاقة تتدفق في هذا الشأن. ويكرس هذه الأطروحة إلى النمذجة والمراقبة والإشراف عن طريق المحاكاة من عدد من العناصر من السيارة الكهربائية.

**كلمات مفتاحية :** السيارات الكهربائية الهجينة ' إدارة الطاقة ' إستراتيجية التحكم.



## **INTRODUCTION GENERAL**

Depuis plusieurs années, les fluctuations du prix du pétrole, sa possible raréfaction et les méfaits des gaz néfastes à l'environnement ont déclenché une partie des récentes études sur notre système de transport. Cette prise de conscience collective a entraîné des réglementations toujours plus strictes sur les émissions polluantes et la consommation des véhicules, qui sont ainsi devenues deux critères primordiaux pour la conception de nouveaux véhicules. L'amélioration du rendement du moteur thermique, la réduction des émissions par post-traitement, l'optimisation des stratégies de commande désormais numériques, ont permis d'importants progrès, mais atteignent aujourd'hui leurs limites. Pour répondre au défi d'une réduction encore accrue des consommations et émissions, l'industrie automobile s'est tout d'abord tournée vers les véhicules électriques qui éliminent la combustion à leur bord et ainsi ne produisent plus d'émissions polluantes. Par contre, leur principal handicap réside dans la batterie encore très lourde et très coûteuse. L'intérêt des consommateurs pour ce type de véhicules dépend donc des progrès technologiques qui vont être réalisés dans les années à venir. Aujourd'hui, l'autonomie des véhicules électriques dépend fortement du style de conduite utilisé. Même un conducteur économe ne peut espérer atteindre que 200 km d'autonomie pour une durée de recharge très longue (de 6 à 8 heures). De plus, les véhicules électriques nécessitent l'installation d'infrastructures spécifiques pour la recharge de la batterie aussi bien dans les garages des particuliers que dans des stations publiques pour permettre les longs trajets. C'est pourquoi, de nouvelles technologies sont à l'étude, en particulier les véhicules électriques hybrides.

Un véhicule hybride combine un système électrique (un ou plusieurs moteurs électriques et une batterie) avec un moteur à combustion interne pour utiliser les avantages de chaque organe et ainsi, améliorer le rendement de la transmission. La batterie peut être rechargée à bord du véhicule, ce qui évite l'installation coûteuse de nouvelles infrastructures : l'autonomie du véhicule ne dépend alors plus que de la capacité de son réservoir comme dans un véhicule conventionnel. Cependant, ce type de véhicule, disposant de deux sources d'énergie distinctes, pose de nouveaux problèmes de répartition de la puissance demandée aux roues entre les sources disponibles. Ces stratégies de répartition sont communément appelées lois de gestion d'énergie et font l'objet de notre travail.

**CHAPITRE 1 -  
PRESENTATION DES  
VEHICULES ELECTRIQUES  
HYBRIDES.**

# Présentation des véhicules électriques hybrides

## 1.1 Introduction

Un véhicule hybride est un véhicule disposant d'au moins deux sources d'énergie, typiquement un réservoir de carburant et une batterie, associés à des machines de conversion de l'énergie, telles que les moteurs électriques et les moteurs à Combustion interne. . On définit communément trois familles d'architectures hybrides :

- Les hybrides parallèles, pour lesquels le moteur thermique fournit directement un couple aux roues,
- Les hybrides séries, où le moteur thermique n'est pas directement lié aux roues,
- Les hybrides combinés, dont l'architecture reprend les caractéristiques des hybrides série et parallèle.

## 1.2 Le véhicule hybride : du pourquoi au comment

Cette partie aura pour objectif de rappeler les différents aspects concernant le véhicule hybride.

Elle fera office d'introduction quant à l'utilisation de tels véhicules ainsi que de sa complexité de mise en œuvre.

Dans un premier temps, nous rappellerons l'intérêt de ce type de véhicule. Les points essentiels du véhicule hybride seront rappelés dans un second temps, et diverses classifications possibles seront résumées. Une perspective de l'automobile hybride sera ensuite exposée succinctement. Finalement, nous présenterons les lois de gestion applicables sur ces véhicules

### *Pourquoi l'hybride ?*

De nos jours tous les véhicules utilisent comme source d'énergie principale des carburants d'hydrocarbures (essence ou gasoil). Ces carburants sont pour l'instant les seuls à pouvoir être stockés facilement avec une densité énergétique volumique élevée ( $\approx 10$  kWh/litre). À titre indicatif, les meilleures batteries qui peuvent équiper les véhicules électriques disposent seulement d'une densité énergétique volumique voisine de 200 Wh/litre (Li-Ion, Li-Polymer)[17] En outre, les batteries ont un temps de recharge très long. On comprend fort aisément la préférence des constructeurs pour le véhicule thermique au début du vingtième siècle.

Pour propulser le véhicule, une combustion entre carburant et comburant est réalisée dans le moteur thermique. L'énergie calorifique produite par la combustion du mélange gazeux carburé

## Présentation des véhicules électriques hybrides

est transformée en une énergie mécanique. Un moteur parfait ne dégagerait que de l'eau (H<sub>2</sub>O) et du dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>). Mais actuellement la combustion d'hydrocarbures dans les moteurs à combustion est telle qu'elle engendre des émissions de polluants.

**Que faire ?** – Depuis 1970 les constructeurs ont fait des efforts considérables afin de diminuer la pollution émise par les transports routiers. Ainsi, en Europe, plus d'une quinzaine de directives établissant des normes de plus en plus strictes sur la qualité des carburants, sur la mesure de la consommation et des émissions ont été instaurées. Un véhicule automobile fabriqué en 2001 produit trois fois moins de polluants qu'un véhicule de même catégorie, fabriqué en 1993 [18].

Ces améliorations passent avant tout par un net progrès du contrôle moteur (amélioration du rendement énergétique) et du « post-traitement » (exemple du pot catalytique). Les techniques sont diverses et variées, et dépendent du type de moteur employé. On peut citer à titre d'exemple l'un des progrès fort de ces dernières années : le moteur diesel à injection directe appelé plus communément dans le jargon automobile « common rail ». Ce véhicule apparu au grand public en 1997 pour la commercialisation de l'Alfa Romeo 156 JTD, utilise un système d'injection entièrement piloté par ordinateur.

Celui-ci permet d'envoyer le carburant (gasoil) directement dans les cylindres sans passer par une préchambre à combustion (comme pour les moteurs à injection indirecte). Ce type de moteur permet de réduire la consommation (grâce à l'injection directe), la pollution (haute pression) et le bruit caractéristique des moteurs diesels des anciennes générations (injection électronique) [19].

Ces progrès considérables ont permis une réduction significative des polluants, mais qu'en est-il du dioxyde de carbone, principal gaz à « effet de serre » ? Certes les constructeurs ont amélioré sans aucun doute leurs moteurs, mais en contre partie sécurité et confort (airbags, vitres électriques, climatisation...) augmentent d'années en années. La puissance demandée au groupe motopropulseur est donc de plus en plus importante. De ce fait, comme le rendement du moteur thermique s'améliore mais qu'on lui en demande de plus en plus, la consommation de carburant d'un véhicule et donc le rejet d'émission de CO<sub>2</sub> ne peut diminuer que faiblement.

Afin de pouvoir diminuer significativement la consommation (et par la même occasion le CO<sub>2</sub>) des véhicules classiques, plusieurs possibilités peuvent être envisageables

- utilisation de nouveaux carburants : carburants alternatifs comme le GPL (Gaz de Pétrole Liquéfiés), le GNV (Gaz Naturel de Ville), les biocarburants (exemple de l'éthanol)

amélioration de l'aérodynamisme, la réduction du poids par l'utilisation d'alliages légers (aluminium à la place de l'acier), le remplacement des systèmes de transmission classique

## Présentation des véhicules électriques hybrides

- par des systèmes optimisés comme la CVT (Continuous Variable Transmission), ou encore par l'amélioration des huiles moteurs permettant d'avoir moins de frottements
- progression des moteurs thermiques existant en passant par la technologie par injection directe ou par le downsizing.

### 1.3 Classification par hybridation du véhicule:

On distingue plusieurs degrés d'hybridation en fonction de l'importance du système électrique dans la locomotion du véhicule.

Du plus faible au plus important degré d'hybridation, on parle de :

- micro hybride *Start & Stop*
- semi hybride
- *full* hybride
- hybride rechargeable

#### 1.3.1 Les voitures micro hybrides

c'est le niveau le plus bas d'hybridation caractérisée par le stop and start qu'on peut trouver dans les Citroën C2 et C3. ce concept technologique remplace les fonctions du démarreur et de l'alternateur d'une voiture classique et il consiste en la mise à l'arrêt du moteur essence lorsque le véhicule s'immobilise par exemple à un feu rouge ou dans les embouteillages. Cela permet une diminution de la consommation de carburant en conduite urbaine.

#### 1.3.2 Les semi hybrides

Les engins semi hybrides sont des variantes basées sur le système *Start & Stop*, qui utilisent aussi l'électricité pour alimenter d'autres systèmes. Éclairage et appareils de bords, entre autres, profitent ainsi de l'électricité stockée dans la batterie du véhicule, elle-même rechargée par le moteur thermique et les phases de freinage.

Là où le semi hybride se distingue du simple *Start & Stop*, c'est dans l'assistance de la motorisation thermique par un moteur électrique. Celui-ci apporte un surplus de puissance lors des phases de démarrage, d'accélération et de reprise.

### 1.3.3 Le *full* hybride

Les *full* hybrides sont les voitures hybrides les plus connues, avec la Toyota Prius comme symbole. Ces véhicules sont dotés de deux moteurs combinés, thermique et électrique. L'électricité est produite par le moteur thermique, mais aussi par le freinage régénératif : lorsque le véhicule freine, les roues entraînent le moteur électrique qui fonctionne comme un générateur. L'énergie produite est stockée dans une batterie.

### 1.3.4 Hybride rechargeable

Enfin, les hybrides rechargeables sont une variante du modèle *full* hybride. Leur spécificité est de permettre le rechargement de la batterie du véhicule à l'arrêt à l'aide d'une prise de courant. Ce type de véhicule est donc capable de fonctionner en mode *tout électrique* indépendamment du moteur thermique, tout au moins sur de petites distances.

## 1.4 le taux d'hybridation (TH)

On appelle taux d'hybridation la part de la puissance que peut fournir la seconde source d'énergie par rapport à la puissance totale disponible à bord. Pour un véhicule hybride thermique/électrique, le taux d'hybridation (1.1) est égal au rapport de la puissance électrique sur la puissance totale exprimé en pourcentage [20]:

$$TH = \frac{\text{puissance électrique}}{\text{puissance électrique} + \text{puissance thermique}} \times 100 \quad (1.1)$$

en allant d'un véhicule thermique (TH=0%), jusqu'au véhicule électrique (TH=100%) plusieurs nominations peuvent exister : Micro ou mini-hybride, mild-hybrid, full-hybrid, etc. notons que ces dénominations sont très variables selon les auteurs et/ou les constructeurs automobiles.

Tableau 1-1. Classification des VEHS par rapport à son niveau d'hybridation

<b>Type d'hybride</b>	<b>Fonction</b>	<b>Gain en carburant (cycle urbain)</b>	<b>Exemple de véhicule</b>
<b>Micro hybrid (Stop/Start hybrid)</b>	<p>Arrêt du Moteur thermique (Mth) : chaque fois que le véhicule est à l'arrêt, le Mth est stoppé afin de moins consommer;</p> <p>Redémarrage du Mth : la Machine Électrique (ME) (alternateur-démarrreur) intégré redémarre le Mth quand le conducteur active la pédale d'accélérateur ;</p> <p>Accélération : l'alternateur-démarrreur peut aider le Mth au démarrage et pendant de courtes accélérations ;</p> <p>Mode normal : le Mth fonctionne seul ;</p> <p>Un couple supplémentaire de la ME peut être fourni pour pallier les acyclismes du Mth.</p>	5 à 8 %	<p>Citroën C3</p> <p>Toyota Crown</p> <p>GM Saturn</p>
<b>Mild hybrid</b>	<p>La principale différence entre le Micro et le Mild hybrid est que l'alternateur-démarrreur intégré est remplacé par une ME séparée ;</p> <p>La ME propulse rarement le véhicule seul, elle assiste plutôt le Mth ;</p> <p>Comparé au Micro hybrid, la ME, l'alternateur et les batteries sont plus puissants et donc jouent un rôle plus important dans le fonctionnement du véhicule.</p>	20 à 30 %	<p>Honda Insight</p> <p>Honda Civic</p> <p>Honda Accord</p>
<b>Full hybrid</b>	<p>Sa configuration est quasiment la même que le Mild hybrid sauf que les composants sont encore plus puissants ;</p> <p>La ME peut propulser souvent le véhicule seul, particulièrement pour une conduite en ville ;</p> <p>Le Mth peut être plus petit car la ME est de plus grande puissance et peut donc fournir un plus grand couple dans une gamme de régime donnée.</p> <p>Le système de commande est plus complexe afin d'optimiser la gestion de puissance.</p>	30 à 40 %	<p>Toyota Prius</p> <p>Ford Escape</p>
<b>Plug-in hybrid</b>	<p>Son architecture est semblable au Full hybrid avec cependant une sortie de connexion au niveau de la batterie afin de recharger celle-ci par une source extérieure (réseau) ;</p> <p>La ME, l'alternateur et les batteries sont considérablement de plus grandes puissances</p> <p>Le système de commande doit empêcher de recharger la batterie tant que celle-ci n'a pas atteint un niveau minimal. Si celui-ci est atteint alors on passe en fonctionnement Full hybrid.</p>	Aucun carburant consommé en mode tout électrique. Quand le Mth est alimenté : comparable au Full hybrid	<p>Gruau</p> <p>Microbus</p> <p>Dassault-Heuliez</p> <p>Cleanova</p> <p>Daimler-Chrysler</p> <p>Sprinter</p>

Tableau 1-1. Classification des VEHs par rapport à son niveau d'hybridation

# Présentation des véhicules électriques hybrides

## 1.5 Classification par architecture des véhicules hybrides

Dans le cadre de ce travail, nous nous intéressons aux véhicules hybrides dits thermiques électriques (VHE), cette dénomination vient du fait que le groupe motopropulseur de ce type d'hybride comporte, en plus du MCI conventionnel (transformateur irréversible), une ou plusieurs machines électriques (transformateur réversible) et un système de stockage d'énergie (batteries).

Ces véhicules hybrides peuvent être classés selon plusieurs critères : leurs architectures, leur taux d'hybridation, le carburant utilisé pour alimenter la source d'énergie primaire (irréversible), recharge interne ou externe (plug-in) de l'élément de stockage d'énergie, etc. Nous aborderons ici la classification selon les critères les plus utilisés.

### 1.5.1 L'hybride série.

Dans l'architecture série, seul le moteur électrique est connecté directement aux roues et leur transmet un couple. Le moteur électrique est donc dimensionné pour pouvoir assurer seul la traction du véhicule, selon la demande de couple du conducteur.

La Figure 1.1 schématise le fonctionnement d'un véhicule hybride série. Le moteur électrique est alimenté soit par des batteries, soit par une génératrice entraînée par le moteur thermique, soit par un mélange des deux. Cette configuration permet à la batterie d'être rechargée soit :

- par le moteur thermique, via la génératrice. Dans ce cas, le moteur thermique est contrôlé de manière à fonctionner à son rendement optimum.
- par le moteur électrique, qui sera alors utilisé en mode générateur, lors d'un freinage récupératif. L'intérêt de cette architecture réside dans la capacité à pouvoir faire fonctionner le moteur thermique au point de fonctionnement souhaité, quelles que soient les conditions extérieures telles que la vitesse du véhicule ou la demande de couple, puisque le moteur thermique est complètement déconnecté du train moteur. En revanche, l'énergie mécanique produite par le moteur thermique est ensuite transformée en énergie électrique via la génératrice, puis à nouveau transformée en énergie mécanique par le moteur électrique. Ainsi, la cascade de rendement du train moteur est assez défavorable à la réduction de l'énergie consommée, c'est pour cette raison que les véhicules hybrides série dépassent rarement le stade du prototype.



## Présentation des véhicules électriques hybrides

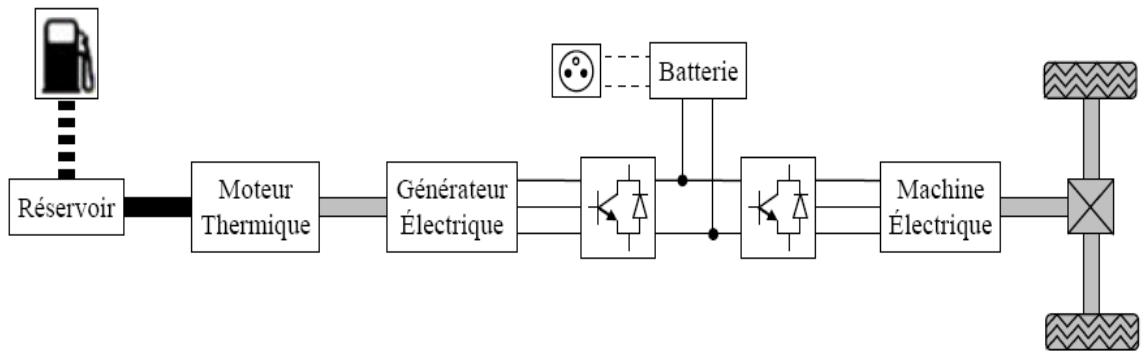


Figure 1.1 - Principe de l'architecture **série**.

### 1.5.2 L'hybride parallèle.

Dans la configuration parallèle, les moteurs thermique et électrique sont tout deux directement connectés à la transmission, donc aux roues. Les deux moteurs peuvent participer d'une façon *parallèle* au déplacement du véhicule, en transmettant chacun une puissance mécanique aux roues.

Sur la Figure 1.2 est représenté le schéma de principe de l'architecture parallèle, ainsi que les transferts d'énergie possibles entre les différents organes. La configuration générale de cette architecture est composée du moteur thermique, d'un moteur électrique, de la batterie, d'un inverseur (non représenté), et d'une transmission (boîte de vitesse et embrayage). Sur ce schéma n'ont pas été représentés le démarreur et l'alternateur, ceux-ci étant des éléments présents sur la quasi-totalité des véhicules en circulation.

L'emplacement du moteur électrique peut être différent : celui-ci peut être situé au niveau des roues avant, ou bien en liaison avec le train arrière, pour obtenir alors un véhicule à quatre roues motrices.

Une architecture hybride parallèle est complexe à contrôler, et demande un travail supplémentaire pour l'intégration physique des sources de puissance. En effet, sur l'architecture hybride parallèle, les deux sources de couple (moteur thermique et moteur électrique) sont directement reliées au train moteur, la consigne de couple devant donc être répartie à chaque instant entre les deux sources de couple. Néanmoins, des gains non négligeables peuvent être obtenus, même en utilisant des composants électriques de faible puissance et de faible capacité. Aussi, ces gains

permettent de compenser le surcoût de cette architecture et le surpoids lié aux batteries et au moteur électrique.

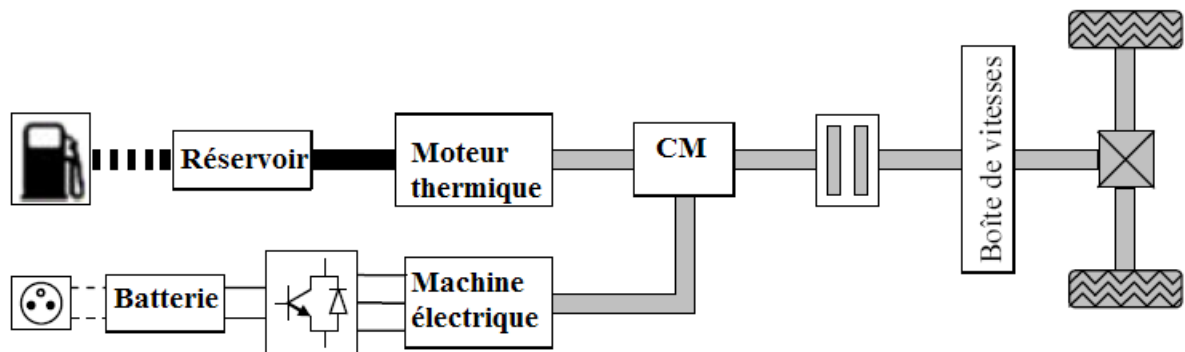


Figure 1.2 – Principe de l'architecture **parallèle**.

### 1.5.3 La combinaison des deux

La catégorie des architectures combinées correspond aux hybrides série/parallèle, dont la Toyota Prius fait partie. Appelée aussi *hybride parallèle à dérivation de puissance*, cette architecture intègre un moteur électrique, une génératrice, et un moteur thermique. Grâce à une gestion efficace des puissances demandées d'un côté, et fournies de l'autre, il est possible de contrôler en régime le moteur thermique, et de partager son couple entre les demandes du véhicule, et la recharge de la batterie. La Figure 1.3 schématise le fonctionnement d'un hybride combiné.

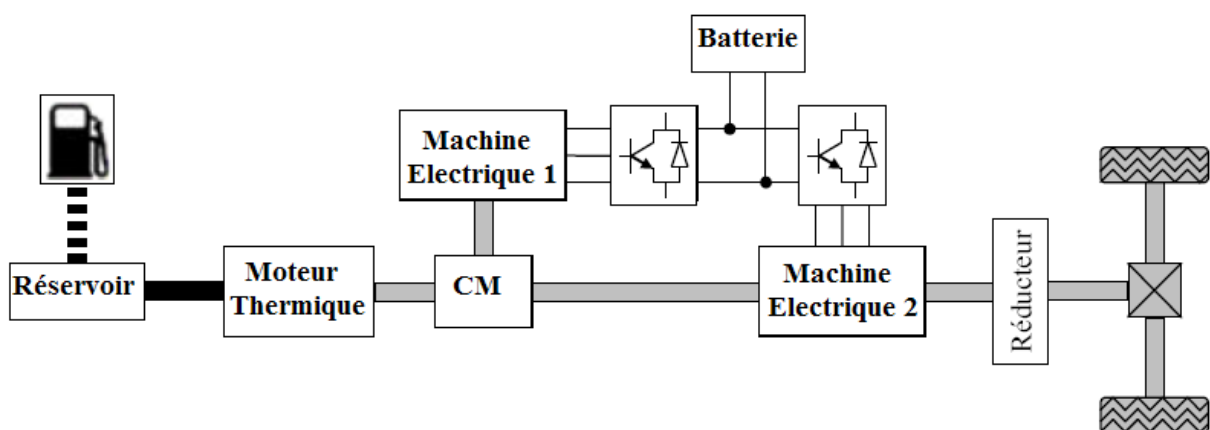


Figure 1.3 - Principe de l'architecture **hybride combinée**, type Prius.

## Présentation des véhicules électriques hybrides

**Synthèse des divers architectures :** Le Tableau 1-2 présente les avantages et inconvénients des divers VEHS selon l'architecture employée.

Tableau 1-2. Synthèse des diverses architectures

<b>Type d'hybride</b>	<b>Avantages</b>	<b>Inconvénients</b>
<b>Série</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Bon rendement énergétique aux faibles vitesses (mode tout électrique en zone urbaine) ;</li> <li>-Très bon contrôle du moteur thermique ;</li> <li>-Choix du moteur thermique : faible, forte puissance ou « downsized » ;</li> <li>-Bonnes performances dynamiques de la machine électrique de traction (confort d'utilisation) ;</li> <li>-Le groupe électrogène n'est pas nécessairement placé à côté de la machine électrique de traction : degré de liberté supplémentaire pour placer les divers composants (exemple du bus à plancher bas) ;</li> <li>-Gestion relativement facile (par rapport aux autres architectures).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Faible rendement énergétique de la chaîne cinématique globale (zone extra-urbaine) ;</li> <li>-Utilisation de 3 machines dont une (la machine électrique de traction) est au moins de forte puissance (encombrement maximal) ;</li> <li>-Mode tout thermique impossible.</li> </ul>
<b>Parallèle</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Bon rendement énergétique ;</li> <li>-Utilisation d'une seule machine électrique ;</li> <li>-Mode tout thermique et tout électrique (dans certains cas) possible ;</li> <li>-Transmission peu modifiée (dans certains cas) par rapport au véhicule conventionnel ;</li> <li>-Fourniture d'un couple supplémentaire de la machine électrique pour pallier les acyclismes du moteur thermique</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Fonctionnement du moteur thermique plus accru : dynamiques mauvaises ;</li> <li>-Pas de mode tout électrique dans certains cas comme l'alternodémarreur;</li> <li>Couplage mécanique complexe ;</li> <li>-Gestion délicate.</li> </ul>
<b>Mixte</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Bon rendement énergétique ;</li> <li>-Très bonne répartition de l'énergie ;</li> <li>-Souplesse du véhicule : tous les modes sont autorisés (thermique, électrique, série, parallèle ou série-parallèle) ;</li> <li>-Pas de rupture de couple à la roue.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Utilisation de 3 machines ou 2 machines avec 2 embrayages ;</li> <li>-Couplage très complexe ;</li> <li>Gestion très délicate.</li> </ul>

# Présentation des véhicules électriques hybrides

## 1.6 Principaux modes de fonctionnement d'un VHE

Nous distinguons trois principaux modes de fonctionnement pour les véhicules hybrides disposant au moins de deux sources d'énergie pour assurer leur propulsion. Ces principaux modes peuvent être résumés par le mode thermique pur, le mode électrique pur et le mode hybride.

– le mode thermique pur correspond à une propulsion assurée par le moteur thermique et durant lequel le moteur électrique n'est pas utilisé. Ce mode peut être utilisé par exemple pour des raisons de rendement lors des longs trajets ou bien lorsque que la batterie est déchargée. Les performances en termes de consommation d'énergie et de la pollution de l'environnement sont similaires à celles d'un véhicule conventionnel.

– le mode électrique pur correspond à une propulsion assurée par le moteur électrique et durant lequel le moteur thermique est arrêté. Ce mode est bien adapté aux conditions urbaines dans la mesure où le véhicule ne consomme pas d'énergie en freinage ou à l'arrêt. Dans ce cas, les performances du véhicule sont similaires à celles d'un véhicule électrique propre sans émission atmosphérique et sans bruit.

Ce mode pourra être activé durant quelques minutes tout au plus, le moteur thermique devant alors être réactivé pour ramener la batterie à un état de charge correct.

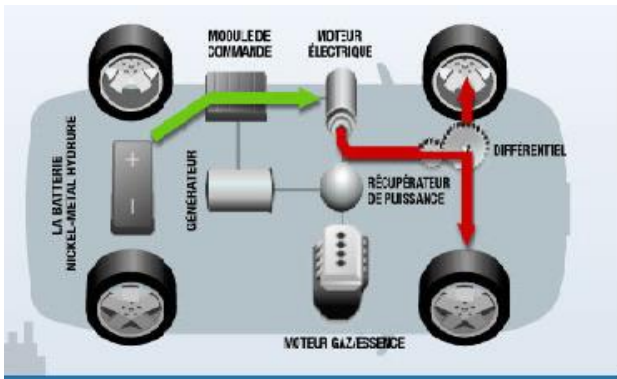
– le mode hybride, sur lequel nous mènerons notre étude par la suite, correspond à une propulsion assurée par les deux moteurs thermique et électrique. En traction, l'énergie nécessaire à la propulsion du véhicule peut être générée soit par les deux moteurs, soit par le moteur thermique seul. Le moteur électrique est utilisé pour recharger les batteries en roulant. En freinage, le moteur électrique convertit une partie de l'énergie cinétique du véhicule en énergie électrique stockée dans la batterie.

## **Présentation des véhicules électriques hybrides**

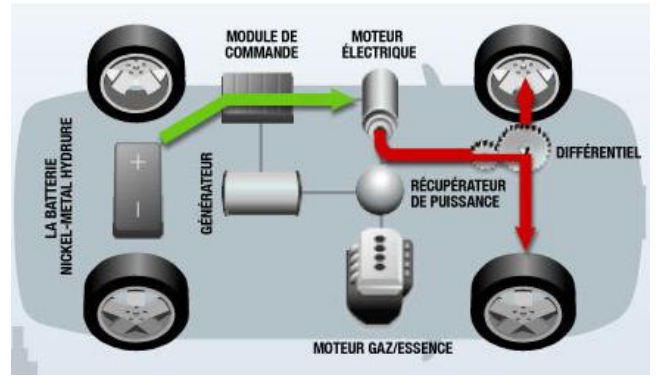
Une fois l'architecture sélectionnée, le choix des technologies et le dimensionnement des composants sont essentiels car ils déterminent non seulement les performances dynamiques du véhicule (accélération maximale, vitesse maximale, etc.) mais aussi la consommation moyenne du véhicule et ses émissions de polluants. Généralement, ces choix sont des compromis entre performances dynamiques, consommation et émissions, et bien sur, coût de fabrication.

Cependant, tous ces choix ne peuvent être effectués uniquement au regard de critères purement techniques. Les attentes des consommateurs, les différentes utilisations possibles du véhicule hybride sont également des facteurs à prendre en compte dans la problématique générale des véhicules hybrides.

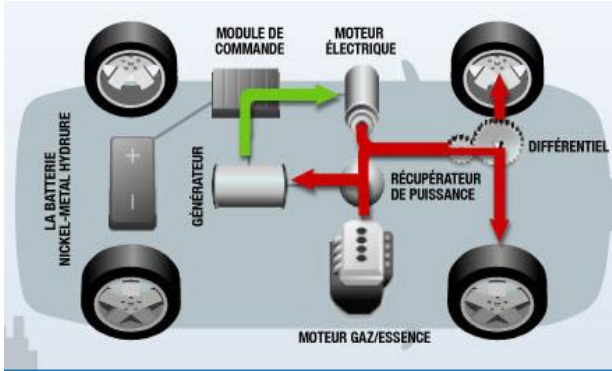
## Présentation des véhicules électriques hybrides



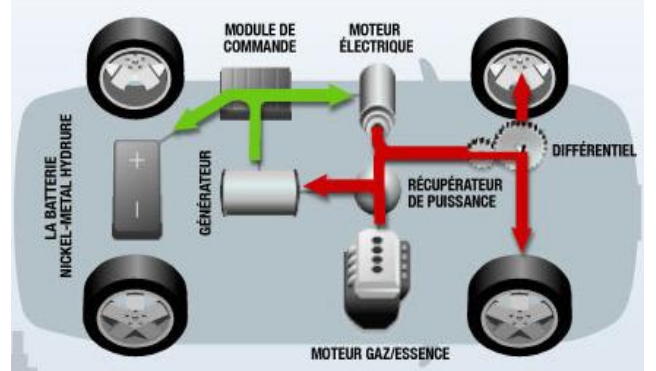
Démarrage



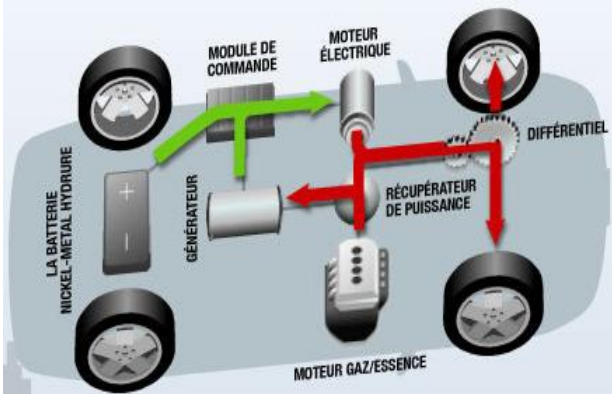
vitesse basse et moyenne



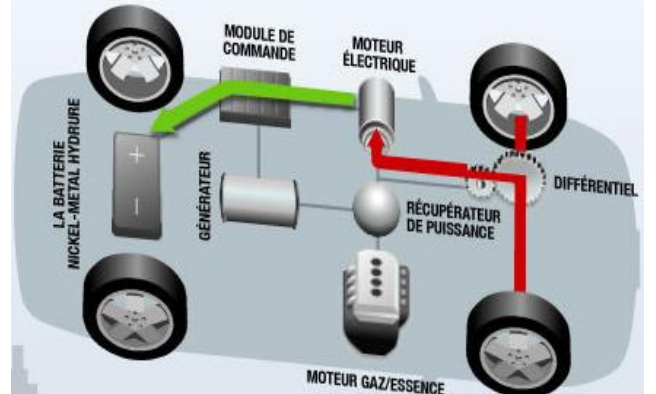
Vitesse croisière



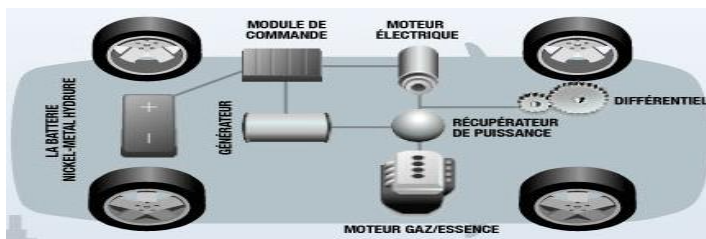
vitesse croisière/récupération



forte accélération



Décélération/récupération d'énergie



A l'arrêt

Figure 1.4 : Principaux modes de fonctionnement d'un véhicule hybride combinée

## Présentation des véhicules électriques hybrides

### 1.7 Perspective de l'automobile hybride

Le véhicule électrique hybride a considérablement évolué lors de ces dernières années. Mais afin de faire baisser les coûts de production, il reste encore de nombreux progrès et défis à réaliser (batteries par exemple). Beaucoup de prototypes ont été créés mais aucune architecture ne s'est réellement démarquée. En outre, le développement et les ventes des VEHs sont très différents selon les pays, différences qui sont notamment dû aux particularités de chaque marché (prix des carburants à la pompe par exemple).

Au Japon, pays précurseur des VEHs, l'absence de véhicules diesels et la présence importante de véhicules légers en zone urbaine favorise l'implantation de l'hybride. Cela est d'autant plus important que les japonais sont friands de nouvelles technologies. C'est pourquoi les trois plus gros constructeurs japonais, Toyota avec la Prius, Nissan avec la Tino et Honda avec la Insight et la Civic IMA ont mis au point des VEHs très rapidement sur le marché de l'automobile.

Aux Etats-Unis, la tendance du marché est fortement dominée par les gros véhicules (pick-up, camionnette, tout-terrain 4X4...). Ces véhicules gros consommateurs de carburant vont à l'encontre des normes (de plus en plus strictes) imposées par le gouvernement américain. L'hybride peut donc réussir à trouver un compromis entre performance et consommation. Il est généralement mis en concurrence avec le diesel mais l'essence a une meilleure image dans ce pays. Les ventes aux États-Unis vont de l'alternatif (pick-up GMC Sierra de General Motors par exemple) à de fortes hybridations comme Ford avec son Escape, un 4X4 sportif, réalisé en partenariat avec Toyota [21].

L'Europe quant à elle, dispose d'un parc d'automobiles fortement équipé de moteur diesel. Depuis de nombreuses années, constructeurs et équipementiers ont consacré une part importante dans la R&D sur ce type de moteurs. Il en résulte des véhicules ayant de bonnes dynamiques pour une consommation et émission de polluants tout à fait dans les normes. Pour que le VEH se vende en Europe, il faudra qu'il soit aussi performant voir plus qu'un véhicule diesel, et avec une consommation moindre. Les constructeurs européens ont par conséquent une démarche plus progressive. Dans un premier temps, l'hybridation passera par des véhicules faiblement hybridés (exemple de la Citroën C3 Stop & Start à technologie essence) avant de passer à de plus forts taux d'hybridations vers 2010 (exemple de la Peugeot 307 et Citroën C4 Hybride Hdi à

## **Présentation des véhicules électriques hybrides**

technologie diesel). Ceci permet d'une part d'utiliser un véhicule déjà existant et de le modifier sans changement radical du bloc moteur, et, d'autre part de tester le client à l'achat.

En conclusion, nous pouvons donc dire que le véhicule hybride a une place importante pour l'amélioration

du réchauffement climatique. La baisse de la consommation de carburant des véhicules permettrait en outre d'être moins en moins dépendant vis-à-vis du pétrole. Mais ceci ne pourra se faire que si gouvernements et constructeurs interagissent ensemble . Que ce soit en passant par des aides financières, par de la médiatisation ou autres, les états devront tout faire pour inciter les consommateurs à réduire leur déplacement personnel et à acheter ces nouveaux véhicules. Les constructeurs devront pour leurs parts redoubler d'efforts pour créer des technologies toujours plus innovantes et attrayantes.



**CHAPITRE 2-**  
**MODELISATION DES**  
**ORGANES DU VEHICULE**  
**ELECTRIQUE HYBRIDE**

# Modélisation des organes du véhicule électrique hybride

## 2.1 Vue globale du groupe motopropulseur

Avant de passer à la modélisation individuelle de chaque composant de la chaîne une vue globale de l'ensemble s'avère nécessaire.

Ainsi, dans la figure 2.1, nous pouvons observer les liaisons entre les différents blocs fonctionnels du groupe motopropulseur.

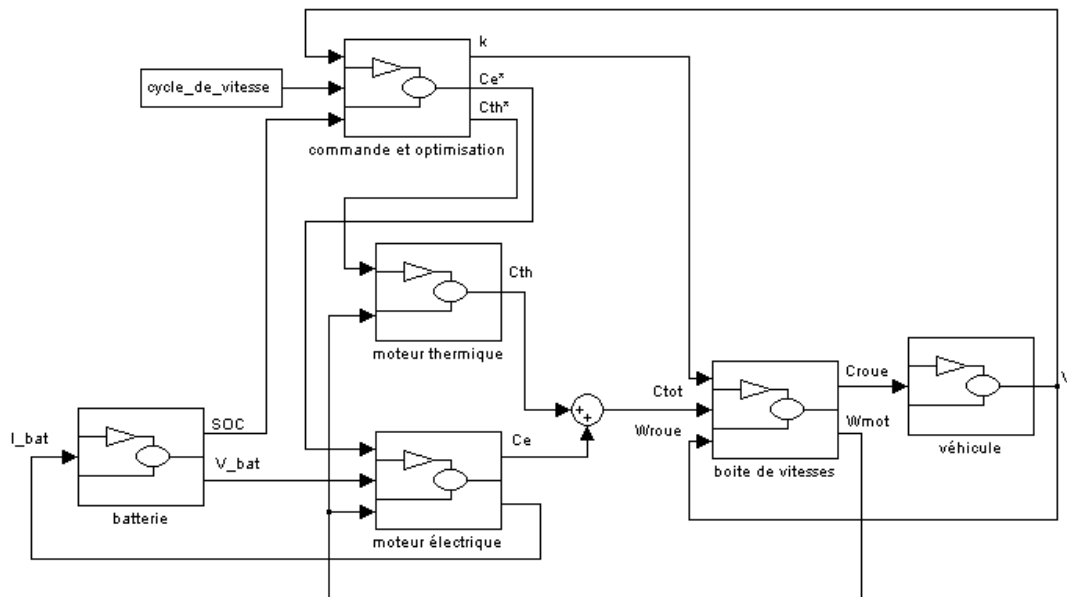


Figure 2.1 vue globale du groupe motopropulseur

L'entrée principale du système est le cycle de vitesse souhaité et la sortie finale n'est autre que la vitesse réelle.

La stratégie de commande (bloc commande et optimisation) possède un rôle double :

- régulation de la vitesse
- optimisation de la consommation du moteur thermique.

Elle élabore les consignes des couples : électrique ( $C_e^*$ ), thermique ( $C_{th}^*$ ) et le rapport de la boîte de vitesse ( $k$ ), de façon à optimiser le rendement du moteur thermique en tenant compte de l'état de charge de la batterie (soc).

## Modélisation des organes du véhicule électrique hybride

Les deux moteurs tournent à la même vitesse ( $\omega_{mot}$ ) et leurs couples ( $C_e$  et  $C_{th}$ ) sont additionnés, ce qui correspond à « l'architecture simple arbre à addition de couple » choisi.

La batterie alimente le moteur électrique et une estimation de l'état de charge est envoyée au bloc d'optimisation.

La boîte de vitesses sous entend le rapport de transformation entre l'arbre primaire et l'arbre secondaire, et finalement le modèle du véhicule auquel est appliqué le couple total.

## 2.2 Description des modèles

### 2.2.1 Le modèle dynamique du véhicule

Le modèle dynamique choisi est un modèle simplifié qui ne tient pas compte des forces de roulis et de tangage. Le véhicule est modélisé comme une masse en mouvement soumise à la force motrice  $F$  développée par le groupe motopropulseur et à différents efforts liés à l'environnement  $FR$ , tels que

$$FR = F_{roul} + F_{aéro} + F_{grav} \quad (2.1)$$

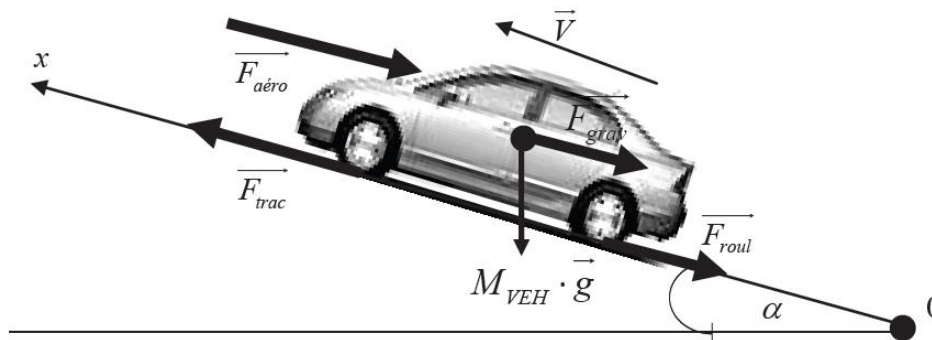


Figure 2.2 Les forces agissant sur un véhicule

Selon la deuxième loi de Newton, l'accélération du véhicule peut être écrite comme :

$$\frac{dV}{dt} = \frac{\sum F_t - \sum F_r}{\delta M} \quad (2.2)$$

Ou  $V$  est la vitesse du véhicule,  $\sum F_t$  est l'effort de traction totale du véhicule,  $\sum F_r$  est la résistance totale,  $M$  est la masse totale du véhicule, et  $\delta$  est le facteur de masse qui aide à convertir les inerties rotationnelles des éléments de rotation en translation.

## Modélisation des organes du véhicule électrique hybride

### 2.2.2 Les résistances du véhicule

#### *Résistance au roulement*

La résistance au roulement des pneus sur les surfaces dures est principalement causée par l'hystérésis dans les matériaux des pneus. La pression dans la zone de contact entre les pneumatiques et le sol est répartie symétriquement par rapport à la ligne centrale et la force résultante de réaction est montré dans la figure 2.3,  $P_z$ , est aligné à  $P$ . La déformation,  $z$ , par rapport à la charge,  $P$ , dans le processus chargement et de déchargement est montré dans la figure 2.4.

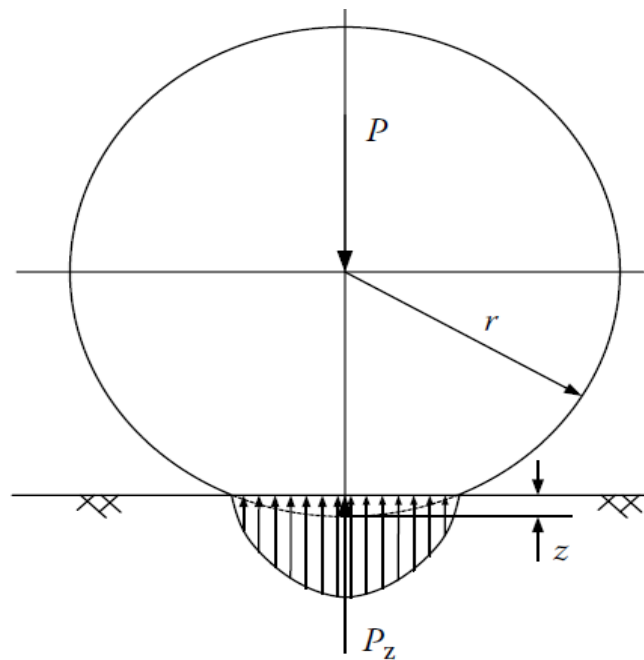


Figure 2.3 : La distribution de la pression dans la zone de contact

Lorsque le pneu roule, comme le montre la figure 2.5.a, la moitié principale de la zone de contact est en chargement et la moitié arrière est en déchargement. Par conséquent, l'hystérésis cause une distribution asymétrique des forces de réaction du sol.

## Modélisation des organes du véhicule électrique hybride

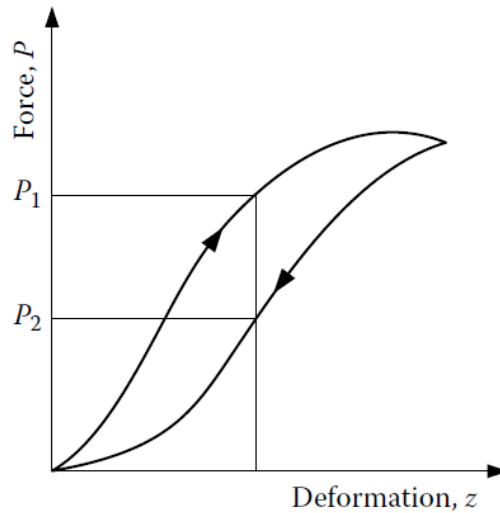


Figure 2.4: Les forces agissant sur le pneu / déformation en chargement et déchargement

La pression dans la moitié principale de la surface de contact est plus importante que dans la moitié arrière, comme le montre Figure 2.5.a en. Ce phénomène résulte de la force de réaction du sol se décalant en avant légèrement. Cette déplacé vers l'avant de la force de réaction du sol, avec la charge normale agissant sur le centre de la roue, crée un moment, qui s'oppose au roulement des roues.

Sur les surfaces douces la résistance au roulement est principalement causée par la déformation de la surface du sol comme le montre la Figure 2.5.b. La force de réaction du sol se décale presque complètement sur la moitié principale.

Le moment produit par le décalage vers l'avant de la force de réaction du sol qui en résulte est appelé moment résistant de roulement, comme le montre la figure 2.5.a, et peut être exprimé comme suite :

$$T_r = P_a \quad (2.3)$$

Pour garder le roulement des roues, une force,  $F$ , agissant sur le centre de la roue est nécessaire pour équilibrer ce moment roulant résistant. Cette force est exprimée :

$$F = \frac{T_r}{r_r} = \frac{P_a}{r_d} = P f_r \quad (2.4)$$

## Modélisation des organes du véhicule électrique hybride

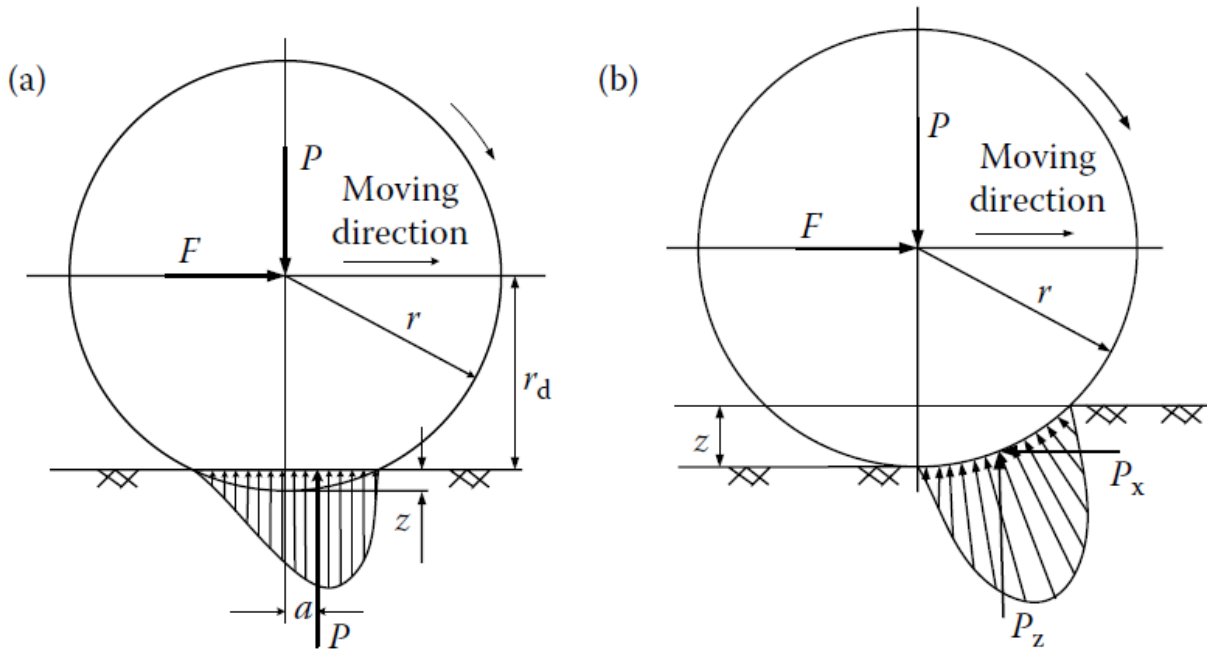


Figure 2.5: Déformation de la surface du sol comme

Où  $r_d$  est le rayon efficace du pneu et  $F_r = \frac{a}{r_d} P$  est appelé coefficient de résistance au roulement.

De cette façon, le moment de résistance au roulement peut être remplacé par une force horizontale agissant sur le centre de la roue dans la direction du mouvement inverse de la roue. Cette force équivalente est appelée la résistance au roulement d'une magnitude de :

$$F_r = P f_r \quad (2.5)$$

Où  $P$  est la charge normale agissant sur le centre de la roue qui tourne. Quand un véhicule roule sur une route en pente, la charge normale,  $P$ , devrait être remplacée par la composante qui est perpendiculaire à la surface de la route. C'est,

$$F_r = \alpha \cos P f_r \quad (2.6)$$

Où  $\alpha$  est l'angle de route,  $f_r$  le coefficient de résistance au roulement, varie en fonction du matériau des pneus, structure et température du pneumatique, la pression de gonflage du pneu, la géométrie de la route, les matériaux routiers, et la présence ou non de liquide sur la route. Les valeurs typiques des coefficients de résistance au roulement sur différentes routes sont indiquées dans le tableau 2.1. Ces dernières années pour les économies de carburant, des pneus à faible résistance pour les voitures particulières ont été développés. Leur coefficient de résistance au roulement est inférieur à 0,01.

Les valeurs indiquées dans le tableau 2.1 ne tiennent pas compte de leurs variations par rapport à la vitesse. Basé sur des résultats expérimentaux, on a proposé beaucoup de formules

## Modélisation des organes du véhicule électrique hybride

pour calculer la résistance de roulement sur une surface dure. Par exemple, le coefficient de résistance de roulement d'un véhicule touristique sur une route bétonnée peut être calculé à partir de l'équation suivante :

$$f_r = f_0 + f_s \left( \frac{V}{100} \right)^{2.5} \quad (2.7)$$

Tableau 2.1 : Coefficients de résistance au roulement

Conditions	Coefficient de résistance au roulement
<b>Pneus de voiture sur un béton ou une route goudronnée</b>	<b>0.013</b>
<b>Pneus de voiture sur une route roulée de gravier</b>	<b>0.02</b>
<b>Route en goudron</b>	<b>0.025</b>
<b>Route non pavée</b>	<b>0.05</b>
<b>Piste</b>	<b>0.1-0.35</b>

Où  $V$  est la vitesse en km/h, et  $f_0$  et  $f_s$  dépendent de la pression de l'inflation du pneu. Dans le calcul des performances du véhicule, il suffit de considérer le coefficient de résistance de roulement comme une fonction linéaire de la vitesse. Pour la plupart des valeurs de pression d'inflation, l'équation suivante peut être utilisée pour une voiture touristique :

$$f_r = 0.01 \left( \frac{V}{160} \right) \quad (2.8)$$

Cette équation prédit les valeurs de  $f_r$  avec une précision acceptable pour des vitesses allant à 128 km/h.

## Modélisation des organes du véhicule électrique hybride

### *Trainée aérodynamique*

Un véhicule voyageant à une vitesse donnée dans l'air rencontre une force résistante à son mouvement. Cette force est appelée la traînée aérodynamique. Elle résulte principalement de deux composantes : Trainée de la forme et friction de la forme

Trainée de la forme: Le mouvement vers l'avant du véhicule pousse l'air devant lui. Toutefois, l'air ne peut pas se déplacer instantanément de la route et sa pression est donc augmentée, entraînant une pression élevée de l'air. En outre, l'air derrière le véhicule ne peut pas instantanément remplir l'espace laissé par son mouvement vers l'avant. Cela crée une zone de basse pression atmosphérique. Le mouvement du véhicule, par conséquent, crée deux zones de pression qui s'opposent au mouvement en poussant (à haute pression à l'avant) et en le tirant vers l'arrière (à basse pression en arrière) comme le montre la figure 2.6, La force résultante sur le véhicule est la Trainée de la forme. Le nom « Trainée de la forme» vient du fait que cette résistance est complètement déterminé par la forme de la carrosserie du véhicule.

Friction de la forme : L'air proche de la tôle du véhicule se déplace presque à la vitesse de ce dernier tandis que l'air loin du véhicule ne l'ai pas. Entre-temps, les molécules de l'air se déplacent à une large gamme de vitesses. La différence de vitesse entre les deux molécules de l'air produit un frottement qui en résulte dans la deuxième composante de la traînée aérodynamique.

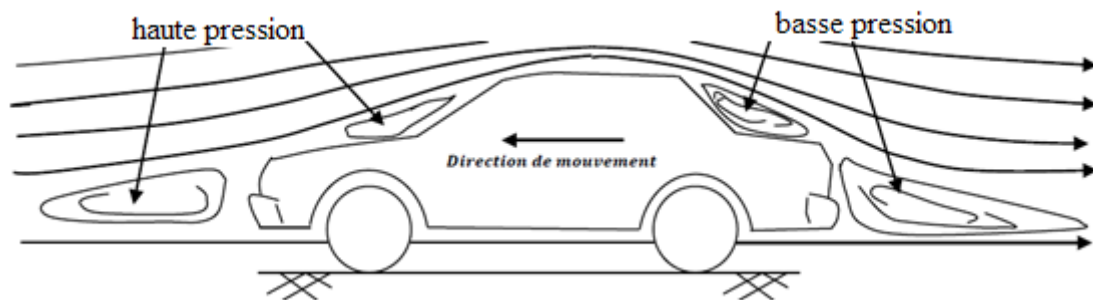


Figure 2.6 : Trainée de la forme

La traînée aérodynamique est fonction de la vitesse du véhicule  $V$ , la surface frontale du véhicule,  $A_f$ , la forme de la carrosserie du véhicule, et la densité de l'air  $\rho$  :

$$F_w = \frac{1}{2} \rho A_f C_D (V - V_w)^2 \quad (2.9)$$



## Modélisation des organes du véhicule électrique hybride

Où  $C_D$  est le coefficient de traînée aérodynamique qui caractérise la forme de la carrosserie du véhicule et  $V_w$  est la composante de la vitesse du vent sur la direction du mouvement du véhicule, qui porte un signe positif lorsque cette composante est dans la même direction du véhicule en mouvement et un signe négatif quand elle est opposée à la vitesse du véhicule. Les coefficients de traînée aérodynamique pour des formes typique de véhicules sont dans le tableau 2.2.

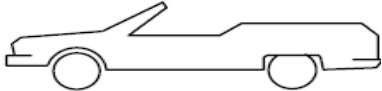
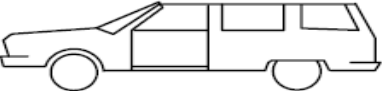





Type du Véhicule	Coefficient de la Résistance Aérodynamique
	<b>0.5 ... 0.7</b>
	<b>0.5 ... 0.7</b>
	<b>0.4 ... 0.55</b>
	<b>0.3 ... 0.4</b>
	<b>0.2 ... 0.25</b>
	<b>0.23</b>
	<b>0.15 ... 0.20</b>

Tableau 2.2 : Coefficients de traînée indicatif pour des différentes formes de véhicules.

La résultante des forces projetée sur l'axe  $ox$  s'écrit :

$F_{trac}(t)$ : force de traction du véhicule. C'est la force développée par le pneumatique sous l'action du groupe motopropulseur. C'est elle qui fait avancer le véhicule.

-Les quatre autres forces sont résistantes à l'avancement du véhicule :

## Modélisation des organes du véhicule électrique hybride

-  $F_{roul}(t)$  = force de roulement. il s'agit de la résistance au roulement du véhicule due au contact pneus/chaussée. Ce dernier peut varier en fonction de plusieurs paramètres : vitesse du véhicule, pression des pneus, état et type de la chaussée (sèche, humide, sable) considérons l'équation suivante :

$$F_{roul}(t) = M_{VEH} \cdot g \cdot (a + b \cdot V_{VEH}^2) \cdot \cos(\alpha(t)) \quad (2.10)$$

avec :  $a$  et  $b$  : des coefficients de résistance au roulement,

$g$  : l'accélération de la gravité en  $m/s^2$ ,

$M_{VEH}$  : la masse totale du véhicule donnée en  $kg$

$\alpha$  : la pente en  $rad$

$F_{grav}(t)$  : Force de gravité quand le véhicule circule sur une route non horizontale

$$F_{grav}(t) = M_{VEH} \cdot g \cdot \sin(\alpha(t)) \quad (2.11)$$

$F_{frein}(t)$  : force de frein mécanique. En général le freinage d'un véhicule hybride se fait en partie avec la machine électrique pour recharger le stockeur d'énergie. Quand ce dernier atteint sa limite de charge maximale ou que la machine électrique atteint son couple minimal par exemple, le frein mécanique prend le relais pour décélérer ou arrêter le véhicule.

-  $F_{aéro}(t)$  : force aérodynamique. C'est la force exercée par l'air selon l'axe du mouvement sur le véhicule. Elle est proportionnelle à la masse volumique de l'air  $\rho_{air}$  en  $3 \text{ kg m}^{-3}$  (elle dépend de la pression et de la température atmosphérique), à la surface frontale du véhicule  $S_f$  en  $m^2$  et au coefficient de traînée  $C_x$  du véhicule et au carré de la vitesse du véhicule  $V_{VEH}$  :

$$F_{aéro}(t) = \frac{1}{2} \cdot \rho_{air} \cdot S_f \cdot C_x \cdot V_{VEH}^2 \quad (2.12)$$

Notons.  $F_{res}(t)$  la somme de ces forces résistantes :

$$F_{res}(t) = F_{aéro}(t) + F_{frein}(t) + F_{grav}(t) + F_{roul}(t) \quad (2.13)$$

En appliquant le principe fondamental de la dynamique (figure 2.2).

$$F_{trac}(t) - F_{res}(t) = M_{VEH} \cdot \frac{dV_{VEH}}{dt}(t) \quad (2.14)$$

La vitesse du véhicule est alors donnée par :

$$V_{VEH}(t) = \frac{1}{M_{VEH}} \cdot \int_0^t (F_{trac}(t) - F_{aéro}(t) - F_{frein}(t) - F_{grav}(t) - F_{roul}(t)) \cdot dt \quad (2.15)$$

## Modélisation des organes du véhicule électrique hybride

La puissance délivrée par les différentes sources d'énergie doit donc, non seulement assurer la traction du véhicule (puissance absolue demandée par le conducteur), mais aussi faire face aux différentes forces de résistance agissant sur le véhicule (forces dues à l'environnement extérieur et forces d'inertie des éléments en rotation).

### 2.2.3 Modèle du pneumatique

Le modèle du pneumatique ne sert qu'à exprimer le lien entre la dynamique longitudinale du véhicule et la dynamique en rotation des éléments du groupe motopropulseur. En négligeant le glissement des roues, le régime de rotation des roues  $\omega_R(t)$  en  $rd / s$  est calculé à partir de la vitesse linéaire du véhicule :

$$\omega_R(t) = \frac{V_{VEH}(t)}{R_{pneu}} \quad (2.16)$$

La relation entre le couple au niveau des roues provenant du groupe motopropulseur  $C_R(t)$  en  $Nm$  et la force motrice et donnée par :

$$C_R(t) = F_{trac}(t) \cdot R_{pneu} \quad (2.17)$$

Finalement la dynamique du véhicule exprimée à la roue est donnée par :

$$\frac{d\omega_R(t)}{dt} = \frac{1}{M_{VEH} \cdot R_{pneu}^2} (C_R(t) - C_{res}(t)) \quad (2.18)$$

avec  $C_{res}(t) = F_{res}(t) \cdot R_{pneu}$  le couple résistant.

Calcul du couple demandé aux roues

$$C_R(t) = M_{VEH} \cdot R_{pneu}^2 \cdot \frac{d\omega_R(t)}{dt} + C_{res}(t) \quad (2.19)$$

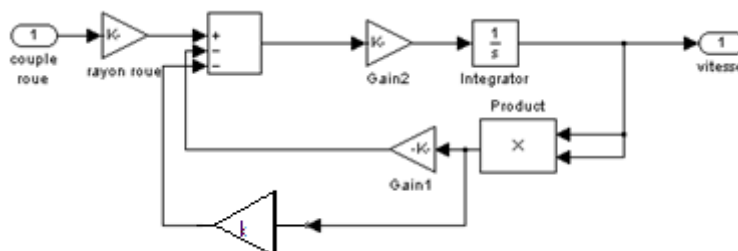


Figure 2.7 : modèle dynamique du véhicule

## Modélisation des organes du véhicule électrique hybride

### 2.2.3 Le moteur thermique

Il est considéré comme générateur de couple, son modèle est identifié à partir de cartographies issues de mesures expérimentales illustrant le comportement du moteur thermique en débit de carburant (figure 2.8) .

La commande du moteur thermique n'a pas été abordée dans ce travail, il est considéré tout simplement capable de fournir le couple exigé, tout en tenant compte de ces limitations.

Le modèle, présenté à la figure 2.9, se réduit donc à deux entrées : la consigne de couple et le régime de rotation de l'arbre, et à une sortie : le couple réel fourni qui n'est autre que le couple de consigne.

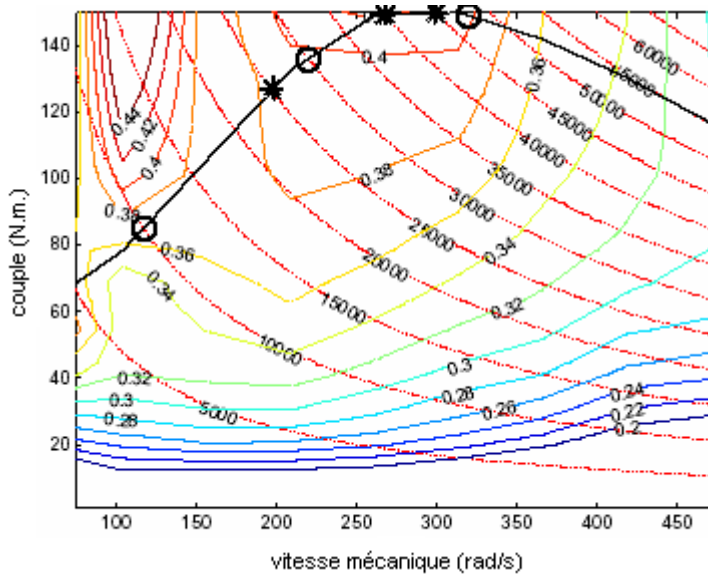


Figure 2.8 : courbes iso-rendements du moteur thermique

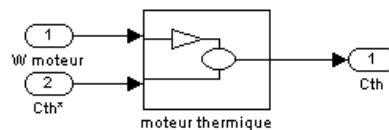


Figure 2.9 : le modèle du moteur thermique

### 2.2.4 La boîte vitesse

La boîte de vitesses est modélisée par le rapport de transformation 'k' entre les deux arbres primaire et secondaire. Elle est considérée sans pertes. Ainsi on a :

$$\begin{aligned} - C_{roue} &= k * C_{tot} \\ - \omega_{mot} &= k * \omega_{roue} \end{aligned} \quad (2.20)$$

D'où le modèle final représenté sur la figure 2.10.

## Modélisation des organes du véhicule électrique hybride

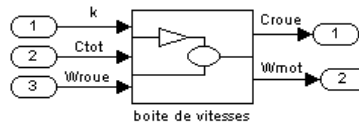


Figure 2.10: le modèle de la boîte de vitesses

### 2.2.5 La batterie

Les batteries sont accumulateurs électrochimiques que l'énergie chimique magasin qui peut être convertie en énergie électrique et comme il est une source bidirectionnelle, l'énergie électrique peut être convertie en énergie chimique. En raison de leur spécification énergétique et la puissance, la réversibilité et relativement peu coûteux (en ce qui concerne les autres technologies), les batteries sont une des sources les plus intéressantes à utiliser dans les véhicules électriques et hybrides électriques. Cependant, ils ont encore besoin de recherche en profondeur sur des questions comme la fabrication, de la sécurité ou de recyclage. Technologies de batteries sont généralement à base de métaux comme le plomb et, plus récemment, lithium ou nickel, cependant, au moment de l'EPPE HEV a été conçu et construit, au plomb-acide est la technologie la plus courante (et la plus intéressante en ce qui concerne le prix) dans les piles, puis conservés. Un des problèmes majeurs des véhicules hybrides est la source d'énergie. Dans cette partie, nous présentons de manière succincte une des voies technologiques possibles d'alimentations embarquées. Il s'agit des batteries utilisées dans tous les véhicules hybrides actuels, cette solution d'avenir est largement défendu par les spécialistes des véhicules hybrides.

Pour les véhicules hybrides, la technologie utilisée actuellement est celle des batteries respectant les conditions suivantes [22][23][24] :

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 ;

## Modélisation des organes du véhicule électrique hybride

Entretien faible et recyclage facile.

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

### ➤ *L'accumulateur au plomb*

Il est à la fois le plus ancien et le plus utilisé des accumulateurs électrochimiques. Sa tension par élément est de 2 V. Sa version pour la traction automobile, beaucoup plus récente tente de trouver le meilleur compromis possible entre l'énergie massique et la durée de vie (le nombre de cycles de recharge possible). Elles restent le système le moins cher produit industriellement avec une des meilleures durées de vie. Leur principal inconvénient est leur faible énergie massique. Cela s'est illustré avec la commercialisation de l'EV1 par General Motors qui a développé une voiture de forte puissance et de faible autonomie équipée de cette technologie.. Les batteries au plomb se caractérisent actuellement par [22][23][24][25]:

Une énergie massique de l'ordre de 40 Wh/kg pour les éléments ouverts et de 30 Wh/kg pour les éléments étanches. Lors d'une décharge en 5 h à courant constant et en utilisation réelle dans un véhicule, ces valeurs sont réduites de 20 %;

Un nombre de cycles de charge variant entre 600 et 900 sur un banc d'essai ; cette valeur est réduite de moitié sur un véhicule ;

Une mauvaise tenue aux décharges profondes ; les éléments les plus faibles subissent assez souvent, en fin de charge, une inversion électrochimique ;

Une réduction des performances à basse température.

Malgré cela, les batteries au plomb équipent la majeure partie des véhicules hybrides produits à ce jour et, elles sont bien placées pour équiper une part importante des véhicules hybrides dans les années à venir. Il y a plusieurs raisons à cela [22][23][24][25]:

Elles sont les moins chères, les plus fiables et ne posent aucun problème de sécurité ;

Les infrastructures de recyclage des produits usages sont déjà en place ;

Leur durée de vie s'améliore avec l'utilisation de systèmes intelligents de gestion d'énergie.

Enfin, ce qui paraît essentiel, les recherches en cours sont susceptibles d'aboutir à des progrès sensibles. On doit pouvoir doubler l'énergie massique des accumulateurs au plomb, en améliorant la collection des charges au sein des électrodes et le taux d'utilisation des

## Modélisation des organes du véhicule électrique hybride

matériaux actifs. Par ailleurs, une nouvelle technologie, dite bipolaire (les électrodes bipolaires comportent une face négative et une face positive, séparées par une paroi étanche conductrice électronique), spécialement adaptée aux véhicules automobiles, qui représentent une grande part de la masse de l'élément. Les gains ainsi obtenus affecteront, d'une façon importante, la puissance et l'énergie massiques, l'encombrement et le coût de fabrication.

### ➤ *L'accumulateur au nickel-cadmium*

Il est le plus performant des batteries électrochimiques et le plus largement commercialisé ; sa tension par élément est de 1,2 V. Elles ont été choisies par les constructeurs automobiles français (PSA et Renault) pour équiper leurs véhicules commercialisés depuis fin 1995. La version, dite frite plastifiée, récemment développée, pour la voiture électrique se caractérise par les performances suivantes [22][23][24][25]:

Une énergie massique de l'ordre de 50 Wh/kg, lors d'une décharge de 2 h, c'est-à-dire le double de celle des batteries au plomb ;

Un nombre de cycles de charge légèrement supérieure à 2000 ;

Une dégradation des performances très réduite à faible état de charge ;

Par ailleurs, les décharges profondes affectent peu ce type de batteries, les éléments ne subissent pas le phénomène d'inversion de polarité.

Malgré des performances incontestablement supérieures à celles des batteries au plomb, les accumulateurs au nickel-cadmium n'équipent que peu de voitures hybrides et ne risquent pas, dans un avenir proche, de supplanter les accumulateurs au plomb ; cela tient à plusieurs facteurs [22][23][24][25]:

Un coût élevé par kilowattheure (actuellement quatre fois supérieur à celui des batteries au plomb), que la fabrication en grande série peut réduire de 20 % environ ;

Une réduction plus importante est difficilement envisageable, vu la disponibilité limitée du cadmium;

Une mauvaise tenue à des températures supérieures à 40°-50°C, surtout en charge ;

La toxicité du cadmium;

Une conception du type ouvert, nécessitant une remise à niveau périodique de l'électrolyte.

## Modélisation des organes du véhicule électrique hybride

### ➤ *Les batteries nickel-hydrure de métal*

Ils ont longtemps figuré comme les remplaçantes idéales des deux systèmes précédents. Elles possèdent des performances massiques et volumiques très supérieures aux technologies à base de plomb ou de cadmium et ont profité du développement de l'électrode à base de nickel utilisée dans le système précédent (Ni/Cd) ou pour les batteries Ni-hydrogène développées pour les applications spatiales. Leurs seuls problèmes actuels semblent être leur durée de vie encore faible pour une batterie de traction (à forte profondeur de décharge) et leur mauvaise tenue à la température élevée (spécialement en fin de charge). Cette technologie de batterie semble cependant avoir été adoptée par la plupart des constructeurs automobiles comme batterie de puissance. Elle fonctionne alors à faible profondeur de décharge, ce qui augmente considérablement sa durée de vie (nombre de cycles charge/décharge). Ce type de batterie, dans sa version traction, équipe principalement les véhicules des constructeurs japonais commercialisés depuis 1998, plus des Honda et des Nissan. Enfin des batteries de puissance de cette technologie équipent la Toyota Prius, le seul véhicule hybride produit en masse à ce jour.

Le diagramme de la figure (Fig. 2.11) où l'énergie massique est représentée en fonction de la puissance massique, donne une bonne représentation des performances relatives des différents couples électrochimiques.

Le tableau (2.3) présente les différentes caractéristiques pour différents types de batteries utilisées dans les véhicules hybrides.

Il est important de souligner que dans le domaine des batteries, les évolutions sont toujours lentes du fait de la complexité des systèmes chimiques mis en œuvre.

Pour garantir le succès d'une technologie dans les applications automobiles, il est primordial qu'elle réponde aux trois critères qui reviennent sans cesse (coût, sécurité et performance)



## Modélisation des organes du véhicule électrique hybride

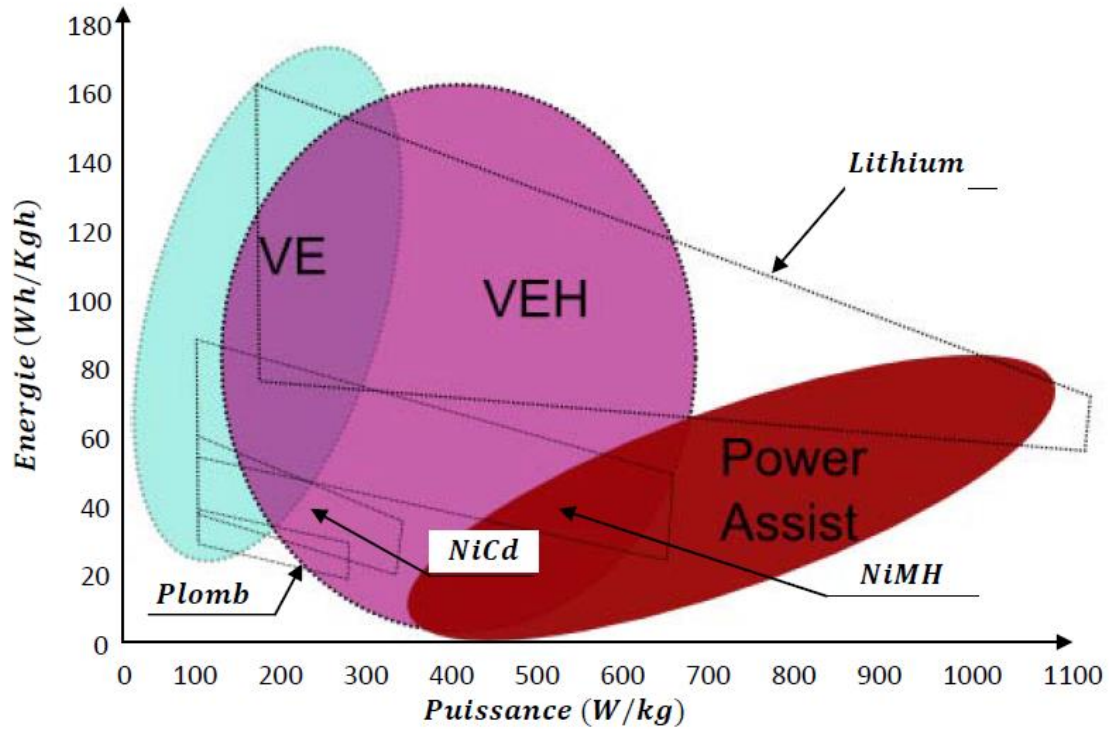


Figure 2.11 : L'énergie massique en fonction de puissance massique pour différents types d'accumulateurs.

Tableau 2.3 : Caractéristiques des différentes batteries pour une application VEH

Batterie	Energie wh/kg	Puissance w/jg	Rendement %	Cycle de vie	Cout USD/kwh
Plomb-acide	35-50	150-400	80	500-1000	100-150
Nickel-cadmium	30-50	100-150	75	1000-2000	250-350
Nickel-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-nickel-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

### ➤ Model de la Batterie :

Le model de la batterie représente les pertes qu'elle dissipe pendant ça charge et ça décharge .un model de batterie peut être très complexe car plusieurs facteurs entre en jeux et

## Modélisation des organes du véhicule électrique hybride

qui dépendent du état de charge de la batterie (*STATE OF CHARGE SOC* « SOC ») la température, le courant, l'âge (SOH State of Health) et l'effet mémoire ect ... un model simple mais utile serra proposé, c'est une FEM en série avec une résistance interne, comme montre la figure 2.12 :

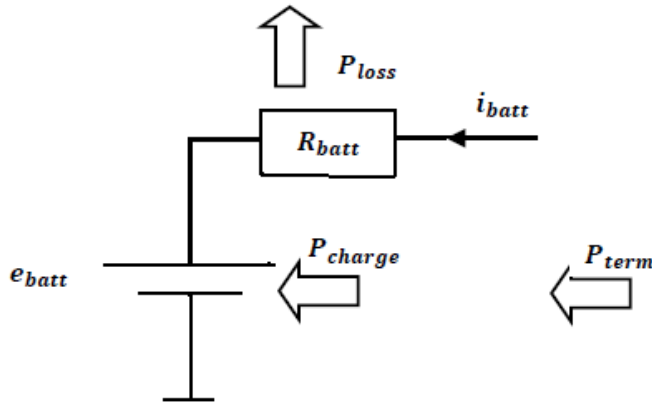


Figure 2.12 : Un model simple de batterie

$$P_{term} = (R_{batt}I_{batt} + e_{batt})I_{batt} = e_{batt}I_{batt} + R_{batt}I_{batt}^2$$

$$I_{batt} = -\frac{e_{batt}}{2R_{batt}} \pm \sqrt{\left(\frac{e_{batt}}{2R_{batt}}\right)^2 + \frac{P_{term}}{R_{batt}}}$$

$$P_{term} = R_{batt}I_{batt}^2, P_{charge} = P_{term} - P_{loss}, \eta_{bat} = \frac{P_{charge}}{P_{term}}$$

Un autre model dynamique générique paramétrable peut être envisagé pour représenter la plupart des types de batteries rechargeables utilisées.

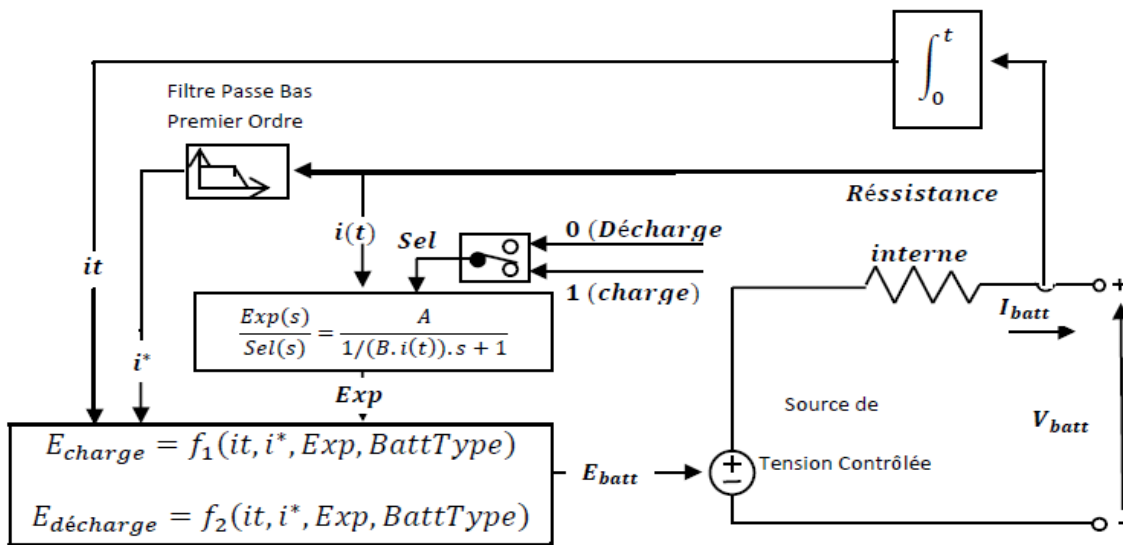


Figure 2.13 : Un model de batterie générique pour les simulations dynamique des VEH

## Modélisation des organes du véhicule électrique hybride

Type de batterie	L'état	L'expression mathématique
Ni-Metal - Hydrure	Chargement ( $i^* < 0$ )	$f_2(it, i^*, i, Exp) = E_0 - K \cdot \frac{Q}{ it  + 0.1 \cdot Q} \cdot i^* - K \cdot \frac{Q}{Q - it} \cdot it + L^{-1} \left( \frac{Exp(s)}{Exp(s)} \cdot \frac{1}{s} \right)$
	Déchargement ( $i^* > 0$ )	$f_1(it, i^*, i, Exp) = E_0 - K \cdot \frac{Q}{Q - it} \cdot i^* - K \cdot \frac{Q}{Q - it} \cdot it + L^{-1} \left( \frac{Exp(s)}{Sel(s)} \cdot 0 \right)$
Lead-Acid	Chargement ( $i^* < 0$ )	$f_2(it, i^*, i, Exp) = E_0 - K \cdot \frac{Q}{it + 0.1 \cdot Q} \cdot i^* - K \cdot \frac{Q}{Q - it} \cdot it + L^{-1} \left( \frac{Exp(s)}{Exp(s)} \cdot \frac{1}{s} \right)$
	Déchargement ( $i^* > 0$ )	$f_1(it, i^*, i, Exp) = E_0 - K \cdot \frac{Q}{Q - it} \cdot i^* - K \cdot \frac{Q}{Q - it} \cdot it + L^{-1} \left( \frac{Exp(s)}{Sel(s)} \cdot 0 \right)$
Lithium- Ion	Chargement ( $i^* < 0$ )	$f_2(it, i^*, i, Exp) = E_0 - K \cdot \frac{Q}{ it  + 0.1 \cdot Q} \cdot i^* - K \cdot \frac{Q}{Q - it} \cdot it + A \cdot \exp(-B \cdot it)$
	Déchargement ( $i^* > 0$ )	$f_1(it, i^*, i, Exp) = E_0 - K \cdot \frac{Q}{ it  + 0.1 \cdot Q} \cdot i^* - K \cdot \frac{Q}{Q - it} \cdot it + A \cdot \exp(-B \cdot it)$

Tableau 2.4 : représentant différentes expressions mathématique de batterie selon leurs types

Le tableau 2.4 résume les expressions mathématiques utilisées pour différents types de batterie comme fonction  $f_1$  et  $f_2$ , respectivement pour la décharge et la charge.

L'estimation de l'état de charge a été faite à partir du courant selon l'équation suivante :

$$\text{soc}(t) = - \frac{\int Idt}{C * 3600} + \text{soc}(t=0) \quad (2.21)$$

soc (t=0) étant l'état de charge initial et  $C = 6.5\text{Ah}$ . Nous pouvons donc en déduire le modèle final de la batterie illustré sur la figure 2.14 :

### ***commande de la batterie.***

La batterie n'est pas réellement commandée puisqu'elle doit fournir la différence entre la puissance demandée (puissance de traction et puissance des auxiliaires) et la puissance fournie par le générateur électrique. Par contre, son courant est limité en décharge et en recharge à la fois en continu (c'est-à-dire sur des durées de plusieurs dizaines de secondes) et en transitoire. La limitation dite « en continu » correspond aux contraintes qui seront intégrées dans les lois de gestion d'énergie pour répartir la demande entre les deux sources d'énergie.

## Modélisation des organes du véhicule électrique hybride

Sur de très courtes périodes correspondant aux transitoires, ces limitations peuvent être très largement dépassées (1,5 fois en décharge et 2,5 fois en recharge). A titre d'exemple, ce phénomène permet de démarrer le moteur thermique avec la batterie. En effet, le démarrage du moteur étant généralement demandé lors d'une forte demande de puissance, la batterie doit temporairement assurer seule à la fois la demande des moteurs électriques et des auxiliaires, et le démarrage du moteur thermique par l'intermédiaire du couple demandé par l'alternateur.

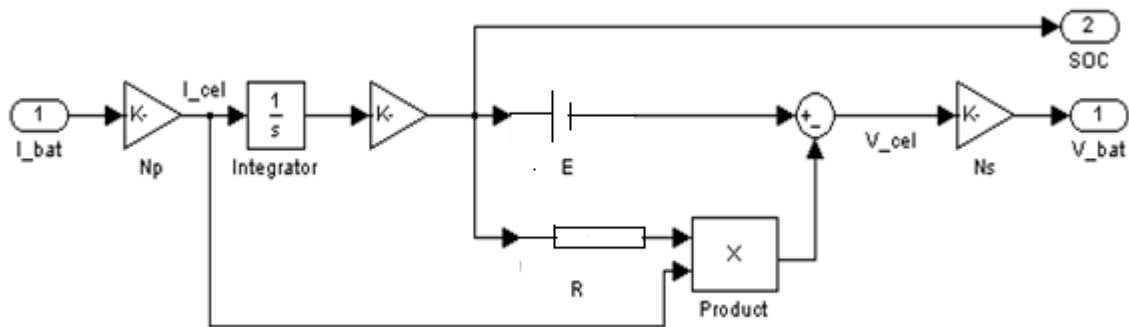


Figure 2.14 : le modèle détaillé de la batterie

### 2.2.6 La Motorisation électrique

Il existe trois grandes catégories de moteurs (à courant continu, asynchrone et synchrone). En ce qui concerne le choix d'une technologie de motorisation, la solution de référence a été pendant longtemps la motorisation à courant continu, soit dans sa version à excitation série, solution robuste qui présente de manière intrinsèque une caractéristique à la traction, soit plus récemment, dans sa version à excitation séparée commandée par hacheur. Mais l'évolution de l'électronique de puissance et des matériaux tel que les aimants permanents conduit aujourd'hui à s'orienter vers des solutions plus performantes telles que les motorisations synchrones ou asynchrone.

Le groupe motopropulseur moteur doit être capable de fournir le couple et la vitesse nécessaires pour toutes les conditions de conduite. Ainsi, la taille du moteur sera assez grand, le plus souvent évalué à 100 kW ou plus pour les voitures particulières [26].

## Modélisation des organes du véhicule électrique hybride

### 2.2.6.1 Moteurs asynchrones (MAS)

Le moteur asynchrone triphasé est largement utilisé dans l'industrie, sa simplicité de construction en fait un matériel très fiable et qui demande peu d'entretien. Il est constitué d'une partie rotative, le rotor qui est bobiné en cage d'écureuil. Les circuits magnétiques du rotor et du stator sont constitués d'un empilage de fines tôles magnétiques pour éviter la circulation de courant foucault.

Le moteur asynchrone comparé au moteur courant continu a l'avantage d'être alimenté directement par le réseau triphasé, son coût est moins élevé, il est beaucoup plus robuste car il ne nécessite pas pratiquement d'entretien.

Le moteur asynchrone à cage est robuste, assez bon marché et facilement industrialisable. Il a une puissance massique assez élevée, ce qui conduit à un bon rendement pour la chaîne de traction. Le MAS est le candidat le plus adapté pour propulser les véhicules hybrides électriques.

Cependant, la principale difficulté reste son pilotage. L'excitation étant induite par les courants statoriques, la commande séparée du couple et du flux est difficile à faire. Le pilotage de la machine asynchrone par commande vectorielle est géré par microprocesseur.

Toutefois, l'accroissement des performances des calculateurs et l'intégration poussée de cette commande ont donné lieu à une solution fiable à un coût raisonnable (thèse)

Le moteur asynchrone a été modélisé dans le référentiel naturel (a, b, c) et commandé par une technique de « contrôle vectoriel à flux rotorique orienté » classique dans le référentiel de Park (d, q). La commande (existante au labo) a été simplement modifiée de façon à l'adapter à notre application, c'est à dire :

- Le moteur est commandé seulement en couple selon l'expression suivante :

$$C_e = p \frac{M_{sr}}{L_r} \Phi_{rd} I_{sq} \quad (2.22)$$

- Il n'est pas commandé en vitesse car elle est imposée par le régime de rotation de l'arbre secondaire  $\omega_{roue}$  et le rapport de la boîte de vitesses k selon l'équation :

$$\omega_{mot} = k * \omega_{roue}$$

## Modélisation des organes du véhicule électrique hybride

En résumé, le modèle du moteur électrique montré à la figure 2.15 consiste en trois entrées : la consigne du couple  $C_e^*$ , la tension d'alimentation  $V_{bat}$  et la vitesse de rotation  $\omega_{mot}$  et deux sorties : le couple réel fourni  $C_e$  et le courant batterie  $I_{bat}$ .

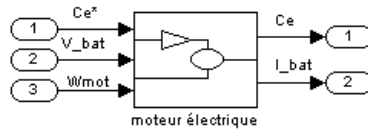


Figure 2.15 : modèle moteur électrique.

Le courant batterie est calculé, par un bilan de puissance en négligeant les pertes dans l'onduleur, de la façon suivante :

$$I_{bat} = \frac{v_{s1}i_{s1} + v_{s2}i_{s2} + v_{s3}i_{s3}}{V_{bat}} \quad (2.23)$$

$v_{si}$  étant la tension instantanée aux bornes d'une phase.

$i_{si}$  étant le courant instantané absorbé par une phase.

### 2.2.6.2 Moteurs à courant continu (MCC)

Parmi les différents types de moteurs à courant continu (moteur série, moteur à excitation séparée, moteur à aimants permanents), c'est essentiellement le moteur à excitation séparée qui est utilisé. C'est la solution la plus économique et la plus fiable grâce à son convertisseur d'induit du type hacheur à deux interrupteurs et un hacheur d'inducteur de plus faible puissance.

Mais cette technologie comporte les inconvénients suivants :

- La difficulté de refroidissement de l'induit tournant ce qui limite l'obtention des possibilités d'un couple massique élevé ;
- La vitesse de rotation de l'induit est limitée par sa constitution ;
- L'usure des balais nécessitant un entretien périodique pour enlever les poussières conductrices qui nuisent à l'isolement du collecteur ;
- Le coût de construction est élevé car la machine est complexe : collecteur, bobinage de l'induit.

## Modélisation des organes du véhicule électrique hybride

### 2.2.6.3 Moteurs synchrones

Dans cette catégorie, on trouve plusieurs sortes de configurations dont nous citons les plus fréquentes dans la littérature :

#### 2.2.6.3.1 Le moteur synchrone à aimants permanents (MSAP) :

Il semble à plus d'un titre, une solution adaptée pour ses performances techniques et en particulier, sa compacité et son rendement. L'excitation dans ce cas est créée par les aimants permanents. Il existe plusieurs sortes de machines synchrones à aimants permanents dont le couple total est la somme d'un hybride, d'un couple de détente et d'un couple réluctant :

Les aimants en surface : le couple réluctant est nul, le rotor ne présentant aucune saillance. Cette machine est dite à pôles lisses.

Les aimants enterrent.

Les aimants à concentration de flux.

Les avantages dont disposent ces machines sont les valeurs élevées des rapports couple/masse et puissance/masse ainsi que leur bon rendement. Cependant le prix des aimants est élevé et ne permet pas, à ce jour, de satisfaire la contrainte sur le prix de vente. Le fonctionnement en de fluxage dans la zone de fonctionnement à puissance constante est difficile (commande de la machine complexe, risque de désaimantation, pertes électriques supplémentaires dues à l'augmentation du courant statoriques) .

#### 2.2.6.3.2 Le moteur synchrone à rotor bobiné (MSRB)

Il est une solution prometteuse pour la traction électrique automobile. Il ressemble au moteur à courant continu, la différence entre eux réside dans la manière de commuter le courant (commutation mécanique pour la machine à courant continu et commutation électronique pour la machine synchrone à rotor bobine). Le flux d'excitation est créé par un courant que l'on injecte dans les enroulements rétorque. Moyennant l'adjonction d'un hacheur d'inducteur, le MSRB offre un fonctionnement en survitesse aisé à mettre en œuvre. De plus, il est possible de choisir le point de fonctionnement de la machine afin de minimiser les pertes Joule dans l'ensemble convertisseur-machine. Il donne facilement la possibilité de dé-fluxage que l'on peut effectuer par simple réduction du courant d'excitation. Ainsi, cette structure offre un domaine d'exploitation plus étendu que celui des machines à aimants permanents mais elle offre aussi la possibilité d'adaptation des lois de commande permettant l'optimisation du rendement. Par contre, le rotor nécessite des bagues pour l'alimenter, et les

## **Modélisation des organes du véhicule électrique hybride**

bobines d'excitation sont difficiles à refroidir ; cependant, la densité de courant peut être choisie faible pour diminuer les pertes. Les contacts glissants (balais - bagues) limitent le fonctionnement à très haute vitesse de ce type de machines à cause de l'usure des balais.

Le rendement et le rapport couple/vitesse sont relativement faibles par rapport à ceux des machines à aimants permanents et cela à cause des pertes au rotor .

### **2.2.6.3.3 Le moteur à réluctance variable (MRV) :**

Le rotor de ce type de moteur ne contient ni aimants, ni bobinage d'excitation. Le couple est créé seulement grâce à l'effet réluctance. Le stator est semblable à celui de la majorité des machines à courant alternatif.

Le rotor est construit de manière à ce que le rapport entre l'inductance dans l'axe direct et l'axe en quadrature ( $L_d/L_q$ ) soit le plus important possible. La plage de fonctionnement en vitesse à puissance constante est directement liée à ce rapport. Il en est de même pour le facteur de puissance (plus ce rapport est élevé plus le facteur de puissance est grand). L'obtention d'un rapport ( $L_d/L_q$ ) élevé induit des contraintes au niveau de la fabrication, qui se répercutent négativement sur le coût.

Les inconvénients pour ce type de machine se résument par la délicatesse de la fabrication à cause de la nécessité d'un rapport de saillance élevé, la faiblesse du facteur de puissance et la complexité de l'électronique de commande nécessitant un capteur de position. Les avantages principaux de ces machines sont la possibilité de fonctionnement à vitesse élevée (grâce à la passivité du rotor) et le rendement relativement élevé par rapport à la machine asynchrone .

### **2.2.6.3.4 Le moteur synchrone à double excitation (MSDE) :**

L'utilisation des aimants permanents permet d'augmenter significativement le rendement et le rapport couple/masse ou la compacité de la machine (rapport couple volume).

Cela nous pousse à opter pour une machine à aimants permanents. Mais l'utilisation des aimants engendre un problème lié à la nature de leur flux d'excitation. Pour les machines associées à des convertisseurs commandés, il est possible par la commande du courant d'induit de réduire le flux total et d'augmenter la plage de fonctionnement en vitesse. Il faut cependant que la réaction magnétique d'induit soit comparable au flux des aimants.



## Modélisation des organes du véhicule électrique hybride

Par contre, en cas de perte de contrôle, le problème reste entier. Pour remédier à ce problème, plusieurs équipes de recherche ont mis en lumière de nouvelles structures dites à double excitation. Le flux d'excitation est créé par deux sources différentes ; l'une est à aimants permanents, l'autre bobinée (le plus souvent) ou à aimant permanents (le dé-fluxage mécanique), le but recherché étant d'utiliser la deuxième source d'excitation pour contrôler le flux dans l'entrefer.

Selon la manière dont sont agencés les deux circuits d'excitation il y a plusieurs types de machines à double excitation. Nous allons les classer en deux catégories :

Machine synchrone à double excitation série : le flux de l'excitation bobinée traverse les aimants. Les flux d'excitation bobinée et celui des aimants empruntent le même chemin. La réduction du flux dans l'entrefer est réalisée en injectant dans les bobines d'excitation un courant qui crée une FMM opposée à celle des aimants. L'inconvénient est que les bobines d'excitation sont magnétiquement en série avec les aimants. Ces derniers possèdent une perméabilité proche de celle de l'air, les bobines d'excitation voient donc une réluctance magnétique élevée, ce qui réduit considérablement l'efficacité du défluxage par les bobines.

Machine synchrone à double excitation parallèle : dans cette configuration, les flux des aimants et de l'excitation bobinée n'ont pas le même trajet tout le temps. Le flux de l'excitation bobinée ne traverse pas les aimants, le risque de démagnétisation des aimants par l'excitation bobinée est ainsi écarté. La double excitation parallèle offre beaucoup de possibilités d'agencement des deux circuits d'excitation.

Le fonctionnement à puissance maximale constante

Les constructeurs d'automobiles exigent, pour supprimer la boîte de vitesse, un moteur électrique capable de délivrer sa puissance maximale sur une large plage de vitesse.

Le véhicule hybride doit développer un effort à ses jantes supérieur aux efforts résistants présents par la voiture pour qu'elle puisse démarrer et accélérer. Ces performances sont représentées sur une courbe que l'on appelle la caractéristique Effort/Vitesse du véhicule en mode moteur (Fig. 2.16). La courbe en pointille représente la résistance à l'avancement sur une route droite horizontale.

A partir de la caractéristique effort/vitesse nous déduisons celle qui se décline sur les moteurs de traction à savoir la caractéristique couple/vitesse de la figure (Fig. 2.16).

## Modélisation des organes du véhicule électrique hybride

Cette dernière présente la forme normalisée du couple résistant dans le domaine du transport électrique

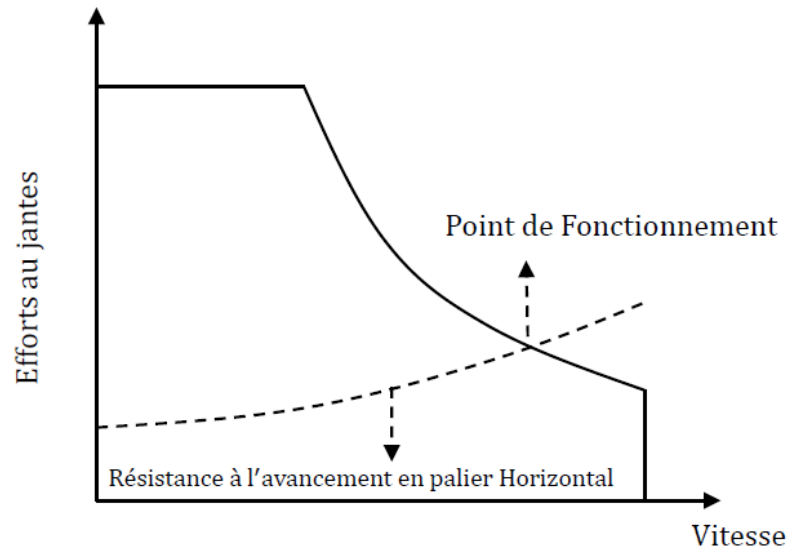


Figure 2.16 : Caractéristique Effort/Vitesse d'engins moteurs dans le domaine du transport

On distingue deux zones de fonctionnement, dans la première, le moteur électrique fournit un couple constant afin de ramener le véhicule à une première vitesse de croisière appelée vitesse de base. A la limite du système de l'alimentation électronique du moteur, on fait fonctionner celui-ci en puissance absorbée constante, ce qui se traduit par une diminution du couple et une accélération si l'on réduit le flux l'excitation du moteur. Ce dernier régime de fonctionnement atteint une vitesse supérieure a la vitesse de base .

## Modélisation des organes du véhicule électrique hybride

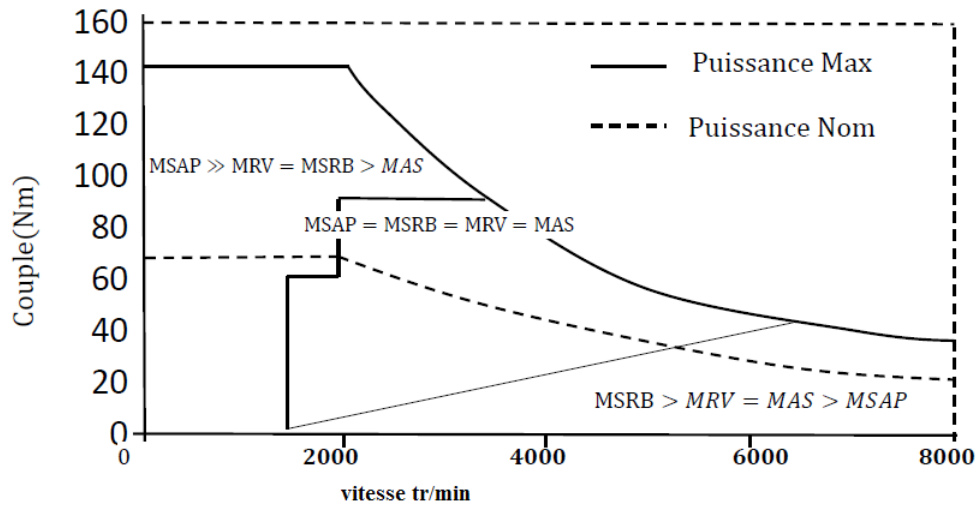


Figure 2.17 : Comparatif des rendements

Les règles supplémentaires de dimensionnement d'un moteur électrique se traduisent sous la forme de contraintes agissant sur son couple et sa vitesse. Le couple est limité par le volume disponible et la charge linéique que l'on peut obtenir dans la machine, qui elle-même est limitée par les échauffements tolérables maximaux et les phénomènes de saturation magnétique ; les contraintes sont donc volumiques, thermiques et magnétiques.

Quant à la vitesse, elle est limitée par les pertes fer qui détériorent le rendement pour les vitesses élevées et par le comportement mécanique de la machine ; les contraintes sont donc mécaniques et énergétiques.

Le moteur électrique, contrairement au moteur thermique à explosion, peut délivrer, s'il est convenablement refroidi, son couple maximal dès l'arrêt. Si, de plus, il peut délivrer sa puissance maximale dans une plage de vitesse suffisamment étendue, on peut éliminer de la chaîne de transmission habituelle, la boîte de vitesse, l'embrayage et leurs organes de commande. Tous les moteurs à commutation électrique (asynchrone, synchrone à rotor bobiné et même à aimants, ainsi qu'à réluctance variable) peuvent fonctionner sur de larges plages de vitesse sans nécessiter de boîte de vitesse en ayant recours au défluxage (réduction du flux dans l'entrefer). Cela introduit bien sûr des contraintes additionnelles pour le dimensionnement, mais avec une réduction assez conséquente sur le coût global.

Le moteur à courant continu à collecteur et à excitation séparée permet aisément d'obtenir un tel fonctionnement. Son couple maximal est atteint au courant d'induit maximal et au flux inducteur maximal. Lorsque sa vitesse arrive à la vitesse de base (nominale), sa tension d'induit atteint sa limite (tension batterie), alors en diminuant le flux d'excitation (défluxer la

## **Modélisation des organes du véhicule électrique hybride**

machine), on peut étendre la plage de vitesse dans une zone dite à puissance maximale constante (PMC).

La tension étant globalement proportionnelle au produit (Flux)(vitesse), il est nécessaire de réduire le flux si l'on veut augmenter la vitesse.

Le moteur synchrone à aimants permanents (MSAP) est pénalisé par une limite de température des aimants (135 °C) ainsi que par le coût de ceux-ci. En outre, ses zones de bons rendements (Fig. 2.12), bien adaptées au véhicule hybride.

Le MSRB demande une industrialisation plus complexe (bobinage du rotor, bagues et balais).

Le moteur asynchrone est plus difficile à faire fonctionner à puissance constante sur une large plage de vitesse compte tenu des conditions de defluxage.

Sans balais, avec une structure de bobinage minimisant les risques de court-circuit, le moteur à reluctance (SR) variable présente un échauffement moindre en fonctionnement par rapport aux autres technologies des moteurs.

### **2.2.6.4 Le choix du moteur électrique**

Les véhicules totalement hybrides et électriques à batterie sont équipés d'un moteur de traction électrique pouvant propulser le véhicule uniquement grâce à la puissance électrique. Les moteurs synchrones à aimant permanent (MSAP) et les moteurs asynchrones (MAS) sont les deux types principaux de moteurs entraînant actuellement les moteurs de traction électrique.

Pour la réussite du mariage entre le thermique et l'électrique on a choisi le moteur asynchrone.

Pour cela Le moteur asynchrone (MAS) semble à plus d'un titre, la solution la plus adaptée pour une traction automobile grâce à ses performances techniques et en particulier, sa compacité et son rendement. Ce type de moteur s'est imposé dans l'industrie grâce à sa robustesse et sa simplicité de construction.

### **2.2.6.5 Modélisation de la machine asynchrone**

Un modèle dynamique de la MAS, faisant l'objet de commande, doit être connu pour comprendre et élaborer la commande vectorielle. Dû au fait que chaque bonne commande doit faire face à n'importe quel changement possible dans le montage, on peut dire que le modèle dynamique de la MAS doit être une bonne approximation du modèle réel ; de plus, il doit

## Modélisation des organes du véhicule électrique hybride

contenir tous les effets dynamiques importants rencontrés durant les régimes permanent et transitoire, et il doit être valable pour n'importe quel changement au niveau de l'alimentation de l'onduleur tel que les tensions ou les courants.

Un tel modèle peut être obtenu au moyen de la théorie des deux axes des machines électriques. Pour ce faire, il est indispensable de poser certaines hypothèses qui ont pour but de faciliter la mise en équations des circuits électriques de la machine.

### *Hypothèses simplificatrices*

La modélisation de la Machine Asynchrone est établie sous les hypothèses simplificatrices suivantes :

L'entrefer est d'épaisseur uniforme et l'effet d'encoche est négligeable.

- Nous supposons que nous travaillons en régime non saturé.
- Nous négligeons le phénomène d'hystérésis, les courants de Foucault et l'effet de peau.
- Les résistances des enroulements ne varient pas avec la température.
- Le bobinage est réparti de manière à donner une f.m.m. sinusoïdale s'il est alimenté par des courants sinusoïdaux.
- Le régime homopolaire est nul puisque le neutre n'est pas relié.

Parmi les conséquences importantes de ces hypothèses on peut citer :

- L'additive des flux.
- La constance des inductances propres.
- La loi de variation sinusoïdale des inductances mutuelles entre les enroulements du stator et du rotor en fonction de l'angle électrique de leurs axes magnétiques.

Ainsi, nous pouvons schématiser la MAS comme la montre la figure (2.18). Elle est munie de six enroulements :

Le stator est formé de trois enroulements fixes décalés dans l'espace de  $120^\circ$  et traversés par trois courants variables.

Le rotor peut être modélisé par trois enroulements identiques décalés dans l'espace de  $120^\circ$ .

Ces enroulements sont court-circuités et la tension à leurs bornes est nulle.

Nous posons  $\theta$  l'angle électrique entre la phase A statorique et la phase a rotorique.

## Modélisation des organes du véhicule électrique hybride

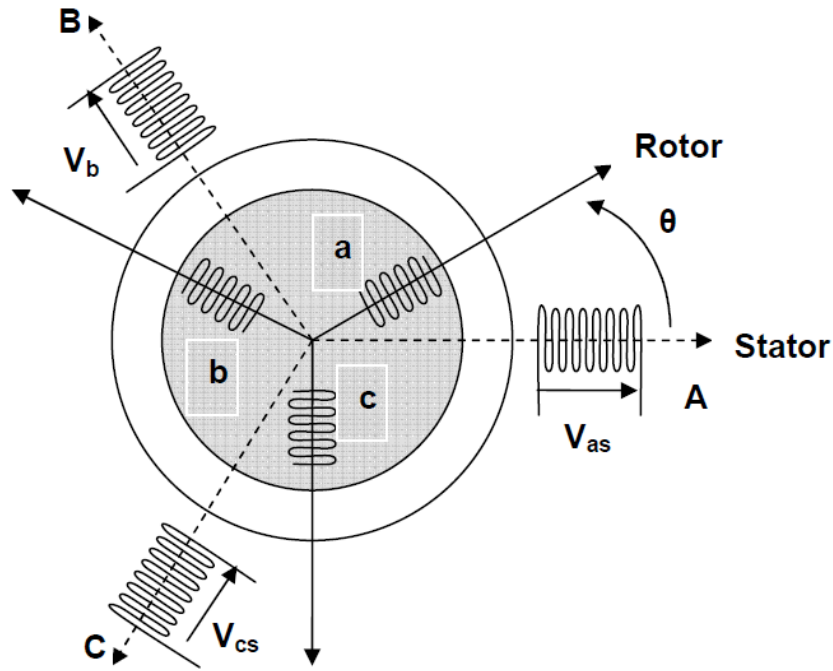


Figure 2.18 Représentation schématique d'une MAS triphasée.

### Equations des tensions et des flux

Les équations des tensions statoriques, écrites dans un référentiel stationnaire lié au stator, peuvent être exprimées, en utilisant la notation matricielle, par :

$$[V_s] = [R_s] \cdot [I_s] + \frac{d}{dt} [\Phi_s] \quad (2.24)$$

Les équations des tensions rotoriques, écrites dans un référentiel tournant lié au rotor, peuvent être exprimées par :

$$[0] = [R_r] \cdot [I_r] + \frac{d}{dt} [\Phi_r] \quad (2.25)$$

$$\text{Ou } [V_s] = \begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix}; \quad [I_s] = \begin{bmatrix} I_{as} \\ I_{bs} \\ I_{cs} \end{bmatrix}; \quad [I_r] = \begin{bmatrix} I_{ar} \\ I_{br} \\ I_{cr} \end{bmatrix}; \quad [\Phi_s] = \begin{bmatrix} \Phi_{as} \\ \Phi_{bs} \\ \Phi_{cs} \end{bmatrix}; \quad [\Phi_r] = \begin{bmatrix} \Phi_{ar} \\ \Phi_{br} \\ \Phi_{cr} \end{bmatrix};$$

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

Les flux statoriques et rotoriques instantanés par phase, sont donnés par :

$$[\Phi_s] = [L_{ss}] \cdot [I_s] + [M_{sr}] \cdot [I_r] \quad (2.26)$$

$$[\Phi_r] = [L_{rr}] \cdot [I_r] + [M_{sr}]^t \cdot [I_s] \quad (2.27)$$

## Modélisation des organes du véhicule électrique hybride

$$\text{Ou } [L_{SS}] = \begin{bmatrix} l_s & M_s & M_s \\ M_s & l_s & M_s \\ M_s & M_s & l_s \end{bmatrix}; \quad [L_{rr}] = \begin{bmatrix} l_r & M_r & M_r \\ M_r & l_r & M_r \\ M_r & M_r & l_r \end{bmatrix}$$

$$\text{et } [M_{sr}] = M_{sr} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos\theta & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos\theta \end{bmatrix}$$

En mettant (2.26) et (2.27) dans, respectivement, (2.24) et (2.25), nous obtenons les deux expressions suivantes :

$$[V_s] = [R_s] \cdot [I_s] + [L_{SS}] \frac{d}{dt} [I_s] + \frac{d}{dt} \{ [M_{sr}] \cdot [I_r] \} \quad (2.28)$$

$$[0] = [R_r] \cdot [I_r] + [L_{rr}] \frac{d}{dt} [I_r] + \frac{d}{dt} \{ [M_{sr}]^t \cdot [I_s] \} \quad (2.29)$$

Cette mise en équation aboutit à des équations différentielles à coefficients variables (2.28) et (2.29). L'étude analytique du comportement du système est alors relativement laborieuse, vu le grand nombre de variables. On utilise alors des transformations mathématiques qui permettent de décrire le comportement de la machine à l'aide d'équations différentielles à coefficients constants.

Les transformations utilisées doivent conserver la puissance instantanée et la réciprocité des inductances mutuelles. Ceci permet d'établir une expression du couple électromagnétique dans le repère correspondant au système transformé et qui reste valable pour la machine réelle. Parmi les transformations utilisées, on cite celle de R.H.Park.

### ***Modèle de Park de la Machine Asynchrone***

Afin d'obtenir des coefficients constants dans les équations différentielles, la transformation de Park est utilisée. Cette transformation est ancienne (1929) et si elle redevient à l'ordre du jour, c'est tout simplement parce que les progrès de la technologie des composants permettent maintenant de la réaliser en temps réel.

Physiquement, on peut la comprendre comme une transformation des trois enroulements de la MAS à seulement deux enroulements, comme la montre la figure (2.19)

## Modélisation des organes du véhicule électrique hybride

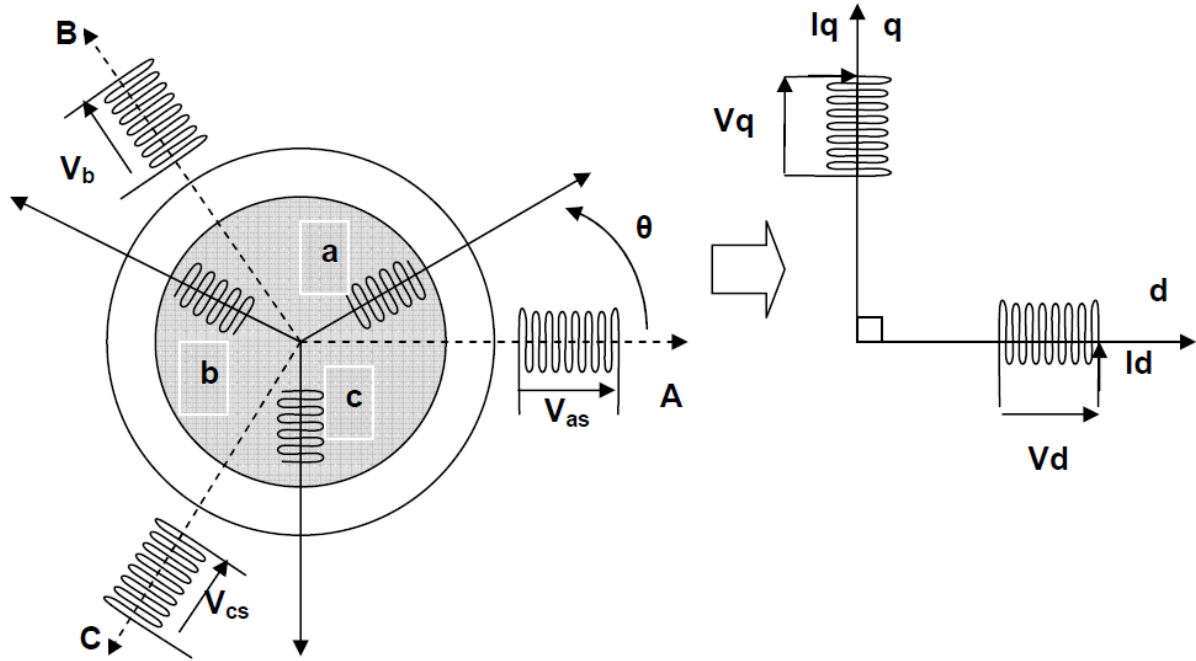


Figure 2.19 Modèle de Park de la MAS

### *Transformation de Park*

La transformation de Park est constituée d'une transformation triphasée – diphasée suivie d'une rotation. Elle permet de passer du repère **abc** vers le repère mobile **dq**.

Pour chaque ensemble de grandeurs (statoriques et rotoriques), on applique la transformation de Park. Pour simplifier les équations, et par conséquent le modèle, les repères de la transformation de Park des grandeurs statoriques et celle des grandeurs rotoriques doivent coïncider. En effet, si l'on note par  $\theta_s$  (resp. par  $\theta_r$ ) l'angle de la transformation de Park des grandeurs statoriques (resp. rotoriques) (figure 2.20), ceci se fait en liant les angles  $\theta_s$  et  $\theta_r$  par la relation :

$$\theta_r + \theta = \theta_s \quad (2.30)$$



## Modélisation des organes du véhicule électrique hybride

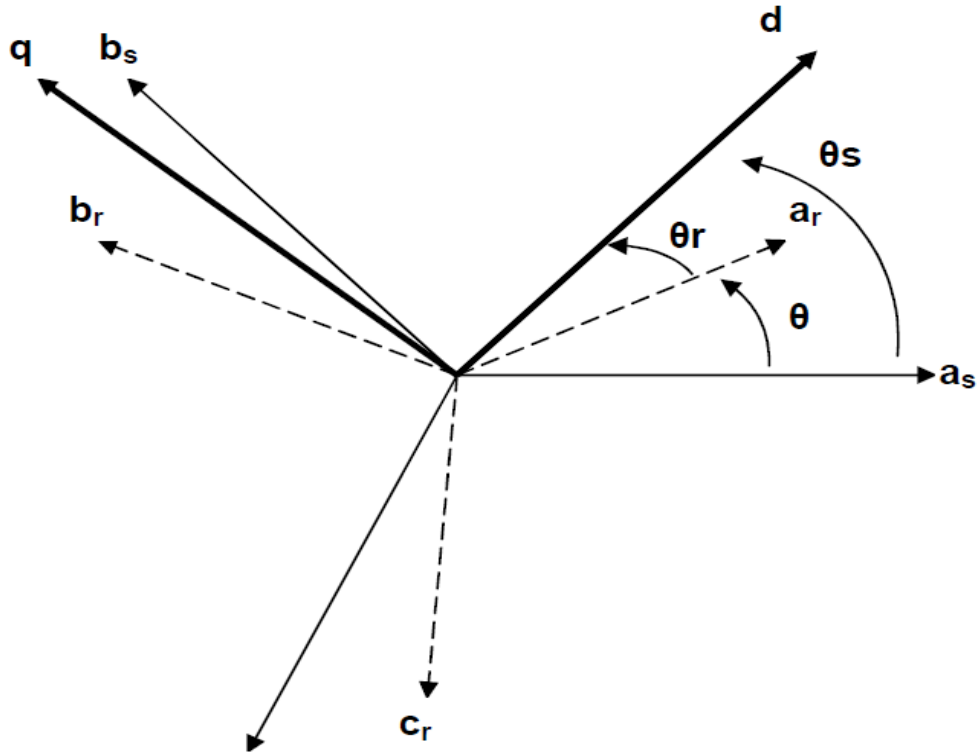


Figure 2.20 Représentation des axes de la machine

Les amplitudes directe ( $d$ ) et en quadrature ( $q$ ) des grandeurs statoriques et rotoriques sont fictives ; les équivalences pour ces grandeurs avec les grandeurs par phase sont comme suit

$$\begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \\ V_0 \end{bmatrix} = c \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta_s) & \cos(\theta_s - 2\pi/3) & \cos(\theta_s + 2\pi/3) \\ -\sin(\theta_s) & -\sin(\theta_s - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_s + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix} = [P(\theta_s)] \cdot \begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix} \quad (2.31)$$

$$\begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix} = c \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta_s) & -\sin(\theta_s) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta_s - 2\pi/3) & -\sin(\theta_s - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta_s + 2\pi/3) & -\sin(\theta_s + \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \\ V_0 \end{bmatrix} = [P^{-1}(\theta_s)] \cdot \begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \\ V_0 \end{bmatrix} \quad (2.32)$$

où  $c$  est une constante qui peut prendre soit les valeurs  $\frac{2}{3}$  ou 1 pour la non conservation de puissance, soit la valeur  $\sqrt{\frac{2}{3}}$  pour une conservation de puissance.

Dans notre cas, nous prendrons:

$$c = \sqrt{\frac{2}{3}} \quad (2.33)$$

Ces équations précédentes peuvent être appliquées aussi pour n'importe quelles autres grandeurs telles que les courants et les flux.

## Modélisation des organes du véhicule électrique hybride

### *Application aux équations des tensions*

Appliquons la transformation de Park (2.31) et (2.32) à l'expression (2.24) :

$$[P^{-1}(\theta_s)] \cdot [V_{sdq}] = [R_s] \cdot [P^{-1}(\theta_s)] \cdot [I_{sdq}] + \frac{d}{dt} \{ [P^{-1}(\theta_s)] \cdot [\Phi_{sdq}] \} \quad (2.34)$$

En multipliant les deux membres de l'égalité par  $[P(\theta_s)]$  et en simplifiant nous trouvons :

$$[V_{sdq}] = [R_s] \cdot [I_{sdq}] + \frac{d}{dt} [\Phi_{sdq}] + [P(\theta_s)] \frac{d}{dt} [P^{-1}(\theta_s)] \cdot [\Phi_{sdq}] \quad (2.35)$$

Or

$$\frac{d}{dt} [P^{-1}(\theta_s)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \frac{d\theta_s}{dt} \cdot \begin{bmatrix} -\sin(\theta_s) & -\cos(\theta_s) & 0 \\ -\sin(\theta_s - \frac{2\pi}{3}) & -\cos(\theta_s - \frac{2\pi}{3}) & 0 \\ -\sin(\theta_s + \frac{2\pi}{3}) & -\cos(\theta_s + \frac{2\pi}{3}) & 0 \end{bmatrix} \quad (2.36)$$

Donc, après un calcul direct, nous trouvons

$$[P(\theta_s)] \frac{d}{dt} [P^{-1}(\theta_s)] = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{d\theta_s}{dt} & 0 \\ \frac{d\theta_s}{dt} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.37)$$

Et l'expression (2.27) devient alors :

$$[V_{sdq}] = [R_s] \cdot [I_{sdq}] + \frac{d}{dt} [\Phi_{sdq}] + \begin{bmatrix} 0 & -\frac{d\theta_s}{dt} & 0 \\ \frac{d\theta_s}{dt} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} [\Phi_{sdq}] \quad (2.38)$$

ou encore :

$$\begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 \\ 0 & R_s \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{ds} \\ \Phi_{qs} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -\frac{d\theta_s}{dt} \\ \frac{d\theta_s}{dt} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Phi_{ds} \\ \Phi_{qs} \end{bmatrix} \quad (2.39)$$

De manière similaire, et en suivant les mêmes étapes, nous obtenons pour le rotor l'expression suivante :

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r & 0 \\ 0 & R_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{dr} \\ I_{qr} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{dr} \\ \Phi_{qr} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -\frac{d\theta_r}{dt} \\ \frac{d\theta_r}{dt} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Phi_{dr} \\ \Phi_{qr} \end{bmatrix} \quad (2.40)$$

### *Application aux équations des flux*

Appliquons la transformation de Park ((2.24) et (2.25)) à l'expression (2.19) :

$$[P^{-1}(\theta_s)] [\Phi_{sdq}] = [L_{ss}] \cdot [P^{-1}(\theta_s)] \cdot [I_{sdq}] + [M_{sr}] [P^{-1}(\theta_r)] \cdot [I_{rdq}] \quad (2.41)$$

Soit :

$$[\Phi_{sdq}] = [P(\theta_s)] \cdot [L_{ss}] \cdot [P^{-1}(\theta_s)] \cdot [I_{sdq}] + [P(\theta_s)] \cdot [M_{sr}] \cdot [P^{-1}(\theta_r)] \cdot [I_{rdq}] \quad (2.42)$$

## Modélisation des organes du véhicule électrique hybride

Un calcul simple nous donne :

$$[P(\theta_s)]. [L_{ss}]. [P^{-1}(\theta_s)] = \begin{bmatrix} l_s - M_s & 0 & 0 \\ 0 & l_s - M_s & 0 \\ 0 & 0 & l_s + 2M_s \end{bmatrix} \quad (2.43)$$

et

$$[P(\theta_s)]. [M_{sr}]. [P^{-1}(\theta_s)] = \frac{3}{2} \cdot M_{sr} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta_s - \theta_r - \theta) & \sin(\theta_s - \theta_r - \theta) & 0 \\ -\sin(\theta_s - \theta_r - \theta) & \cos(\theta_s - \theta_r - \theta) & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.44)$$

Or, d'après l'égalité (2.40), nous pouvons écrire :

$$[P(\theta_s)]. [M_{sr}]. [P^{-1}(\theta_r)] = \frac{3}{2} \cdot M_{sr} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.45)$$

En introduisant les inductances cycliques :

$$L_s = l_s + M_s$$

$$L_m = \frac{3}{2} \cdot M_{sr} \quad (2.46)$$

l'expression (2.42) devient alors :

$$\begin{bmatrix} \Phi_{ds} \\ \Phi_{qs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & 0 \\ 0 & L_s \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_m & 0 \\ 0 & L_m \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{dr} \\ I_{qr} \end{bmatrix} \quad (2.47)$$

De la même manière, en appliquant la transformation de Park à l'équation du flux rotorique, et en introduisant l'inductance cyclique:

$$L_r = l_r + M_r \quad (2.48)$$

on aura :

$$\begin{bmatrix} \Phi_{dr} \\ \Phi_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_r & 0 \\ 0 & L_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{dr} \\ I_{qr} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_m & 0 \\ 0 & L_m \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \end{bmatrix} \quad (2.49)$$

### **Choix du référentiel**

De manière générale, les équations des tensions et des flux de la MAS, écrites dans le plan  $\mathbf{dq}$ , d'après (2.40), (2.41), (2.47) et (2.49), sont les suivantes :

**Equations des tensions :**

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s \cdot I_{ds} + \frac{d\Phi_{ds}}{dt} - \frac{d\theta_s}{dt} \cdot \Phi_{qs} \\ V_{qs} = R_s \cdot I_{qs} + \frac{d\Phi_{qs}}{dt} + \frac{d\theta_s}{dt} \cdot \Phi_{ds} \\ 0 = R_r \cdot I_{dr} + \frac{d\Phi_{dr}}{dt} + \frac{d\theta_r}{dt} \cdot \Phi_{qr} \\ 0 = R_r \cdot I_{qr} + \frac{d\Phi_{qr}}{dt} + \frac{d\theta_r}{dt} \cdot \Phi_{dr} \end{cases} \quad (2.50)$$

**Equations des flux :**

## Modélisation des organes du véhicule électrique hybride

$$\begin{cases} \Phi_{ds} = L_s \cdot I_{ds} + L_m \cdot I_{dr} \\ \Phi_{qs} = L_s \cdot I_{qs} + L_m \cdot I_{qr} \\ \Phi_{dr} = L_r \cdot I_{dr} + L_m \cdot I_{ds} \\ \Phi_{qr} = L_r \cdot I_{qr} + L_m \cdot I_{qs} \end{cases} \quad (2.51)$$

Cependant, nous pouvons simplifier ces équations encore en choisissant un référentiel particulier pour  $\mathbf{dq}$ . En effet, trois types de référentiels peuvent être envisagés, à savoir :

- **Référentiel lié au stator** : caractérisé par  $\theta_s=0$ , et par conséquence  $\theta_r= -\theta$

Le système d'équations (2.50) devient alors :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s \cdot I_{ds} + \frac{d\Phi_{ds}}{dt} \\ V_{qs} = R_s \cdot I_{qs} + \frac{d\Phi_{qs}}{dt} \\ 0 = R_r \cdot I_{dr} + \frac{d\Phi_{dr}}{dt} + \omega \cdot \Phi_{qr} \\ 0 = R_r \cdot I_{qr} + \frac{d\Phi_{qr}}{dt} + \omega \cdot \Phi_{dr} \end{cases} \quad (2.52)$$

Où  $\omega = \frac{d\theta}{dt}$  est la pulsation mécanique.

- **Référentiel lié au rotor** : caractérisé par  $\theta_r=0$ , et par conséquence  $\theta_s= \theta$

Le système d'équations (2.50) devient alors :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s \cdot I_{ds} + \frac{d\Phi_{ds}}{dt} - \omega \cdot \Phi_{qs} \\ V_{qs} = R_s \cdot I_{qs} + \frac{d\Phi_{qs}}{dt} + \omega \cdot \Phi_{ds} \\ 0 = R_r \cdot I_{dr} + \frac{d\Phi_{dr}}{dt} \\ 0 = R_r \cdot I_{qr} + \frac{d\Phi_{qr}}{dt} \end{cases} \quad (2.53)$$

- **Référentiel lié au synchronisme** : dans ce cas, la vitesse repère  $\mathbf{dq}$  est la vitesse du

synchronisme  $\omega_s$  (vitesse du champ tournant), donc  $\frac{d\theta_s}{dt} = \omega_s$ , et  $\frac{d\theta_r}{dt} = \omega_s - \omega$ .

Le système d'équations (2.50) devient alors :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s \cdot I_{ds} + \frac{d\Phi_{ds}}{dt} - \omega_s \cdot \Phi_{qs} \\ V_{qs} = R_s \cdot I_{qs} + \frac{d\Phi_{qs}}{dt} + \omega_s \cdot \Phi_{ds} \\ 0 = R_r \cdot I_{dr} + \frac{d\Phi_{dr}}{dt} - (\omega_s - \omega) \cdot \Phi_{qr} \\ 0 = R_r \cdot I_{qr} + \frac{d\Phi_{qr}}{dt} + (\omega_s - \omega) \cdot \Phi_{dr} \end{cases} \quad (2.54)$$

## Modélisation des organes du véhicule électrique hybride

C'est dans ce référentiel que nous allons travailler par la suite. L'avantage d'utiliser ce référentiel est d'avoir des grandeurs constantes en régime permanent. Il est alors plus aisé d'en faire la régulation

### Expressions du couple électromagnétique

La détermination du couple instantané dans une machine peut être effectuée de deux manières:

Nous allons utiliser La puissance électrique instantanée fournie aux enroulements statoriques et rotoriques en fonction des grandeurs d'axes d, q est donnée par l'expression suivante :

$$p_e = V_{ds} \cdot I_{ds} + V_{qs} \cdot I_{qs} + V_{dr} \cdot I_{dr} + V_{qr} \cdot I_{qr} \quad (2.55)$$

En développant cette dernière expression, nous trouvons que la puissance instantanée se décompose en trois termes : puissance dissipée en pertes Joule, puissance représentant les échanges d'énergie électromagnétique avec la source, et puissance mécanique :

$$P_e = P_j + P_{me} + P_{mec} \quad (2.56)$$

Ou

$$P_j = R_s \cdot (I_{ds}^2 + I_{qs}^2) + R_r \cdot (I_{dr}^2 + I_{qr}^2) \quad (2.57)$$

$$P_{me} = I_{ds} \cdot \frac{d\Phi_{ds}}{dt} + I_{qs} \cdot \frac{d\Phi_{qs}}{dt} + I_{dr} \cdot \frac{d\Phi_{dr}}{dt} + I_{qr} \cdot \frac{d\Phi_{qr}}{dt} \quad (2.58)$$

$$P_{mec} = \omega(I_{dr} \cdot \Phi_{qr} - I_{qr} \cdot \Phi_{dr}) \quad (2.59)$$

Or la puissance mécanique est reliée au couple électromagnétique par l'expression suivante :

$$C_e = \frac{P_{me}}{\Omega} = P \cdot \frac{P_{me}}{\omega} \quad (2.60)$$

En tenant compte des expressions (2.51), (2.59) et (2.60), nous pouvons avoir plusieurs expressions scalaires du couple électromagnétique toutes égales :

$$\begin{cases} C_e = P \cdot (\Phi_{qr} \cdot I_{dr} - \Phi_{dr} \cdot I_{qr}) \\ C_e = P \cdot (\Phi_{ds} \cdot I_{qs} - \Phi_{qs} \cdot I_{ds}) \\ C_e = P \cdot L_m \cdot (I_{dr} \cdot I_{qs} + I_{ds} \cdot I_{qr}) \\ C_e = P \cdot \frac{L_m}{L_r} (\Phi_{dr} \cdot I_{qs} + \Phi_{qr} \cdot I_{ds}) \end{cases} \quad (2.61)$$

Mise sous forme d'équations d'état

Il est nécessaire de représenter le modèle non linéaire de la machine asynchrone sous forme d'équations d'état. Pour une machine asynchrone alimentée en tension, les tensions statoriques  $V_{ds}$  et  $V_{qs}$  sont les variables de contrôle, et nous considérons les flux rotoriques, les courants statoriques et la pulsation mécanique comme variables d'état.

L'équation mécanique de la MAS est donnée par :

## Modélisation des organes du véhicule électrique hybride

$$J \cdot \frac{d\Omega}{dt} = C_e - C_r \quad (2.62)$$

Où  $C_r$  est le couple résistant incluant les frottements et le couple de charge.

En utilisant les expressions (2.51), (2.54) et (2.62) et après arrangement, nous aurons le système suivant :

$$(2.63) \quad \left\{ \begin{array}{l} \frac{dI_{ds}}{dt} = \frac{1}{\sigma \cdot L_s} \left[ -\left( R_s + \frac{L_m^2}{L_r \cdot T_r} \right) \cdot I_{ds} + \sigma \cdot L_s \cdot \omega \cdot I_{qs} + \frac{L_m}{L_r \cdot T_r} \cdot \Phi_{dr} + \frac{L_m}{L_r} \cdot \omega \cdot \Phi_{qr} + V_{ds} \right] \\ \frac{dI_{qs}}{dt} = \frac{1}{\sigma \cdot L_s} \left[ -\sigma \cdot L_s \cdot \omega \cdot I_{ds} - \left( R_s + \frac{L_m^2}{L_r \cdot T_r} \right) \cdot I_{qs} - \frac{L_m}{L_r} \cdot \omega \cdot \Phi_{dr} + \frac{L_m}{L_r \cdot T_r} \cdot \Phi_{qr} + V_{qs} \right] \\ \frac{d\Phi_{dr}}{dt} = \frac{L_m}{T_r} \cdot I_{ds} - \frac{1}{T_r} \cdot \Phi_{dr} + (\omega_s - \omega) \cdot \Phi_{qr} \\ \frac{d\Phi_{qr}}{dt} = \frac{L_m}{T_r} \cdot I_{qs} - (\omega_s - \omega) \cdot \Phi_{dr} - \frac{1}{T_r} \cdot \Phi_{qr} \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{P^2}{J} \cdot \frac{L_m}{T_r} (\Phi_{dr} \cdot I_{qs} - \Phi_{qr} \cdot I_{ds}) - \frac{P}{J} \cdot C_r \end{array} \right.$$

Où

$$\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_s \cdot L_r} \text{ est le facteur de dispersion.}$$

$$T_r = \frac{L_r}{R_r} \text{ est la constante du temps rotorique.}$$

### 2.2.7 Commande vectorielle d'un moteur asynchrone

#### Introduction

Dans une machine à courant continu à excitation séparée, le vecteur de la F.M.M de l'induit forme un angle droit avec le vecteur du flux inducteur. Cet angle reste droit quelque soit la charge et la vitesse de rotation. Le couple est donc proportionnel au flux inducteur et au courant d'induit. Ainsi, si nous maintenons le flux inducteur constant (comme dans le cas d'une machine à courant continu à excitation constante), le couple est directement proportionnel au courant d'induit. Ceci justifie les bonnes performances dynamiques de la machine à courant continu [13], [14].

Dans une machine asynchrone, l'angle entre le champ tournant statorique et le champ tournant rotorique varie en fonction de la charge et de la vitesse de glissement, ce qui provoque des interactions complexes et des réponses oscillatoires. *Blaschke* et *Hasse* ont proposé une méthode, dite « commande vectorielle », permettant d'obtenir une situation équivalente à celle de la machine à courant continu [15], [16]. Le vecteur courant statorique est décomposé en deux composantes, l'une contrôle le flux et l'autre contrôle le couple.

## Modélisation des organes du véhicule électrique hybride

Dans cet exposé nous présenterons la commande vectorielle d'une machine asynchrone alimentée par un onduleur de tension commandé par la technique de modulation de largeur d'impulsion sinus-triangle. Nous étudierons tout d'abord le principe d'orientation du flux rotorique. Ensuite, nous présenterons la méthode utilisée pour réaliser la commande vectorielle, à savoir ; la commande vectorielle directe alimentée par un onduleur de tension.

### 2.2.7.1 Théorie de la commande vectorielle de la MAS :

#### 2.2.7.1.1 Modèle de la machine asynchrone :

La théorie avancée de la machine asynchrone est basée sur la transformation de Park qui rapporte les équations électriques statoriques et rotoriques à des axes électriquement perpendiculaires appelées (d) pour l'axe direct, et (q) pour l'axe en quadrature. Par raison de simplicité, nous considérons une machine asynchrone triphasée bobinée et un système d'axe (d, q) tournant à la vitesse de synchronisme.

Nous considérons comme variables d'état les courants statoriques ( $i_{sd}, i_{sq}$ ), les flux rotoriques ( $\varphi_{rd}, \varphi_{rq}$ ) et la vitesse électrique de rotation  $\omega$ . Le modèle de la machine dans le repère (d, q) tournant à la vitesse de synchronisme  $\omega_s$  est donné par :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d}{dt} I_{ds} = \frac{1}{\sigma L_s} \left[ -R_{sr} I_{ds} + \omega_s \sigma L_s I_{qs} + \frac{L_m R_r}{L_r^2} \varphi_{dr} + \frac{L_m}{L_r} \omega \varphi_{qr} + V_{ds} \right] \\ \frac{d}{dt} I_{qs} = \frac{1}{\sigma L_s} \left[ -\omega_s \sigma L_s I_{ds} - R_{sr} I_{qs} - \frac{L_m}{L_r} \omega \varphi_{dr} + \frac{L_m R_r}{L_r^2} \varphi_{qr} + V_{qs} \right] \\ \frac{d}{dt} \varphi_{dr} = \frac{L_m R_r}{L_r} I_{ds} - \frac{R_r}{L_r} \varphi_{dr} + \omega_g \varphi_{qr} \\ \frac{d}{dt} \varphi_{qr} = \frac{L_m R_r}{L_r} I_{qs} - \frac{R_r}{L_r} \varphi_{qr} - \omega_g \varphi_{dr} \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{p}{J} C_{em} - \frac{f}{J} \omega - \frac{P}{J} C_r \end{array} \right. \quad \dots \quad (2.64)$$

## Modélisation des organes du véhicule électrique hybride

Avec :

$$C_{em} = P \frac{L_m}{L_r} (\varphi_{dr} I_{qs} - \varphi_{qr} I_{ds}) \quad (2.65)$$

et

$$\omega_g = \omega_s - \omega, \quad \sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r} \quad \text{et} \quad R_{sr} = \left( R_s + R_r \frac{L_m^2}{L_r^2} \right)$$

### 2.2.7.1.2 Principe de la commande vectorielle :

La commande par flux orienté est une expression qui apparaît de nos jours dans la littérature traitant les techniques de contrôle des machines électriques à courant alternatif, dont le principe de base nous ramène à une notion élémentaire et importante de l'électromagnétisme. A savoir ; la force exercée sur un conducteur, parcouru par un courant et soumis à un champ magnétique, est égale au produit vectoriel du vecteur courant par le vecteur champ. Il en résulte, évidemment, que l'amplitude de cette force sera maximale lorsque le vecteur courant est perpendiculaire au vecteur champ [45].

Pour la machine asynchrone, le principe d'orientation du flux a été développé par *Blaschke* au début des années soixante dix. Il consiste à orienter le vecteur flux suivant l'un des axes du repère (d, q), afin de rendre le comportement de cette machine similaire à celui d'une machine à courant continu à excitation séparée où le courant inducteur contrôle le flux et le courant d'induit contrôle le couple [46]. Il s'agit donc de placer le référentiel (d, q) de sorte que le flux soit aligné sur l'axe direct (d). Ainsi, le flux est commandé par la composante directe du courant et le couple est commandé par l'autre composante [43].

**Remarque :** Dans la littérature, nous trouvons plusieurs types d'orientation, à savoir l'orientation du flux rotorique, l'orientation du flux statorique et l'orientation du flux d'entrefer. Dans notre travail, nous nous intéressons à l'orientation du flux rotorique vue qu'elle est la plus facile à mettre en œuvre par rapport aux autres.



## Modélisation des organes du véhicule électrique hybride

### 2.2.7.1.3 Orientation du flux rotorique :

Le principe d'orientation consiste à aligner le flux rotorique sur l'axe direct du repère de Park [46]. Il est illustré par la figure (2.21).

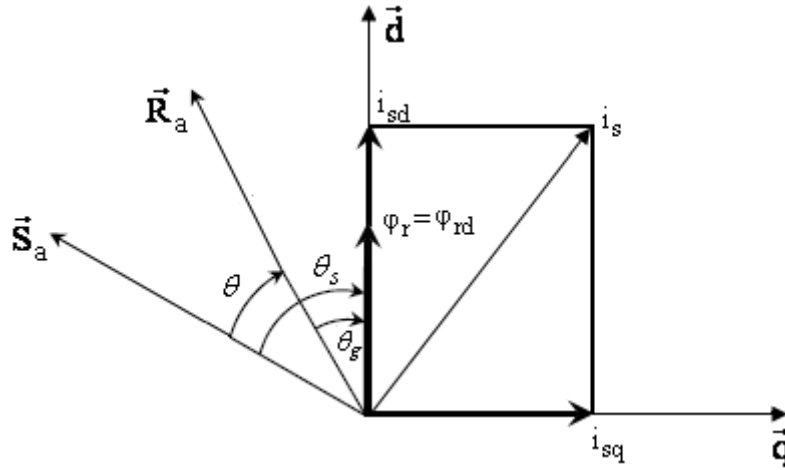


Figure 2.21 : Principe d'orientation du flux rotorique.

Ainsi, nous obtenons :

$$\begin{cases} \varphi_{rd} = \varphi_r \\ \varphi_{rq} = 0 \end{cases} \quad \dots \quad (2.66)$$

En imposant  $\varphi_{rq}=0$ , le modèle (2.64)-(2.65) devient :

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} I_{sd} = \frac{1}{\sigma L_s} \left[ -R_s I_{sd} + \omega_s \sigma L_s I_{sq} - \frac{L_m}{L_r} \left( \frac{d\varphi_r}{dt} \right) + V_{sd} \right] \\ \frac{d}{dt} I_{sq} = \frac{1}{\sigma L_s} \left[ -\omega_s \sigma L_s I_{sd} - R_s I_{sq} - \frac{L_m}{L_r} \omega_s \varphi_r + V_{sq} \right] \end{cases} \quad \dots \quad (2.67)$$

et

## Modélisation des organes du véhicule électrique hybride

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \varphi_r = \frac{L_m R_r}{L_r} I_{ds} - \frac{R_r}{L_r} \varphi_r \\ \omega_g = \frac{L_m R_r}{L_r} \frac{I_{qs}}{\varphi_r} \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{p}{J} (C_{em} - C_r) - \frac{f}{J} \omega \end{cases} \quad (2.68)$$

Avec

$$C_{em} = P \frac{L_m}{L_r} \varphi_r I_{qs}$$

Après le passage par la transformation de Laplace, nous obtenons des expressions (2.68) :

$$\begin{cases} \varphi_r = \frac{L_m}{1 + T_r s} I_{ds} \\ C_{em} = \frac{p L_m}{L_r} \varphi_r I_{qs} \end{cases} \quad \dots \quad (2.69)$$

avec :

$$T_r = \frac{L_r}{R_r}$$

La position angulaire  $\theta_s$  du repère d'axe (d, q) par rapport à la phase statorique de référence  $\vec{S}_a$  est obtenue par :

$$\theta_s = \int \omega_s dt \quad (2.70)$$

avec

$$\omega_s = \omega + \omega_g \quad (2.71)$$

## Modélisation des organes du véhicule électrique hybride

et

$$\omega_g = \frac{L_m}{T_r} \frac{I_{qs}}{\phi_r} \quad (2.72)$$

D'après les équations (2.69), nous constatons qu'il est possible d'agir indépendamment sur le flux rotorique et le couple électromagnétique par l'intermédiaire des composantes des courants statoriques  $I_{sd}$  et  $I_{sq}$  respectivement. Le courant  $I_{sd}$  sert à réguler le flux  $\phi_r$  à sa valeur de référence  $\phi_r^*$ . Ensuite, si  $\phi_r = \phi_r^*$ , le couple électromagnétique  $C_{em}$  prend une forme similaire à celle de la machine à courant continu, et sera contrôlé proportionnellement par le courant  $I_{sq}$ .

La principale difficulté de la mise en œuvre de la commande vectorielle de la machine asynchrone par le biais du modèle (2.67) à (2.72), réside dans la détermination de la position et l'amplitude du flux rotorique ( $\theta_s$  et  $\phi_r$ ), car ces deux grandeurs ne sont pas facilement mesurables. Or, la connaissance de ces deux grandeurs est nécessaire pour contrôler le régime dynamique de la machine [47].

Suivant l'approche utilisée pour avoir une orientation de champ, deux principales méthodes de la commande vectorielle peuvent être distinguées, à savoir :

1. La méthode directe (en anglais : **Direct Field Oriented Control** ou **DFOC**),
2. La méthode indirecte (en anglais : **Indirect Field Oriented Control** ou **IFOC**),

Dans notre travail, nous nous intéressons à La méthode directe **DFOC**

### 2.2.7.1.4 Méthode directe de la commande vectorielle :

Dans la commande vectorielle directe, la connaissance du flux rotorique (module et argument) est requise pour assurer le découplage entre le couple et le flux. En effet, la position du flux rotorique  $\theta_s$  est calculée algébriquement à partir de l'information sur le flux rotorique (figure 2.22). Considérons le diagramme vectoriel suivant :

## Modélisation des organes du véhicule électrique hybride

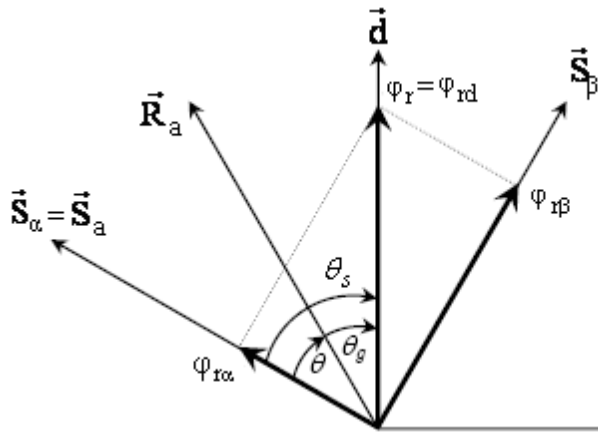


Figure 2.22 : Diagramme vectoriel pour la commande vectorielle directe.

Si les flux rotoriques sont connus (mesurés ou estimés), l'angle du vecteur du flux rotorique (généralement appelé position du rotor) est donné par :

$$\theta_s = \tan^{-1} \left( \frac{\Phi_{r\beta}}{\Phi_{r\alpha}} \right) \quad \dots \quad (2.73)$$

En effet, comme  $\sin\theta_s$  et  $\cos\theta_s$  sont nécessaires pour la transformation de Park, ceux-ci peuvent être trouvés directement par (voir figure (2.22)) :

$$\sin\theta_s = \frac{\Phi_{r\beta}}{\sqrt{\Phi_{r\alpha}^2 + \Phi_{r\beta}^2}} \quad \dots \quad (2.74)$$

$$\cos\theta_s = \frac{\Phi_{r\alpha}}{\sqrt{\Phi_{r\alpha}^2 + \Phi_{r\beta}^2}} \quad \dots \quad (2.75)$$

**Remarque :** Pour la machine asynchrone, le flux magnétisant peut être, soit mesuré directement à l'aide des capteurs basés sur l'effet Hall, soit estimé à partir des signaux de tension et de courant statoriques. Pour cette méthode, le flux rotorique se déduit à partir du flux magnétisant ou du flux statorique en utilisant les relations électromagnétiques de la machine.

## Modélisation des organes du véhicule électrique hybride

**a. Mesure du flux rotorique :** Première méthode de la commande vectorielle directe.

Afin de déterminer la position et l'amplitude du flux rotorique, l'idée de *Blaschke* est de mesurer le flux magnétisant  $\varphi_m$  dans la machine asynchrone à l'aide d'un bobinage supplémentaire ou d'un capteur à effet Hall précédemment placé sous les dents du stator, ce qui nécessitent une construction spéciale de la machine [48],[46]. Ensuite, calculer les flux rotoriques en utilisant les grandeurs ainsi mesurées. Ces dispositifs sont mécaniquement fragiles et ne peuvent pas travailler dans des conditions sévères comme les vibrations et les échauffements. L'inconvénient de cette méthode est qu'elle nécessite un capteur de flux spécial. Or, cette installation n'est pas possible pour les moteurs commerciaux. Ainsi, le moteur perd ses principaux avantages tel que la robustesse et la simplicité de construction [43], [47].

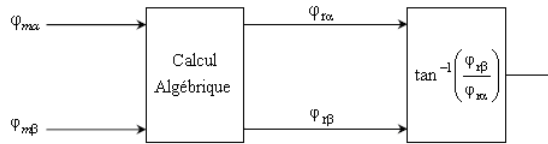


Figure 2.23 : Première méthode de la commande vectorielle directe (méthode de Blaschke).

**b. Estimation du flux rotorique :** Deuxième méthode de la commande vectorielle directe.

Vu les inconvénients liés à l'introduction des capteurs servants à mesurer le flux rotorique, Hasse a proposé une méthode se basant sur le modèle dynamique du flux qui nous permet l'estimation à partir des grandeurs facilement mesurables tel que les tensions, les courants et la vitesse de rotation [44]. Pour cette méthode, on intègre les tensions statoriques et les courants pour calculer le flux statorique. Ensuite, on calcule le flux rotorique à partir du flux statorique. Le problème de cette méthode est la sensibilité aux variations paramétriques (spécialement à la résistance statorique) et le problème d'intégration numérique à des vitesses très basses.

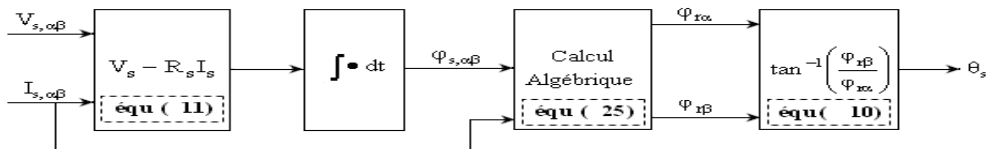


Figure 2.24 Deuxième méthode de la commande vectorielle directe (méthode de Hasse).

## Modélisation des organes du véhicule électrique hybride

### 2.2.7.2 Mise en œuvre de la commande vectorielle de la MAS :

#### 2.2.7.2.1 Mise en évidence du découplage entre les axes d-q :

Les tensions statoriques obtenues à partir du système (2.67) sont :

$$\begin{cases} V_{sd} = \sigma L_s \frac{d}{dt} I_{ds} + R_s I_{sd} - \omega_s \sigma L_s I_{sq} + \frac{L_m}{L_r} \left( \frac{d\phi_r}{dt} \right) \\ V_{sq} = \sigma L_s \frac{d}{dt} I_{sq} + \omega_s \sigma L_s I_{sd} + R_s I_{sq} + \frac{L_m}{L_r} \omega_s \phi_r \end{cases} \quad \dots \quad (2.76)$$

La commande en tension par orientation de flux consiste à commander le moteur par deux tensions  $V_{sd}$  et  $V_{sq}$  complètement découplées pour avoir des performances dynamiques similaires à celles des moteurs à courant continu [48]. Or, selon le système (2.76), bien que le flux soit constant, il y a un grand couplage<sup>1</sup> entre le courant  $I_{sq}$  et la tension  $V_{sd}$  d'une part et le courant  $I_{sd}$  et la tension  $V_{sq}$  d'autre part. On dit que les deux tensions  $V_{sd}$  et  $V_{sq}$  comportent des termes croisés.

## Modélisation des organes du véhicule électrique hybride

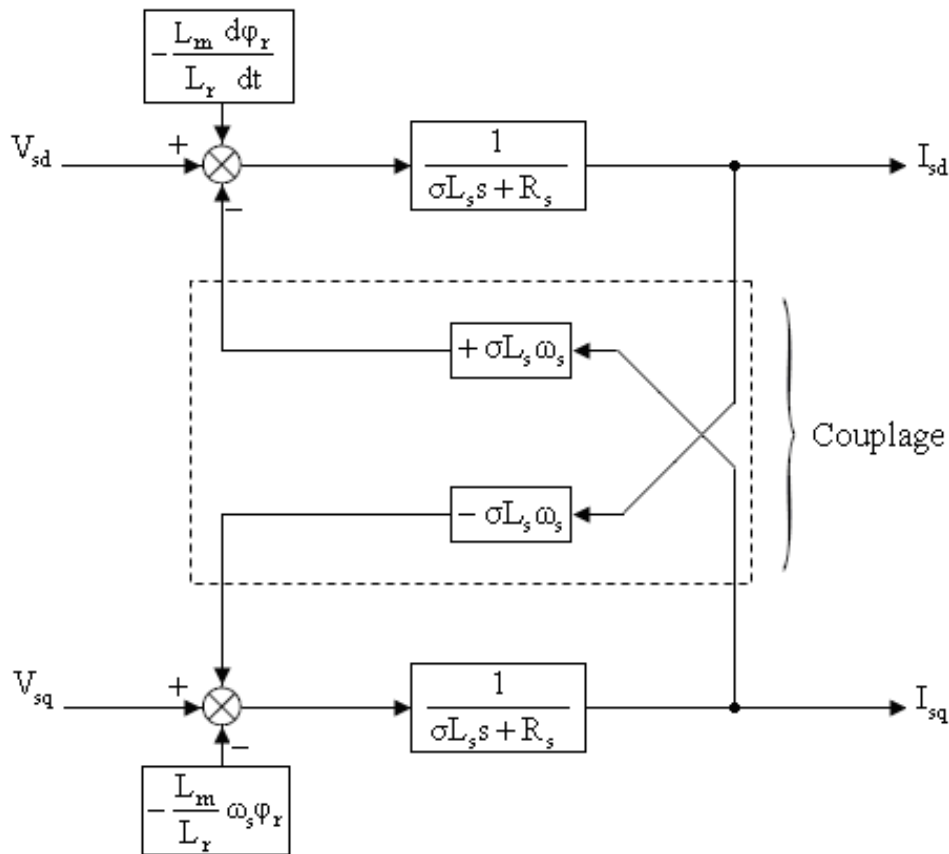


Figure 2.25 : Mise en évidence du couplage entre les axes (d) et (q).

### 2.2.7.2.2 Commande vectorielle avec découplage par compensation :

Afin d'éviter ce couplage entre les deux équations de (2.76), nous utilisons une méthode de compensation qui a pour but d'annuler les termes croisés et les termes non-linéaires. Cette méthode consiste à faire la régulation des courants en négligeant les termes de couplage. Ces derniers sont rajoutés à la sortie des correcteurs de courant pour obtenir les tensions de références nécessaires pour le réglage [47]. Les termes supplémentaires .

sont déterminés de sorte que les tensions restantes soient en relation du premier ordre avec les courants correspondants.

## Modélisation des organes du véhicule électrique hybride

Définissons deux nouvelles variables de commande  $V_{sd1}$  et  $V_{sq1}$ , tel que:

$$\begin{cases} \mathbf{V}_{sd} = \mathbf{V}_{sd1} + \mathbf{e}_{sd} \\ \mathbf{V}_{sq} = \mathbf{V}_{sq1} + \mathbf{e}_{sq} \end{cases} \dots \quad (2.77)$$

Avec :

$$\begin{cases} \mathbf{V}_{sd1} = \sigma \mathbf{L}_s \frac{d}{dt} \mathbf{I}_{ds} + \mathbf{R}_s \mathbf{I}_{ds} \\ \mathbf{V}_{sq1} = \sigma \mathbf{L}_s \frac{d}{dt} \mathbf{I}_{qs} + \mathbf{R}_s \mathbf{I}_{qs} \end{cases} \dots \quad (2.78)$$

et

$$\begin{cases} \mathbf{e}_{sd} = -\omega_s \sigma \mathbf{L}_s \mathbf{I}_{sq} + \frac{\mathbf{L}_m}{\mathbf{L}_r} \left( \frac{d\phi_r}{dt} \right) \\ \mathbf{e}_{sq} = +\omega_s \sigma \mathbf{L}_s \mathbf{I}_{sd} + \frac{\mathbf{L}_m}{\mathbf{L}_r} \omega_s \phi_r \end{cases} \dots \quad (2.79)$$

Nous pouvons alors représenter le schéma bloc de la figure (2.26) comme suit :

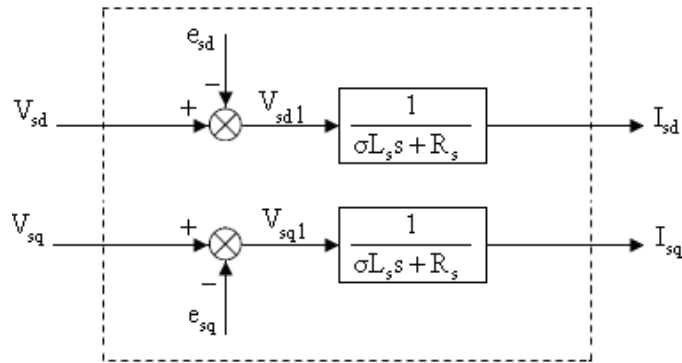


Figure 2.26 : Modèle réduit de la machine asynchrone.

Les termes  $e_{sd}$  et  $e_{sq}$  correspondent aux termes de couplage entre les axes (d) et (q). La solution proposée consiste à ajouter des tensions identiques mais de signes opposés à la sortie des correcteurs de courants de manière à séparer les boucles de régulation d'axes (d) et (q) comme le montre la figure (2.28).



## Modélisation des organes du véhicule électrique hybride

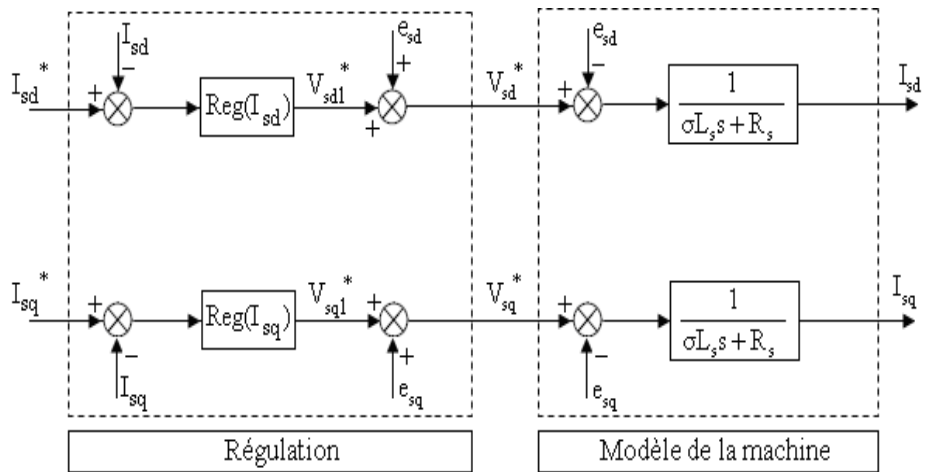


Figure 2.27 : Découplage par addition des termes de compensation.

Nous aboutissons alors aux schémas blocs simples et identiques pour les deux axes :

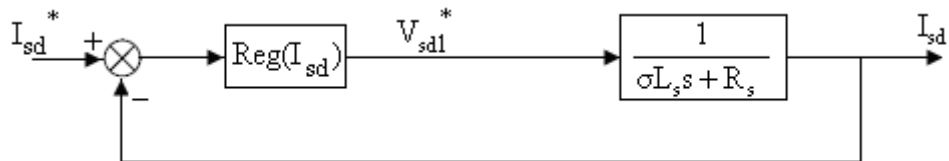


Figure 2.28: Boucle de régulation du courant  $I_{sd}$  après découplage.

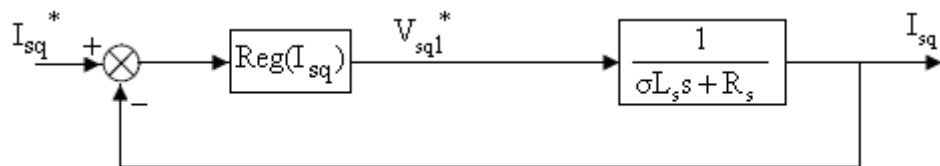


Figure 2.29 : Boucle de régulation du courant  $I_{sq}$  après découplage.

Les tensions  $V_{sd}$  et  $V_{sq}$  sont alors reconstituées à partir des tensions  $V_{sd1}$  et  $V_{sq1}$ . Nous obtenons ainsi le schéma bloc de la figure (2.31).

## Modélisation des organes du véhicule électrique hybride

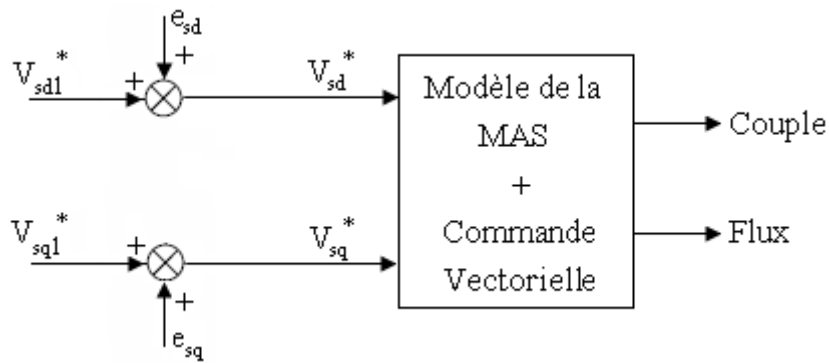


Figure 2.30 : Reconstitution des tensions  $V_{sd}$  et  $V_{sq}$ .

Ce découplage est basé sur l'introduction des termes de compensation  $e_{sd}$  et  $e_{sq}$ . On peut utiliser soit la consigne de flux  $\varphi_r^*$ , soit une estimation du flux réel  $\varphi_r$  pour le calcul des valeurs de  $e_{sd}$  et  $e_{sq}$ . L'influence de ces termes est d'autant plus importante que la fréquence d'échantillonnage est faible [41].

Donc, la grandeur essentielle à contrôler avec une grande dynamique est le couple électromagnétique en présence de la charge extérieure qui peut varier très brutalement. Cependant, il est aussi nécessaire de bien contrôler le flux rotorique pour éviter les surintensités des courants et d'obtenir un bon rendement de la machine.

Etant donné que le flux est défini par le courant  $I_{sd}$ , il suffit donc de contrôler ce courant pour maîtriser le flux. D'après la première équation du système (2.69), on peut tracer le schéma suivant :

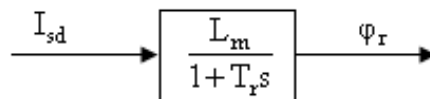


Figure 2.31 : Boucle ouverte de  $\varphi_r$ .

Ce schéma en boucle ouverte permet d'envisager la boucle de régulation suivante :

## Modélisation des organes du véhicule électrique hybride

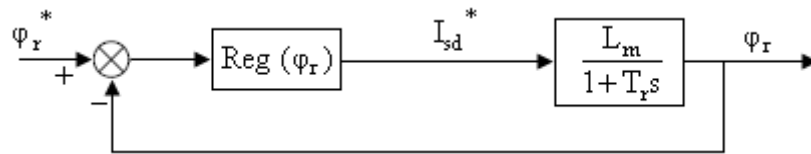


Figure 2.32 : Boucle de régulation de  $\varphi_r$ .

Tenant compte des deux schémas blocs de régulation des figures (2.32) et (2.33), il en résulte une régulation en cascade. Le schéma de la figure (2.34) représente le principe de réglage en cascade appliqué à la machine asynchrone pour réaliser la commande vectorielle.

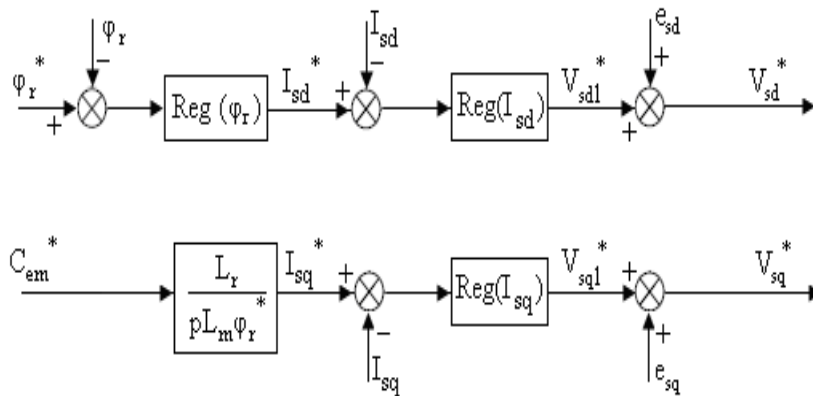


Figure 2.33 : Schéma bloc de la régulation en cascade.

**Remarque:** La conception du réglage en cascade du flux et du courant permet de créer une grandeur intermédiaire  $I_{sd}^*$  qui est accessible à la commande. Ainsi, la limitation de ce signal permet de protéger les semi-conducteurs de l'onduleur de tension. Ce type de régulation est tout à fait valable, puisque dans le cas d'une machine asynchrone classique,

il existe une différence importante entre les deux constantes de temps des fonctions de transfert du flux rotorique ( $\tau_\varphi = T_r$ ) et des courants statoriques ( $\tau_i = \sigma T_s = \sigma L_s / R_s$ ). Ce rapport,

## Modélisation des organes du véhicule électrique hybride

entre les deux constantes de temps, est de l'ordre  $1/\sigma$  [49]. De manière générale, il varie entre 10 et 20 :  $\tau_\phi = [10 \div 20] \tau_i$ . De ce fait, la dynamique de réglage des courants doit être très rapide par rapport au réglage du flux. De telle façon, nous pouvons considérer, pour le réglage du flux, que le courant dans l'axe (d) est égal à sa référence  $I_{sd} = I_{sd}^*$ .

Dans la commande conventionnelle, le flux rotorique  $\phi_r$  et le couple électromagnétique  $C_{em}$  sont contrôlés par des correcteurs de type PI [50]. En tenant compte de l'alimentation en tension de la MAS, les grandeurs de commande sont les tensions  $V_{sd}$  et  $V_{sq}$ , et la pulsation de glissement  $\omega_g$ .

Pour la partie onduleur, les tensions statoriques de référence ( $V_{as}^*, V_{bs}^*, V_{cs}^*$ ) sont calculées par la transformation inverse de Park à partir des grandeurs ( $V_{sd}^*, V_{sq}^*, \theta_s$ ). La pulsation  $\theta_s$ , nécessaire pour la transformation de Park, est calculée à l'aide de l'une des deux méthodes exposées dans la section (2.65). Ainsi, nous pouvons envisager les deux schémas de principe de régulation.

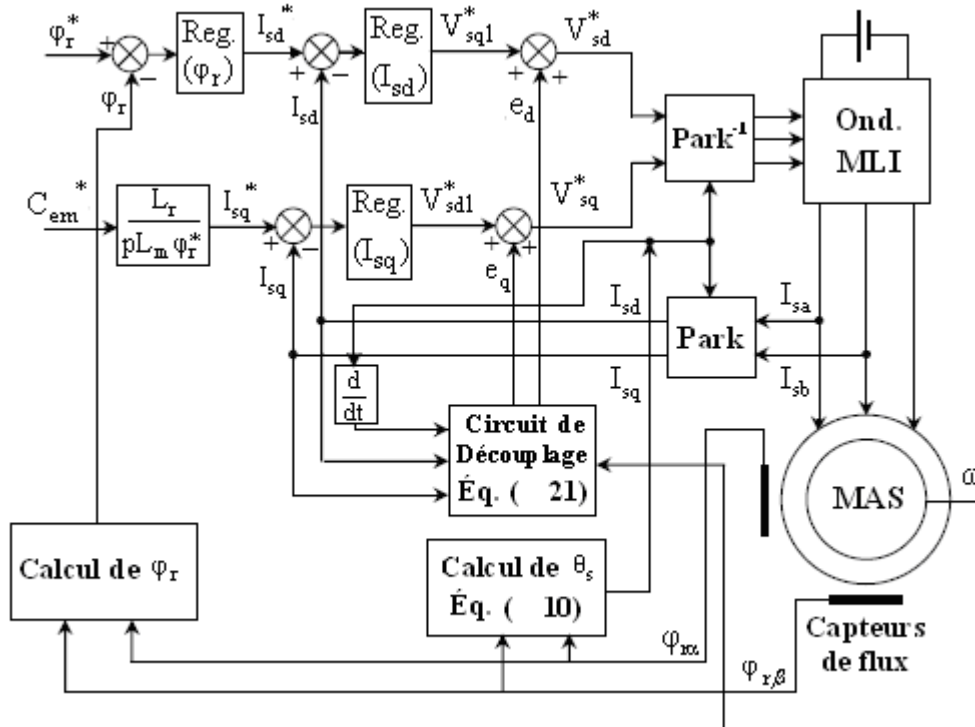


Figure 2.34 : Schéma bloc de la commande vectorielle directe.

## Modélisation des organes du véhicule électrique hybride

### 2.2.7.3 Régulation de vitesse de la machine asynchrone :

Il est bien connu que la régulation de vitesse des machines asynchrones avec des correcteurs PI ne permet pas d'obtenir de très bonnes performances lorsque la consigne de vitesse varie considérablement (dépassement important de la réponse de vitesse). En effet, lors d'une variation importante de la consigne de vitesse, le correcteur PI se trouve devant un écart important, ce qui provoque une forte action proportionnelle du correcteur qui se traduit par un dépassement de la vitesse du moteur.

Une des solutions qui peuvent être utilisées pour remédier ce problème consiste à adoucir la consigne de vitesse, c'est-à-dire, filtrer la vitesse de consigne par l'introduction d'un filtre de fonction de transfert de la forme :

$$\frac{\omega_f^*}{\omega^*} = \frac{1}{1 + sT_f} \quad (2.80)$$

#### 2.2.7.3 .1 Synthèse du correcteur PI (de vitesse) :

#### 2.2.7.4

D'après la troisième équation du système (5), nous avons :

$$\frac{\omega}{C_{em}} = \frac{K_m}{1 + T_m \cdot s} \quad (2.81)$$

Avec :

$$K_m = \frac{p}{f}, \quad T_m = \frac{J}{f}.$$

## Modélisation des organes du véhicule électrique hybride

D'où le schéma bloc de la boucle de régulation de la vitesse est illustré par la figure suivante :

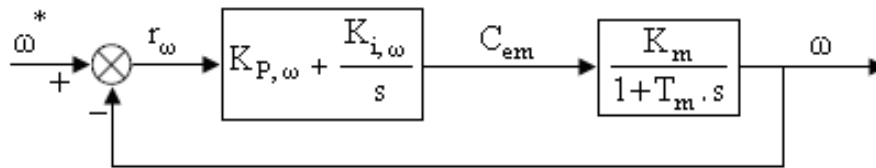


Figure 35 : Schéma bloc de régulation de la vitesse  $\omega$ .

La boucle la plus externe est la boucle de régulation de la vitesse (la grandeur ayant la dynamique la plus lente). Pour cette raison, les pôles imposés pour la boucle externe (boucle de vitesse) seront plus proches de l'origine du plan des racines par rapport aux pôles des boucles internes (boucles de flux et des courants).

La fonction de transfert en boucle fermée est donnée par :

$$\frac{\omega}{\omega^*} = \frac{K_m \cdot K_{P,\omega} \cdot s + K_m \cdot K_{i,\omega}}{s^2 + s \left( \frac{1 + K_m \cdot K_{P,\omega}}{T_m} \right) + \frac{K_m \cdot K_{i,\omega}}{T_m}} \quad (2.82)$$

Par imposition des pôles en boucle fermée, nous obtenons les paramètres du correcteur PI :

	$K_{P,\omega}$	$K_{i,\omega}$
Correcteur PI	$(2\xi\omega_0 T_m - 1) / K_m$	$\omega_0^2 T_m / K_m$

**Tableau :** Paramètres du correcteur PI de la vitesse.

## Modélisation des organes du véhicule électrique hybride

### 2.2.7.3.2 Limitation du courant $I_{sq}$ :

Il est bien connu que la commande vectorielle consiste à contrôler séparément le flux rotorique et le couple électromagnétique. Le contrôle du couple est assuré par l'intermédiaire de la régulation du courant  $I_{sq}$ , car le couple est proportionnel à ce courant. Donc, afin de protéger les semi-conducteurs<sup>2</sup> constituant l'onduleur, il faut atténuer tout dépassement possible du courant  $I_{sq}$ . La limitation du courant  $I_{sq}$  peut être directe ou indirecte. La limitation indirecte est réalisée en agissant sur les pôles imposés, mais cette méthode rend le système plus lent. La limitation directe repose sur un simple dispositif d'écrêtage défini comme suit :

$$I_{sq,l}^* = \begin{cases} I_{sq}^* & \text{si } |I_{sq}^*| \leq I_{sq,max} \\ I_{sq,max} \cdot \text{sign}(I_{sq}^*) & \text{si } |I_{sq}^*| \geq I_{sq,max} \end{cases} \quad (2.83)$$

**Remarque:** Cette limitation provoque un effet d'emballement de l'action intégrale (effet windup). Ainsi, l'état du correcteur doit être corrigé à l'aide d'un système d'anti-windup) afin d'éviter un dépassement de la commande dû au fait que le correcteur continu à sommer une erreur qui ne correspond pas à la commande nécessaire .

### 2.2.7.3.3 Technique de défluxage :

Plusieurs applications, plus particulièrement la traction électrique, exigent un fonctionnement en survitesse à puissance constante (exemple : TGV). Or, pour assurer un tel fonctionnement dans le cas d'un entraînement à vitesse variable utilisant une machine

## Modélisation des organes du véhicule électrique hybride

asynchrone, une tension élevée à l'entrée est requise. Pour contourner cette sur-demande en tension (en puissance), on réduit le flux résultant  $\varphi_r$  aux vitesses élevées (c'est le défluxage).

Donc, le principe de défluxage consiste à maintenir le flux rotorique constant et égal à sa valeur nominale ( $\varphi_{r,n}$ ) lors du fonctionnement à une vitesse inférieure à la vitesse de rotation nominale de la machine ( $N_n$ ), et on le faisant varier selon l'expression de l'équation (2.84), lorsque la vitesse dépasse sa valeur nominale afin de limiter la tension d'alimentation de la machine .

$$\varphi_r^* = \begin{cases} \varphi_{r,n} & \text{si } |N| \leq N_n \\ \frac{N_n}{N} \varphi_{r,n} & \text{si } |N| \geq N_n \end{cases} \quad (2.84)$$



## Modélisation des organes du véhicule électrique hybride

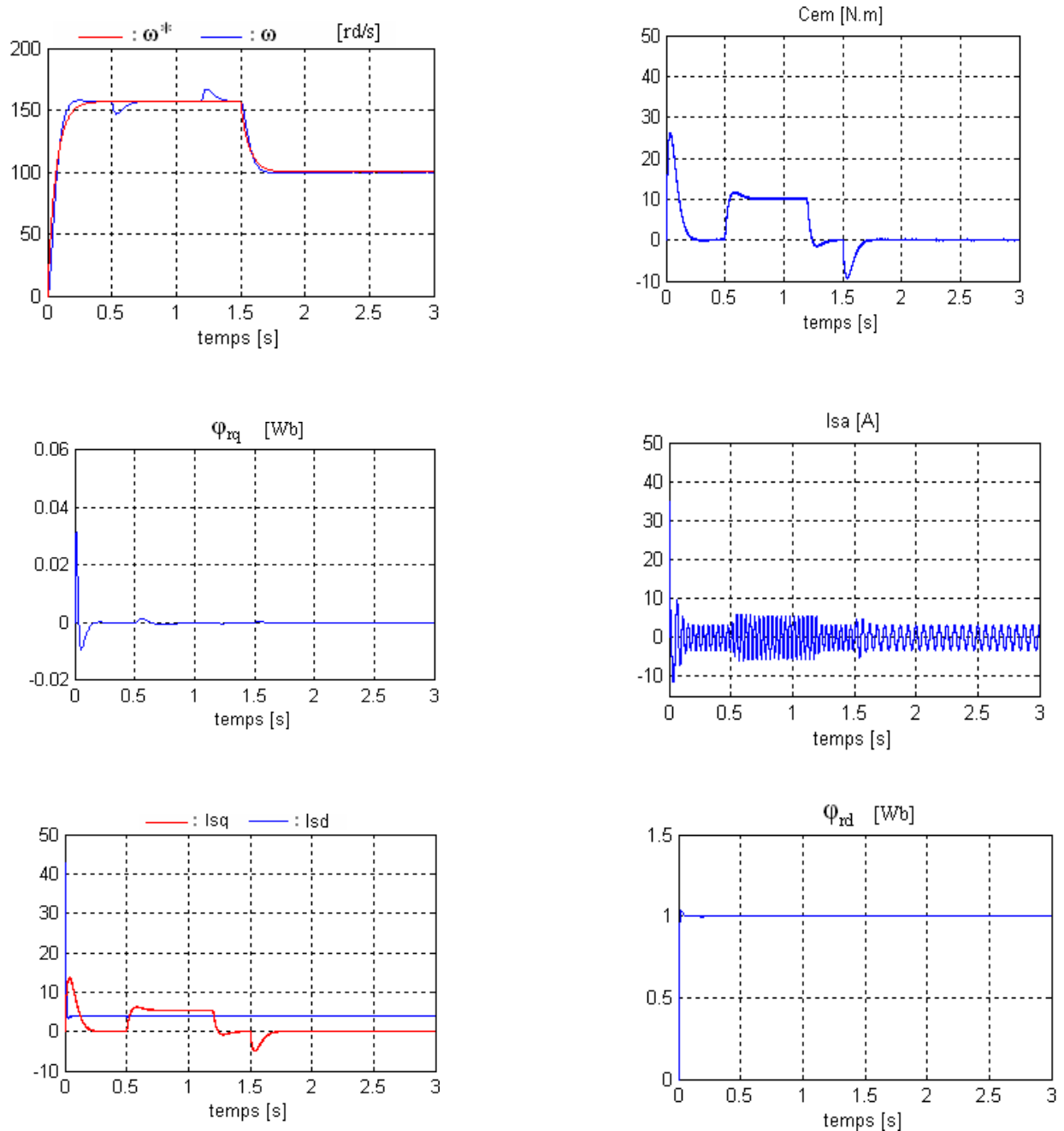


Figure 2.35 résultats des simulation des grandeurs  $\omega$ ,  $C_{em}$ ,  $\Phi_{rq}$ ,  $\Phi_{rd}$ ,  $I_{sa}$ ,  $I_{sq}$

Les figures précédentes montrent les résultats de simulation d'un réglage de vitesse. Le dépassement obtenu par le réglage précédent est atténué en utilisant un filtre pour la grandeur de consigne. D'après ces figures, nous constatons que la vitesse de rotation suit la vitesse de référence. En plus, le courant est maintenu à sa valeur admissible. Le découplage est parfaitement réalisé lors des régimes permanents, néanmoins de légères fluctuations sont

## Modélisation des organes du véhicule électrique hybride

remarquables pendant le démarrage. Le réglage présente aussi de performances satisfaisantes vis-à-vis de la perturbation du couple résistant.

### 2.2.8 Train planétaire

dans le cas d'un hybride architectures combinées on a trois sources d'énergie moteur thermique, moteur électrique et génératrice l'accouplement mécanique des ces trois sources cela implique l'utilisation d'un répartiteur de puissance pour pouvoir bénéficier pleinement du rendement de chaqu'une.

Le type de répartiteur de puissance utilisé est un train planétaire épicycloïdal Figure 2.35. Il permet d'avoir une addition de couples des trois organes sans imposer un rapport fixe entre les régimes. Le train planétaire épicycloïdal est composé d'un pignon planétaire associé à des pignons satellites (appelés ainsi car les satellites tournent autour du planétaire comme dans le système solaire). Le train planétaire reçoit, par la couronne à denture interne, la puissance du moteur électrique et par le porte-satellites celle du moteur thermique. Le pignon soleil étant solidaire de la génératrice.

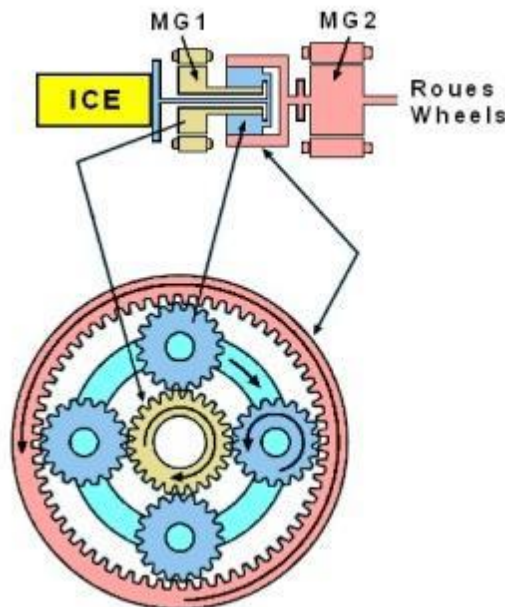


Figure 2.36 train planétaire

### 2.2.9 Convertisseurs électroniques continu-alternatif

Les convertisseurs continu-alternatif qui permet l'alimentation des moteurs alternatifs triphasés a partir de l'énergie fournie par la batterie.

## Modélisation des organes du véhicule électrique hybride

Il fait varier la fréquence qui détermine la vitesse de rotation ( $N = f/P$ ), et contrôle en permanence l'intensité qui définit le couple. Le convertisseur onduleur, en régulant couple et vitesse, maîtrise la puissance du moteur ( $P=C\omega$ ).

Lors des phases de récupération d'énergies cinétiques et potentielles, l'onduleur doit être réversible pour convertir et contrôler le courant alternatif produit par le moteur en courant continu, afin de le stocker dans la batterie haute tension.

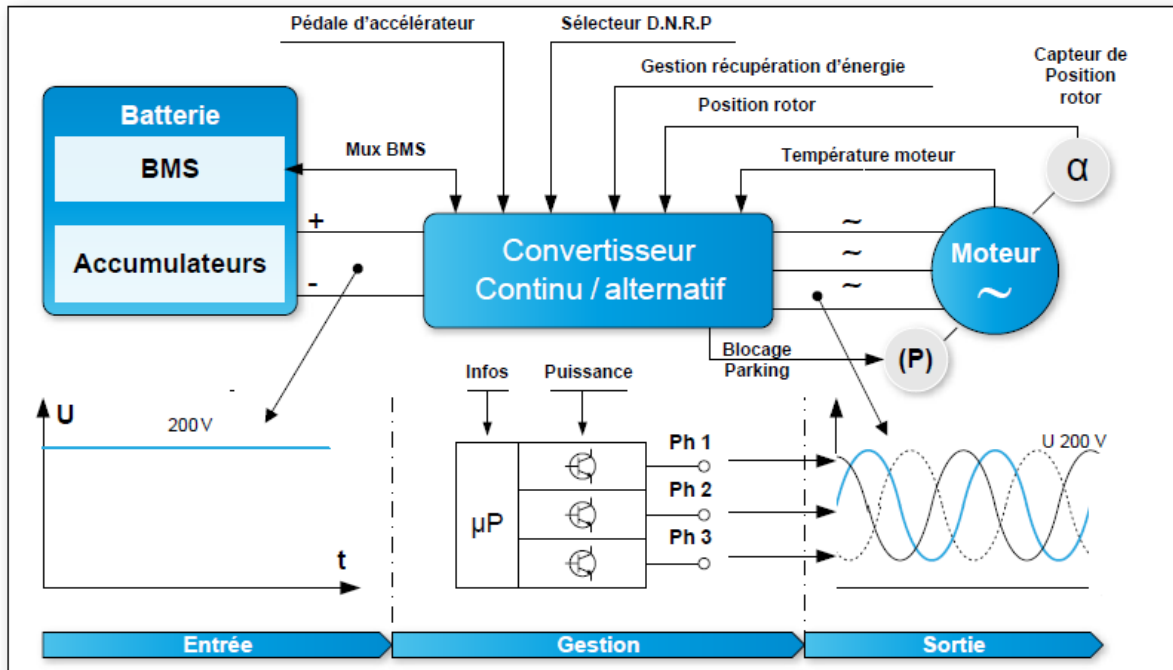


Figure 2.37 Principe de fonctionnement d'un convertisseur continu-alternatif

### 2.2.10 Contrôleur électronique

Le contrôleur électronique est le cerveau du véhicule hybride. Il sert à contrôler les moteurs électriques, le moteur à essence et sa génératrice. C'est lui qui détermine quand faire travailler le moteur électrique, le moteur à essence ou la génératrice d'après la position de l'accélérateur et l'état de certains capteurs.

Il y a deux types de contrôleurs électroniques : le contrôleur de type CC – courant continu (DC en anglais), similaire à celui que l'on retrouve dans les chariots élévateurs, et le contrôleur électronique de type CA – courant alternatif, (AC en anglais) qui est employé dans les usines qui utilisent des moteurs électriques.

## Modélisation des organes du véhicule électrique hybride

Dans le véhicule électrique hybride, le contrôleur CC prend l'énergie des batteries et va plus ou moins la distribuer au moteur électrique. Le contrôleur CA, quant à lui fait le même travail que le contrôleur CC mais il transforme cependant l'énergie CC en CA pour alimenter le moteur électrique.

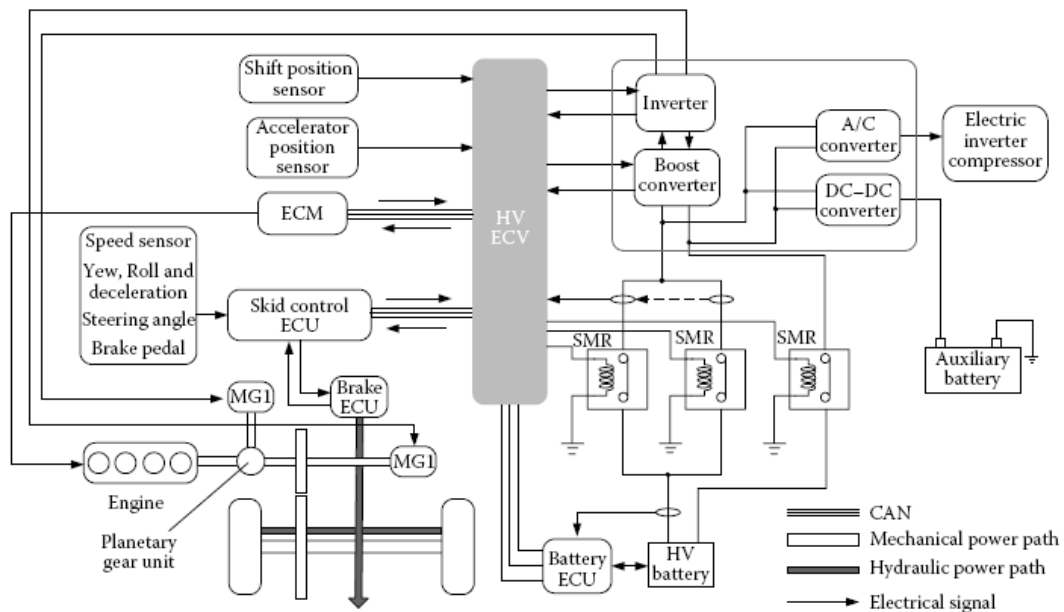


Figure 2.38: Vue d'ensemble du groupe motopropulseur Prius et des systèmes de contrôle.

### 2.2.10.1 Les éléments de base d'une « ECU » (Electronic Control Unit)

#### Alimentation (power supply)

Elle convertit la tension batterie (12V) en tension d'utilisation des circuits intégrés (5V, 3,3V). Elle assure également la protection contre les courts circuits.

#### Microcontrôleur (MCU)

C'est le cœur de l'ECU. Il intègre un microprocesseur, de la mémoire (RAM, Flash) et des modules de gestion des périphériques :

- Contrôleurs CAN, LIN ....
- Convertisseur analogique numérique
- Compteurs

#### Communication (LIN-CAN-FlexRay)

Les microcontrôleurs intègrent des modules de gestion de protocole mais des « trancivers » réalisent le couplage électrique.

# Modélisation des organes du véhicule électrique hybride

## **Entrées discrètes et analogiques**

Elles assurent la mise en forme des signaux provenant des différents capteurs pour être lus par le microcontrôleur.

## **Sorties discrètes et fréquentielles**

Pour commander les différents actionneurs (relais, moteurs, solénoïdes...).

# **CHAPRE 3- STRATÉGIE DE COMMANDE D'UN VÉHICULE HYBRIDE**

# Stratégie de commande d'un véhicule hybride

## 3.1 Introduction

La présence d'une seconde source d'énergie réversible dans un groupe motopropulseur hybride introduit des degrés de libertés supplémentaires dans la réalisation de la puissance demandée par le conducteur. Il est donc nécessaire de trouver une manière « efficace » de partager cette puissance entre les différentes sources. Effectivement une mauvaise gestion énergétique peut amener à des résultats « absurdes » : consommations analogues, voire supérieures de celles d'un véhicule conventionnel équivalent, à cause du surpoids qu'engendrent les batteries, les machines électriques, l'électronique de puissance associée, etc. Le problème de la gestion énergétique revient alors à trouver la meilleure répartition de la

puissance demandée par le conducteur entre les différentes sources d'énergie, de manière à minimiser un critère. Ce dernier peut-être basé sur la consommation de carburant, les émissions de polluants, la durée de vie de composants, le confort de conduite, etc. En raison de la difficulté de prise en compte quantitative de certains paramètres de nature subjective – confort de conduite – et de la complexité de certains modèles – vieillissement de la batterie – les critères considérés sont souvent la consommation énergétique du véhicule et/ou les émissions de polluant.

Les algorithmes permettant de résoudre ce problème d'optimisation sont appelés « lois de gestion d'énergie » ou encore « stratégie de commande ». A chaque instant, les stratégies de commande calculent donc les commandes de démarrages/arrêts du moteur thermique, les points de fonctionnement de chaque organe de traction ainsi que les alternances de phases de recharge/décharge de l'élément de stockage d'énergie. Le conducteur peut forcer certains modes de fonctionnement, par exemple la Toyota Prius II dispose d'un bouton « ZEV » (Zéro Emission véhicule) permettant de forcer le mode « tout électrique » en ville.

## 3.2 Principe de la commande d'un véhicule hybride

La commande d'un véhicule hybride connue sous le terme de superviseur ou UCVH (Unité de Contrôle de Véhicule Hybride) est en relation avec tous les organes de la chaîne de traction (batterie, moteur thermique, moteurs électriques,...). Elle nécessite la connaissance de l'état précis du véhicule : vitesse du véhicule, température des composants, état de charge de la batterie... et peut être décomposée en plusieurs niveaux comme le montre la Figure 3.1:

## Stratégie de commande d'un véhicule hybride

- l'interface entre le conducteur et le véhicule qui consiste à traduire la demande du conducteur (la position des pédales d'accélérateur et de frein) en terme de puissance demandée
- la gestion des flux d'énergie dans le véhicule hybride autrement dit l'application d'algorithmes (lois de gestion d'énergie) déterminant quand arrêter ou démarrer les moteurs et calculant ensuite la répartition de la demande entre les différentes sources
- la consigne des asservissements locaux des organes (couple du moteur thermique, des machines électriques, éventuellement rapport de la boîte de vitesse,...) garantissant à la fois la sécurité du véhicule et de ses occupants et la fiabilité de la chaîne de traction.

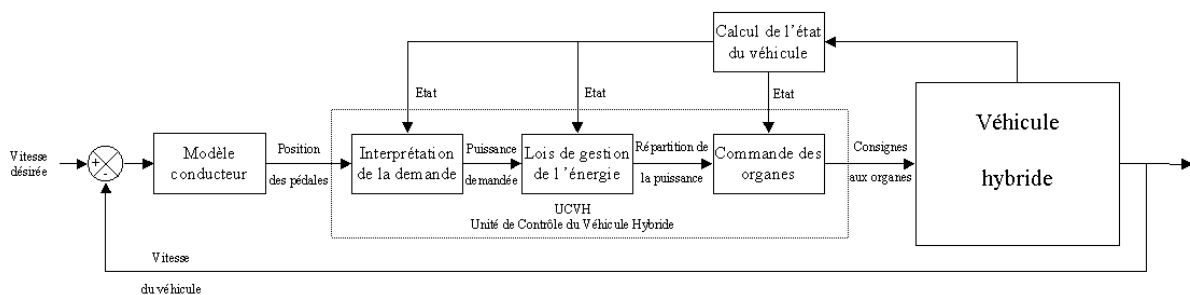


Figure 3.1 – Schéma général de la commande d'un véhicule électrique hybride.

Les lois de gestion d'énergie représentent la partie supervision de la commande. Il s'agit de déterminer la manière de produire, stocker et consommer l'énergie afin d'apporter satisfaction au conducteur tout en optimisant la consommation de carburant. Dans un véhicule thermique classique, la gestion de l'énergie n'offre que peu de possibilité d'optimisation. Il n'existe qu'une source d'énergie principale, l'élément de stockage électrochimique étant de capacité très limitée. A une demande d'énergie donnée du moteur thermique, il est donc relativement facile de déterminer le point de fonctionnement de la chaîne de traction permettant d'obtenir cette énergie au moindre coût. Avec l'arrivée des véhicules hybrides disposant de plusieurs sources d'énergie et d'un ou plusieurs éléments de stockage temporaires conséquents, la gestion de l'énergie devient un problème beaucoup plus complexe.

### 3.3 Présentation générale des lois de gestion d'énergie.

La possibilité de disposer ou non d'une recharge en électricité extérieure au véhicule est un facteur fondamental dans la détermination des lois de gestion d'énergie [27]. En effet, en supposant une recharge de la batterie la nuit, les lois de gestion d'énergie vont chercher à



## Stratégie de commande d'un véhicule hybride

atteindre, à la fin de la journée, un niveau de décharge maximum pour utiliser de préférence la traction électrique. Au cours de la journée, il faut cependant maintenir un niveau suffisant d'état de charge pour garantir les performances du véhicule.

Dans le cas étudié ici, le véhicule ne dispose pas d'une possibilité de recharge extérieure de la batterie qui est donc rechargée uniquement à bord du véhicule. Dans ce cas, les lois de gestion d'énergie cherchent à maintenir l'état de charge de la batterie dans une fenêtre spécifique pour garantir dans tous les cas de figure les performances du véhicule. Cette capacité à maintenir l'état de charge de la batterie dépend de la différence entre la puissance moyenne demandée sur les cycles et la puissance de recharge du système à bord du véhicule, c'est-à-dire du dimensionnement effectué.

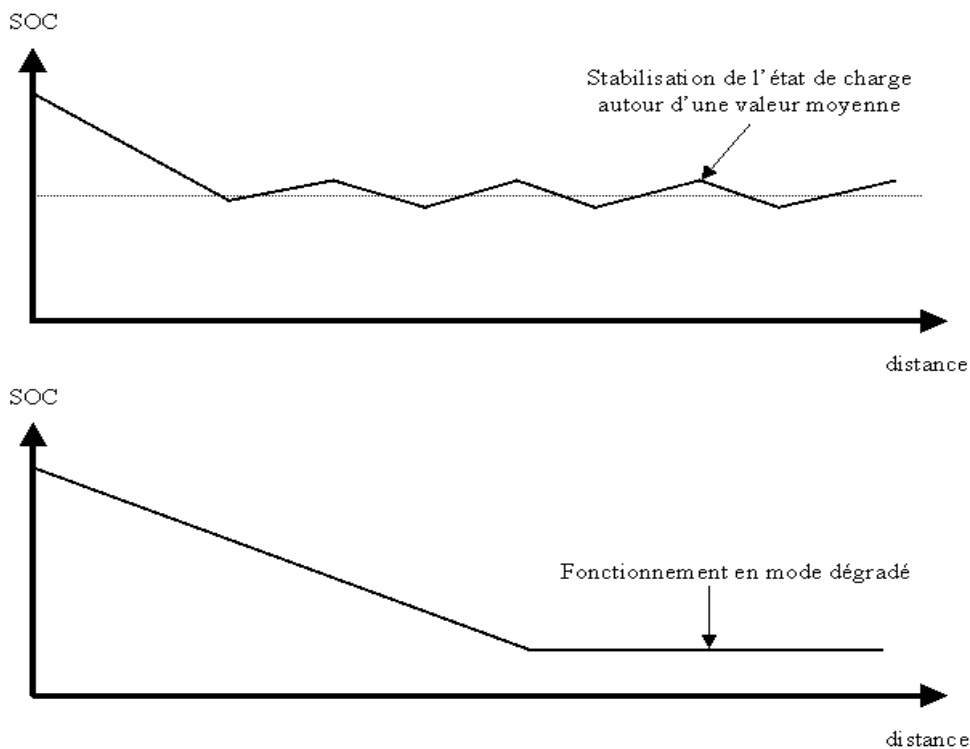


Figure 3.2 – Exemples de fonctionnement du véhicule avec maintien de l'état de charge SOC (haut) et décharge de la batterie (bas).

# Stratégie de commande d'un véhicule hybride

## 3.5 STRATEGIE DE COMMANDE

### 3.5.1 Principe

La stratégie de contrôle du véhicule permet de choisir quel mode de fonctionnement adopter, et définit la répartition de l'énergie entre les deux types de propulsion afin d'optimiser la consommation du véhicule et/ou réduire ses émissions polluantes. Plusieurs paramètres interviennent sur le choix du mode de fonctionnement.

- \_ La commande du conducteur. Celle-ci définit la puissance devant être transmise aux roues.
- \_ Les puissances maximales pouvant être fournies par chacune des deux propulsions. Elles dépendent du dimensionnement de chacun des éléments de la propulsion hybride.
- \_ Les cartographies de rendement du moteur thermique et (éventuellement) du moteur électrique et de la batterie. Le but du véhicule hybride est de fonctionner avec le meilleur rendement possible. Ces cartographies sont utilisées dans le choix de la répartition de l'énergie entre le MCI et le moteur électrique.
- \_ L'état de charge (SOC) de la batterie. On fixe généralement une valeur maximale de la batterie à ne pas dépasser afin d'éviter une surcharge néfaste en termes de rendement et de durée de vie. De la même manière, on définit une valeur minimale sous laquelle ne pas descendre pour empêcher la sous-charge de la batterie.

La répartition d'énergie entre les deux propulsions doit respecter l'équation (simple) suivante:

$$P_{totale} = P_{MCI} + P_{ME} \quad (3.1)$$

$P_{MCI}$  et  $P_{ME}$  étant respectivement les puissances fournies par le moteur à combustion interne et par le moteur électrique. La vitesse de rotation de chacune des propulsions est dépendante de la vitesse du véhicule ainsi que du rapport de réduction entre chaque moteur et les roues du véhicule

$$\omega_{MCI} = K_1 \cdot \omega_{vehicule} \quad (3.2)$$

$$\omega_{ME,décharge} = K_2 \cdot \omega_{vehicule} \quad (3.3)$$

$$\omega_{ME,décharge} = K_3 \cdot \omega_{MCI} = \frac{K_2}{K_1} \cdot \omega_{MCI} \quad (3.4)$$

$K_1$  et  $K_2$  sont les rapports de réduction respectifs entre les roues et chacun des moteurs.  $K_3$  est le rapport de réduction entre le MCI et le moteur électrique lorsque ce dernier est utilisé en alternateur pour recharger les batteries. Ces rapports de réduction dépendent du type de transmission employé et peuvent donc être interdépendants.

## Stratégie de commande d'un véhicule hybride

Les couples fournis par chacun des moteurs sont alors calculés afin de respecter ces équations.

$$P_{totale} = \tau_{MCI} \cdot \omega_{MCI} + \tau_{ME} \cdot \omega_{ME}$$

$$\tau_{total} = \tau_{MCI} \cdot K_1 + \tau_{ME} \cdot K_2$$

### 3.5.2 Paramètres d'entrées et variables de sortie

Les chapitres précédents présentent les différents modes de fonctionnement ainsi que les conditions d'utilisation de chaque propulsion que doit respecter la stratégie de contrôle d'un véhicule hybride. On propose dans cette partie de récapituler les paramètres d'entrée de la stratégie de contrôle ainsi que les variables de commandes qui sont ensuite transmises aux différents éléments de la propulsion hybride.

*Paramètres d'entrée :*

- \_ Vitesse du véhicule,
- \_ Commande du conducteur (couple demandé, rapport de boîte de vitesse enclenché),
- \_ SOC de la batterie,
- \_ État dynamique (couple, vitesse) précédent de chacun des moteurs,
- \_ Cartographie de rendement de la batterie (ou définition d'une plage de SOC dans laquelle la batterie est utilisée),

*Variables de sortie :*

- \_ Commande de démarrage ou d'arrêt du MCI,
- \_ Couple du MCI,
- \_ Couple du moteur électrique,
- \_ Commande de récupération d'énergie au freinage,
- \_ Rapports de réductions entre les différentes parties de la transmission (éventuellement → Dans ce cas là les vitesses de rotations de chaque élément sont des variables de sortie).

Ainsi, l'optimisation d'une chaîne de propulsion hybride est un problème complexe. Plusieurs méthodes d'optimisation ont donc été développées afin de le résoudre.

### 3.5.3 Objectif de la stratégie de commande

La stratégie de contrôle d'un véhicule hybride a pour but « d'optimiser » son fonctionnement. Cette notion assez vague peut être de plusieurs ordres : la réduction de la consommation et des émissions polluantes ou alors l'amélioration de la puissance du véhicule.

## Stratégie de commande d'un véhicule hybride

La réduction de la consommation du véhicule constitue généralement un des principaux objectifs. L'association d'une propulsion thermique avec une propulsion électrique permettant d'obtenir plus de liberté sur le point de fonctionnement du moteur à combustion interne, il est possible de faire fonctionner celui-ci au maximum dans ses zones de meilleur rendement.

Cependant, les zones de meilleure efficacité énergétique du moteur à combustion interne correspondent pas forcément aux zones limitant le plus les émissions polluantes. Ainsi l'optimisation de la consommation du véhicule n'implique pas forcément une optimisation des émissions polluantes.

Enfin, des conditions de performances (puissance) et de confort de conduite (réactivité, son) peuvent aussi être exigées, et ont un impact non négligeable sur la stratégie de contrôle du véhicule (par exemple utiliser la propulsion électrique pour assister le moteur thermique et ainsi obtenir de meilleures accélérations). Ce type d'utilisation est d'ailleurs actuellement utilisée en compétition automobile.

Il est donc nécessaire de bien définir les objectifs de la stratégie de contrôle. En fonction de ceux-ci, des compromis doivent être réalisés afin d'obtenir les performances souhaitées pour le véhicule étudié.

### 3.6 Types de stratégies

Face à ce problème d'optimisation du contrôle du véhicule hybride, plusieurs types de stratégies ont été et sont encore actuellement développés. Celles-ci peuvent être regroupées en deux classes :

#### *Stratégies par règles fixes (rule-based) :*

Ce type de stratégie de contrôle est basé sur la fixation de règles prédéfinies à l'avance et implémentées dans le calculateur du véhicule hybride, qui vont permettre de définir le fonctionnement de chacune des parties de la propulsion en fonction des conditions de vitesse et d'accélération rencontrées par le véhicule, ainsi que des capacités des propulsions Thermique et électriques à fournir (ou récupérer) l'énergie nécessaire pour assurer le mouvement du véhicule. Le plus souvent, ces propulsions visent en particulier à optimiser le fonctionnement du moteur à combustion interne. Celui-ci est à la fois le principal producteur d'énergie dans le véhicule, ainsi que l'élément ayant non seulement le plus faible rendement global, ainsi que la plus forte variation de rendement en fonction de son fonctionnement

## **Stratégie de commande d'un véhicule hybride**

(rendement maximal autour de 40% et pouvant descendre jusqu'à quelques % lors de fonctionnement à faible puissance).

### ***Stratégies basé sur minimisation instantanée :***

Ce type de stratégies consiste à trouver le minimum d'une fonction de consommation énergétique totale du véhicule. La fonction de coût est définie à partir d'études expérimentales ou de simulations sur les performances de chacun des éléments du véhicule hybride (consommation du moteur thermique et du moteur électrique ainsi que les différentes pertes électriques et mécaniques pouvant se produire) en fonction des conditions de fonctionnement auquel ils sont soumis. La recherche du fonctionnement du véhicule hybride permettant de minimiser la fonction mathématique ainsi obtenue est faite grâce à l'application d'algorithmes d'optimisations souvent complexes dont certains sont présentés dans la suite de cette étude. Le plus souvent ces stratégies nécessitent la pré-connaissance du parcours effectué par le véhicule. Contrairement aux stratégies à règles fixes, un véhicule se trouvant par deux fois dans les mêmes conditions de route et d'état de charge des batteries (même énergie à fournir et même capacité à utiliser la propulsion électrique) ne fonctionne pas forcément de la même manière dans les deux cas.

### **3.6.1 Stratégie par règles fixes rule-based**

Ces stratégies ont été les premières à être développées du fait de leur relative simplicité de mise en œuvre. Des règles fixées à l'avance dans le calculateur du véhicule permettent à la stratégie de contrôle de définir le mode de fonctionnement du véhicule ainsi que de calculer la répartition énergétique entre les deux propulsions.

SOC est à la fois faible et optimum avec des degrés de vérité égaux à 0,5. L'utilisation d'algorithmes simples utilisant des boucles "Si" (exemple : si SOC=Optimum et Pcommande=Faible alors Pmci=Faible) permet de déterminer les variables de sortie.

#### **3.6.1.1 Stratégie de commande floue**

Issue de la logique des sous-ensembles flous due à Lotfi Zadeh (1965), la logique floue ou de l'anglais "Fuzzy Logic" est de nos jours un sujet attirant, parce que faisant trait à une question d'actualité qui est le traitement de l'incertain dans la connaissance. Il importe d'affirmer que presque toute la logique du raisonnement humain n'est pas la logique classique à deux valeurs de vérité, ou à deux tranches nettement séparables. Dans les mécanismes de notre pensée, les propositions enchaînées et implications sont vagues, imprécises et floues.

## Stratégie de commande d'un véhicule hybride

La logique floue offre un modèle mathématique très adéquat pour la résolution de problèmes où l'on fait appel à des expressions du langage naturel. Sa caractéristique fondamentale est l'utilisation des variables linguistiques au lieu des variables numériques dans des situations conditionnelles floues. Par ceci, elle se veut un pas vers un rapprochement entre la précision de la logique classique et la subtile imprécision du monde réel.

Il convient d'utiliser la logique floue lorsque des incertitudes entachent la connaissance dont nous disposons sur le système, lorsqu'une modélisation rigoureuse de celui-ci est difficile ou lorsqu'il est très complexe à appréhender et à commander.

Afin de permettre un traitement numérique, il est indispensable que les variables linguistiques soient soumises à une définition à l'aide des fonctions d'appartenance. La fonction d'appartenance prend des valeurs comprises entre 0 et 1 de manière graduelle : le caractère graduel des sous-ensembles flous correspond à l'idée que plus on se rapproche de la caractérisation typique d'une classe, plus l'appartenance à cette classe est forte.

**Exemple :** considérons le cas où la vitesse est une variable, les fonctions d'appartenance sont montrées sur la figure 3.3

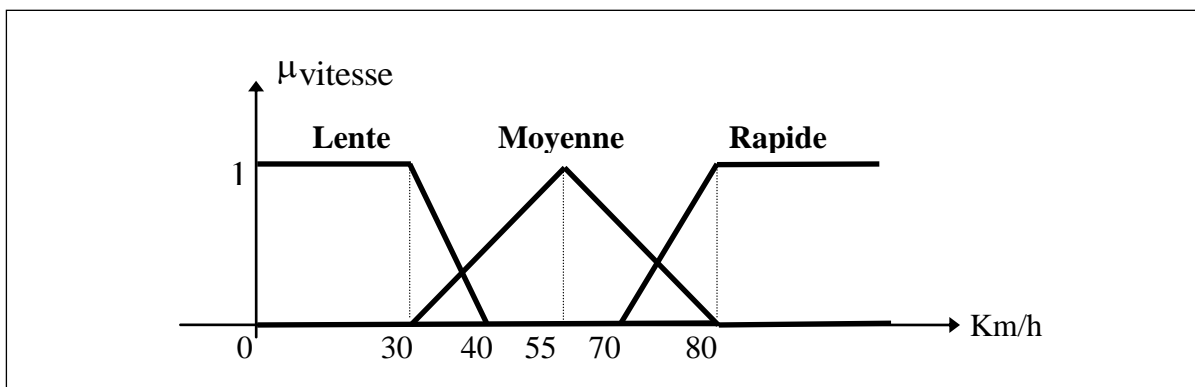


Figure 3.3 : exemple de fonctions d'appartenance.

## Stratégie de commande d'un véhicule hybride

### 3.6.1.2 Stratégie floue basée sur le rendement

Cette stratégie s'applique à une architecture double arbre avec une boîte de vitesses à 5 rapports. Le régulateur a trois entrées (la puissance demandée par le conducteur  $P_{roues}$ , le régime du moteur électrique  $\omega_e$  et l'état de charge de la batterie  $Soc$ ) et deux sorties (la puissance du moteur électrique  $P_{elec}$  et un facteur de pondération  $\alpha$ ). Le régulateur n'est actif que durant la phase de traction ( $P_{roues} \geq 0$ ) du véhicule, pendant les phases de freinage seul le moteur électrique est utilisé :  $P_{elec} = P_{roues}$ .

Le fonctionnement est basé sur une enveloppe de rendement admissible pour chacun des deux moteurs. Les deux situations « extrêmes » correspondent au cas où la puissance demandée  $P_{roue}$  est à l'intérieur de l'enveloppe admissible d'un des moteurs. Le mode adopté est alors *électrique pur* ou *thermique pur*. Un régulateur de type Sugeno permet alors de gérer le fonctionnement en mode *hybride*.

Une des particularités de cette stratégie est la gestion des rapports de boîte. La courbe de couple optimal étant connue et la puissance  $P_{th}$  obtenue par le régulateur, le régime  $\omega_{th}^*$  du moteur thermique est solution de :

$$C_{opti}(\omega_{th}^*(t)) \cdot \omega_{th}^*(t) = P_{th}(t) \quad (3.1)$$

Il s'agit du point d'intersection de la courbe de couple optimal et d'une courbe d'iso puissance  $P_{th}$  (courbes en pointillé figure 3.4).

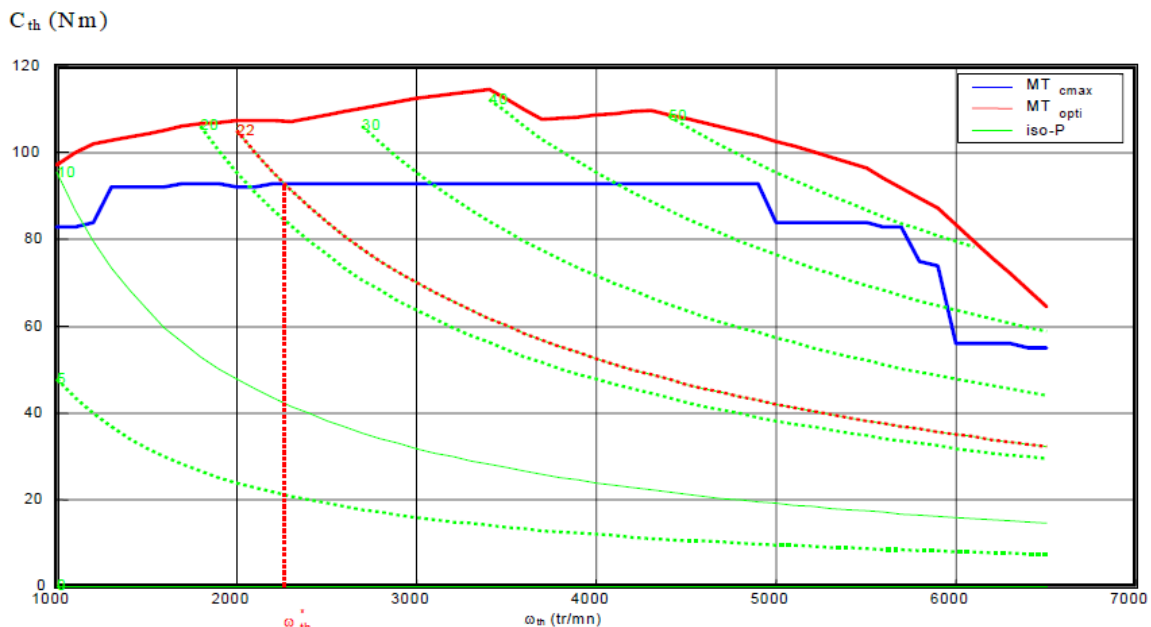


Figure 3.4 : Calcul du régime 'optimal' pour le moteur thermique

## Stratégie de commande d'un véhicule hybride

### 3.6.1.3 Fuzzy Torque Distribution Control

Cette stratégie s'applique aux architectures à addition de couple. Le couple demandé aux roues est décomposé en deux parties.  $C_r = C_{res} + C_{acc}$ .

$C_{res}$  : correspond au couple permettant de maintenir le véhicule à vitesse constante. Il est égal à la somme des différents couples de résistance à l'avancement du véhicule : aérodynamique, interaction pneus-route, résistance de montée en cote, etc

$C_{acc}$  : représente le couple nécessaire à l'accélération (ou décélération) du véhicule.

Le régulateur a trois entrées (couple moteur  $C_{acc}$ , régime du moteur thermique  $\omega_{th}$  et l'état de charge de la batterie  $x$ ) et une sortie (le couple du moteur thermique  $C_{th}$ ). L'expertise est basée sur la dynamique du véhicule, les auteurs proposent de distinguer les différents modes de propulsion du véhicule suivants :

- Démarrage :  $|C_{res}| = 0$  (couple résistant nul)  $C_{acc} > 0$  (couple moteur positif)
- Accélération :  $|C_{res}| > 0$ ,  $C_{acc} > 0$
- Roulage :  $|C_{res}| > 0$ ,  $C_{acc} \cong 0$
- Décélération :  $|C_{res}| > 0$ ,  $C_{acc} = 0$
- Arrêt du véhicule :  $|C_{res}| > 0$ ,  $C_{acc} = 0$

Pour chacun des cinq modes de propulsion possibles, des répartitions de puissance sont proposées. Par exemple, pendant les accélérations, la consigne de couple du moteur électrique est  $C_{acc}$ , celle du moteur thermique est  $C_{res}$ , ce qui permet de bénéficier de la dynamique rapide du moteur électrique asservi en couple. Ces répartitions sont dépendantes de l'état de charge de la batterie, par exemple, lors d'un roulage, en fonction de l'état de charge, le moteur électrique peut participer à la traction ou être utilisé pour recharger la batterie.

Trois bases de règles sont proposées au conducteur. Pour les deux premières, les accélérations et les fortes demandes de couple sont assurées principalement par le moteur électrique (respectivement thermique) tandis que le moteur thermique (respectivement électrique) délivre la puissance moyenne nécessaire à la propulsion du véhicule. La troisième base correspond à une pondération entre les deux bases précédentes.

Une autre façon de mettre en œuvre une stratégie de commande est de considérer la répartition de puissance, non pas comme une fonction de la dynamique du véhicule, mais comme une fonction du rendement des différents moteurs.



## Stratégie de commande d'un véhicule hybride

### 3.5.2 Stratégie par fonction d'optimisation

Les stratégies par règles fixées (rule-based) permettent d'optimiser individuellement les performances de chaque composant. Cependant, ces objectifs traités séparément ne permettent pas d'obtenir la meilleure amélioration des performances d'un véhicule hybride dans son ensemble. Les stratégies par fonction d'optimisation proposent de trouver une solution à l'ensemble des problèmes posés, en une seule fois. Elles peuvent aussi permettre l'optimisation non seulement de la consommation du véhicule, mais aussi d'autres variables telles que les émissions polluantes.

Contrairement aux stratégies précédentes pour lesquelles les conditions de route et le comportement du conducteur (conduite souple, agressive, ...) ne sont pas connues à l'avance, les stratégies par optimisation utilisent la connaissance que l'on peut avoir de ces deux éléments. Il paraît pourtant difficile d'appréhender ces informations pour l'ensemble des trajets et conducteurs auxquels est soumis un véhicule au cours de son exploitation. C'est pourquoi certaines stratégies trouvées dans la littérature sont généralement adaptées à un certain cycle de conduite, et leur efficacité peut parfois être jugée artificielle. Toutefois, les récents développements de systèmes de localisation tels que le GPS, ainsi que les données en temps réel sur les trafics routiers, laissent à penser que dans un avenir proche, la prédiction du parcours du véhicule (accélérations, vitesse) en temps réel pourra être transmise au système de contrôle.

Un système d'optimisation peut être comparé à une phase d'apprentissage suivie d'une phase d'adaptation de la stratégie de contrôle aux contraintes qui lui sont soumises et à la mission (cycle routier) que le véhicule devra effectuer. Tout d'abord une fonction de "coût" est définie, qui représente l'intégrale des consommations et émissions instantanées du véhicule. Ces données étant directement liées au fonctionnement du véhicule, des "variables de décision" (la répartition d'énergie, par exemple) vont intervenir dans cette équation de coût. On recherche ensuite à minimiser cette fonction avec des algorithmes d'optimisation (tels que les algorithmes génétiques) afin de trouver les variables de décision donnant les meilleures performances possibles en terme d'économies.

Les stratégies par optimisation ont été divisées en deux catégories:

D'une part on trouve les stratégies par optimisation globales, pour lesquelles la stratégie de contrôle est définie avant même le départ du véhicule : cela nécessite donc de connaître l'ensemble du parcours du véhicule, le comportement du conducteur, et les conditions de trafic à l'avance.

## Stratégie de commande d'un véhicule hybride

D'autre part, des stratégies par optimisation en temps réel ont été développées. Elles sont particulièrement intéressantes par le fait que leur capacité d'adaptation au temps présent leur donne un potentiel très important dans la réduction de la consommation et des émissions polluantes. Ces stratégies peuvent s'adapter au cours de la vie du véhicule, en analysant les divers voyages qui ont été faits et le comportement du conducteur dans le passé. Les futurs voyages sont alors potentiellement "déduits" de cet historique de données afin de créer la stratégie de contrôle du véhicule. De même, le comportement du conducteur pourra être analysé et identifié par le système de contrôle.

### 3.5.2.1 exemple de fonction par optimisation en temps réel

- Le Moteur Thermique emploie une stratégie d'épuisement de charge dans le sens où il s'allume seulement quand la voiture voyage au-dessus de 50 km/h. Sinon, la stratégie de commande devient celle avec maintien de charge,
- Si l'état de charge de la batterie est en-dessous de 50%, le Moteur Thermique est en marche de sorte que la batterie soit complétée à son niveau de seuil.
- En outre, si l'état de charge est au-dessus de 50%, le moteur électrique s'allume pour réduire cette valeur.
- La Toyota Prius est optimisée pour une basse consommation du carburant et des émissions extrêmement basses dans des scénarios de conduite dite « Autour de la ville ».

## 3.6 Conclusion

Plusieurs stratégies de commande utilisables en temps réel ont été présentées. Certaines d'entre elles utilisent des régulateurs flous qui permettent une mise en œuvre rapide, sans avoir à étudier de manière trop approfondie les échanges énergétiques. Il est bien évident que ces stratégies ne peuvent pas être générales, ni pour plusieurs architectures, ni pour plusieurs types de véhicules. Elles semblent plus correspondre à la résolution, parfois efficace, d'un cas particulier.

**CHAPITRE 4- SIMULATION  
ET STRATEGIES DE  
COMMANDE  
D'OPTIMISATION GLOBALE**

# Simulation et stratégie de commande d'optimisation globale

## Introduction

Le but de ce chapitre est de valider la stratégie par simulation. Elle va être appliquée à trois profils de mission c'est à dire trois cycles de vitesse afin d'illustrer les différents modes de fonctionnement :

- le moteur thermique seul fournit la totalité de la puissance demandée,
- le moteur électrique seul fournit la totalité de la puissance demandée,
- les deux moteurs fournissent simultanément la puissance demandée,
- le moteur à combustion interne prend en charge la recharge des batteries,
- recharger les batteries en profitant de la phase de freinage du véhicule.

Pour chacun des profil une comparaison des points de fonctionnement du moteur thermique par rapport à sa courbe optimale servira pour montrer l'amélioration du rendement thermique.

L'état de charge initial vaut 0.8 lors des trois simulations.

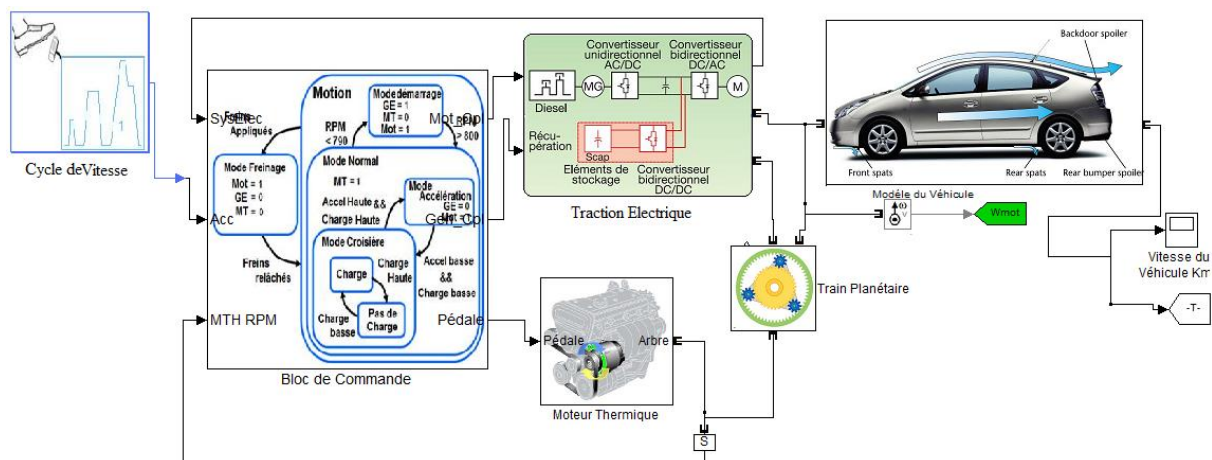


Figure 4.1 : Modèle dynamique du véhicule électrique

## 4.1 Architecture choisie

L'architecture choisie ici est un hybride *parallèle simple arbre à un embrayage*. Il s'agit d'une hybridation d'un groupe motopropulseur conventionnel par l'ajout d'une machine électrique connectée entre l'embrayage et la boîte de vitesse, figure 4.2.

## Simulation et stratégie de commande d'optimisation globale

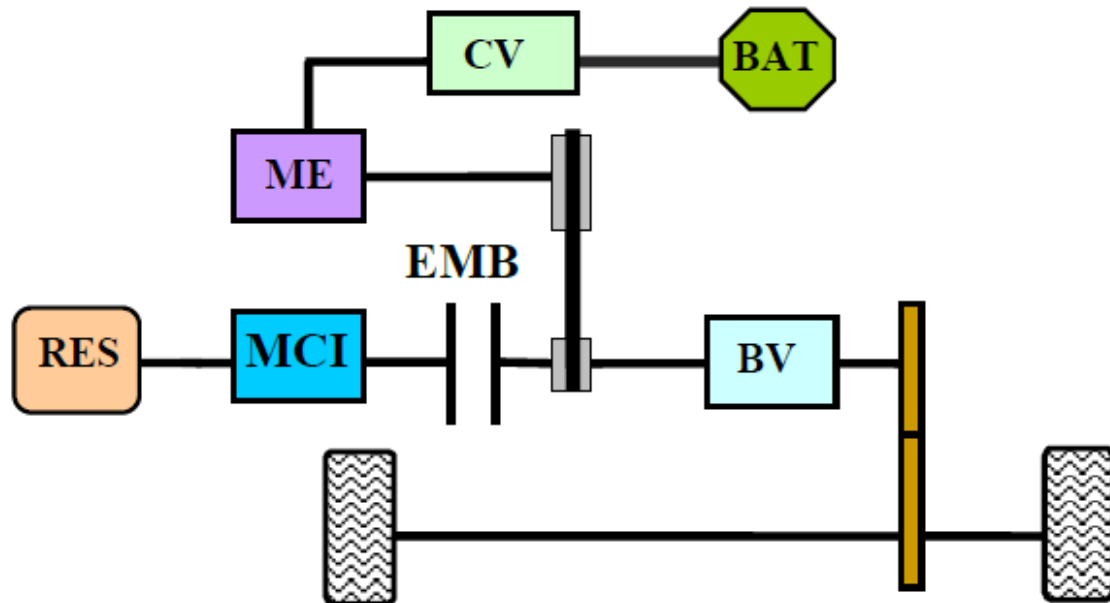


Figure 4.2 : Architecture hybride parallèle un embrayage

Même si l'architecture parallèle a été choisie ici, les lois de gestion d'énergie étudiées sont généralisables à d'autres types d'architectures.

### 4.2 Choix et dimensionnement des composants du groupe motopropulseur

#### 4.2.1 Le véhicule

Avant de passer au dimensionnement des différents composants, il faut d'abord préciser les paramètres du véhicule à utiliser qui possède les paramètres suivants :

- Masse : 1300 Kg
- Surface de projection frontale : 2.61 m<sup>2</sup>
- Coefficient de pénétration dans l'air : 0.32
- Coefficient de résistance au roulement : 0.0133
- Rayon de la roue : 0.32 m

#### 4.2.2 Le moteur thermique

Le critère dimensionnant pour le moteur thermique est le maintien de la vitesse de croisière demandée. En effet, le moteur électrique est réservé pour les phases de démarrage et vient assister le thermique lorsque la demande de puissance augmente, c'est à dire durant les phases d'accélération, en côte ou en vitesse de pointe.

La courbe de la figure 2 illustre la puissance nécessaire pour maintenir la vitesse stabilisée sur terrain plat sur la base des paramètres du véhicule choisi, avec le rendement de la transmission mécanique estimé à 0.95.

## Simulation et stratégie de commande d'optimisation globale

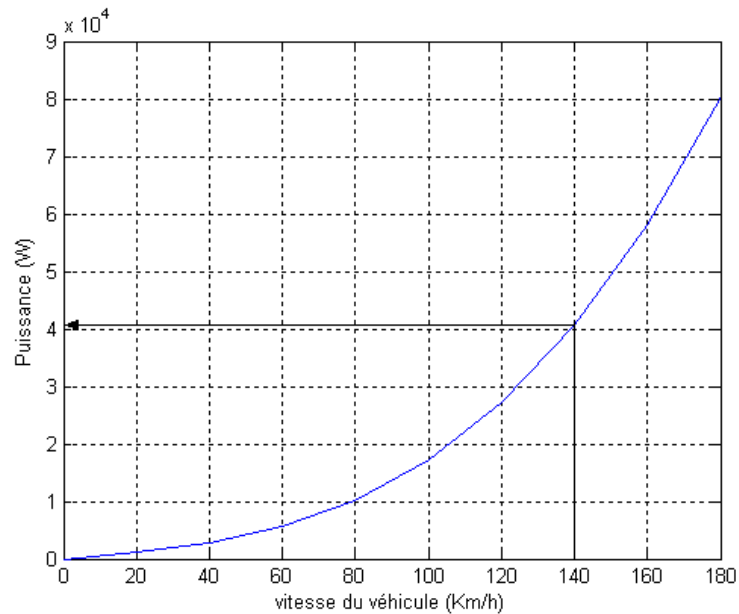


Figure 4.3 : Puissance nécessaire à vitesse stabilisée sur terrain plat

A une vitesse de 140 km/h stabilisée sur terrain plat, la puissance nécessaire est donc de l'ordre de 40 kW. Le choix s'est arrêté sur un moteur de 55 kW comme puissance maximale, son régime de rotation maximum est de 475 rd/s.

### 4.2.3 Le moteur électrique

La contrainte pour dimensionner le moteur électrique est l'accélération de 0 à 50 km/h en 8 secondes en mode tout électrique. La figure 3 illustre la puissance demandée pour répondre à cette contrainte.

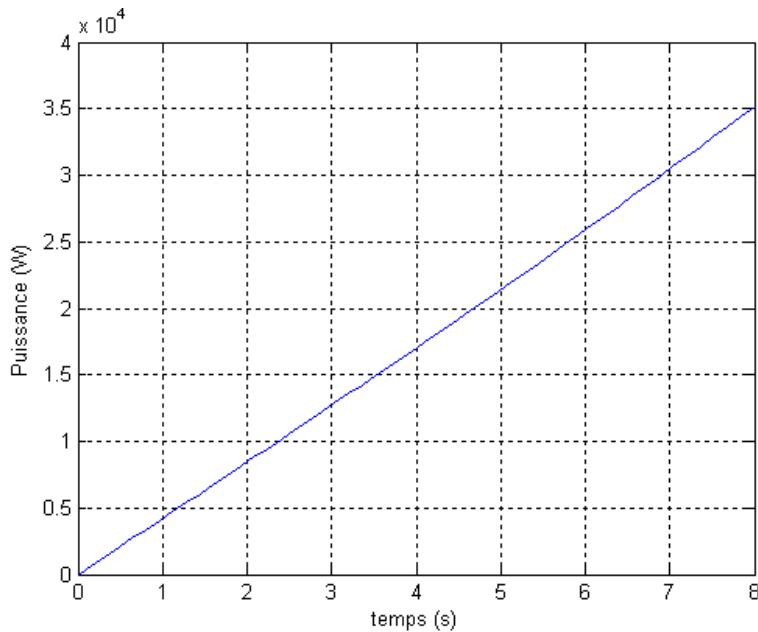


Figure 4.4 : Accélération de 0-50 km/h en tout électrique

## Simulation et stratégie de commande d'optimisation globale

La courbe montre que la puissance nécessaire est d'environ 35 kW. On a donc choisi le moteur asynchrone LS 225 ST - 37 kW – Leroy Somer dont les caractéristiques :

Puissance nominale	37 kW
Vitesse nominale	1475 tr/mn
Courant nominal	67 A
Facteur de puissance	0,86
Rendement	92,7%
Id/In	6,8
Cd/Cn	2,4
Moment d'inertie	0,23 kg,m <sup>2</sup>
Résistance statorique R <sub>s</sub>	85,1 mΩ
Résistance rotorique R <sub>r</sub>	65,8 mΩ
Inductance magnétisante L <sub>m</sub>	29,1mH
Inductance de fuite totale N	2,3 mH

En supposant les fuites rapportées au stator :

$M_{sr} = L_r = L_m = 29.1 \text{ mH}$  ;  $M_{sr}$  étant l'inductance mutuelle stator-rotor,  
 $L_r$  l'inductance propre rotor.

$N = L_s - L_r \Rightarrow L_s = N + L_r = 31.4 \text{ mH}$ .

Le nombre de paires de pôles  $p = 2$ .

### 4.2.4 La batterie

La batterie choisie est du type Nickel Métal Hydrure ou Ni-MH dont les spécifications principales pour une cellule sont :

Tension nominale : 7.2 V

Capacité nominale : 6.5Ah

Puissance spécifique : 1300w/kg

Energie spécifique : 46wh/kg

Masse : 1040g

## Simulation et stratégie de commande d'optimisation globale

Pour dimensionner la batterie, la contrainte suivante a été considérée : la batterie doit être capable de fournir les 37 kW du moteur asynchrone avec le plus faible état de charge communément admis qui est 0,7.

Comme nous avons intérêt à avoir une plus grande vitesse de base possible tout en gardant un poids acceptable, le choix donc :  $V_{bat}=365V$  avec  $I_{bat}=91A$ .

### 4.3 Simulation du véhicule hybride

Cette partie décrit l'environnement de simulation utilisé pour tester et analyser un algorithme de commande. Le contexte de simulation doit intégrer des modèles appropriés aux différents éléments constituant le groupe motopropulseur, à savoir le moteur thermique, la machine électrique, les batteries, la transmission, etc.

Avant d'aborder l'aspect modélisation, il est nécessaire de définir ce qu'on appelle *cycle de vitesse*.

#### 4.3.1 Notion du cycle de vitesse

Dans le cadre de l'étude de la gestion énergétique des véhicules, un cycle de vitesse exprime l'évolution de la vitesse du véhicule en fonction du temps. Il permet d'évaluer la consommation et/ou les émissions de polluants du véhicule dans des conditions de roulage (vitesse véhicule et couple roues) identiques. Il existe plusieurs profils vitesse/temps et ils peuvent être classés en deux catégories /Guzzella & Sciarretta. 2007/:

**Les cycles normalisés** : ils sont imposés par les normes permettant de mesurer la consommation « officielle » des véhicules et/ou leurs émissions de polluants. On cite par exemple le cycle FTP-75 (Federal Test Procedure) utilisé aux Etats-Unis, le cycle (10-15 Mode Cycle) utilisé au Japon, et le Cycle Européen Normalisé (CEN) appelé encore le cycle NEDC (New European driving cycle) utilisé en Europe. Figure 4.5. C'est ce dernier qu'on utilise dans le cadre de ce mémoire. Le cycle NEDC contient deux parties : une partie urbaine appelée ECE15 : il s'agit d'une répétition d'une même séquence quatre fois avec une vitesse moyenne de  $17km/h$ . Et une partie extra-urbaine appelée EUDC avec une vitesse maximale de  $120km/h$ . Le cycle NEDC ne reflète pas les conditions d'usage réel du véhicule, néanmoins, il sert d'outil pour faciliter l'analyse et l'interprétation des résultats des différentes stratégies de commande.



## Simulation et stratégie de commande d'optimisation globale

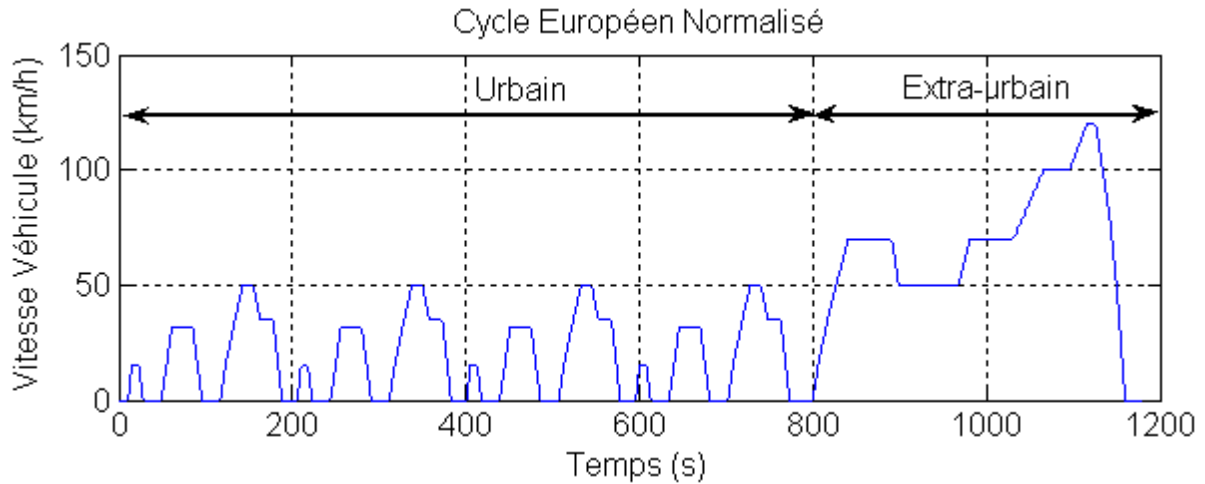


Figure 4.5 : Cycle de vitesse Européen Normalisé (NEDC)

**Les cycles issus des mesures dans des conditions d'usage réel** : ils sont issus d'études statistiques ayant pour objet de caractériser des usages types, à l'image des cycles *Hyzem* et *Artemis* /André. 1997/, /André. 2002/ réalisés par l'INRETS dans le cadre de projets Européens. Ces derniers couvrent les trois principales conditions de roulage : urbaine, routière et autoroutière. Ils permettent une évaluation plus réaliste des résultats issus des stratégies de commandes. La figure 4.6 illustre un exemple des trois cycles *Hyzem*.

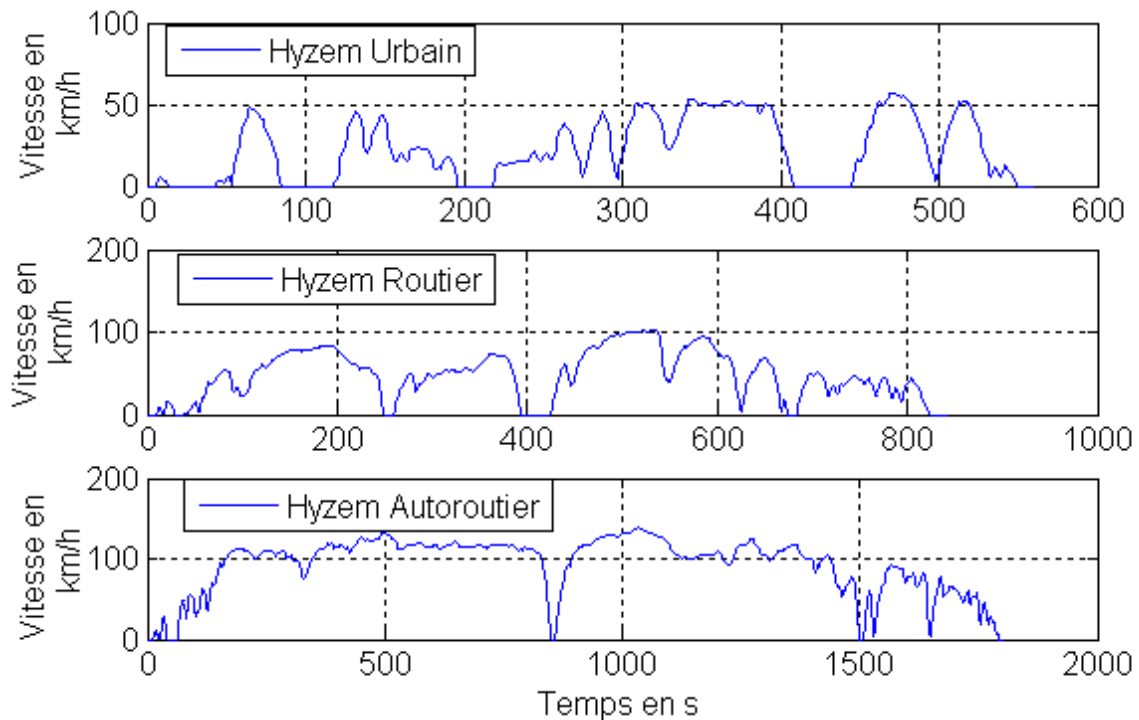


Figure 4.6 : Cycle Hyzem Urbain, cycle Hyzem Routier, cycle Hyzem Autoroutier

## Simulation et stratégie de commande d'optimisation globale

### Le cycle de conduite utilisé :

- On choisit la première période dans la zone urbaine c'est le début du cycle NEDC pour la simulation c'est le cas de fonctionnement du moteur électrique seul ou la vitesse ne dépasse pas 50 km/h .
- On choisit la deuxième période tout jour dans la zone urbaine cas de fonctionnement du moteur électrique seul ou la vitesse ne dépasse pas 50 km/h
- On choisit la troisième période dans la zone extra-urbaine c'est la dernière partie du cycle NEDC pour la simulation c'est le cas de fonctionnement hybride (entre 800 et 1150 s) .

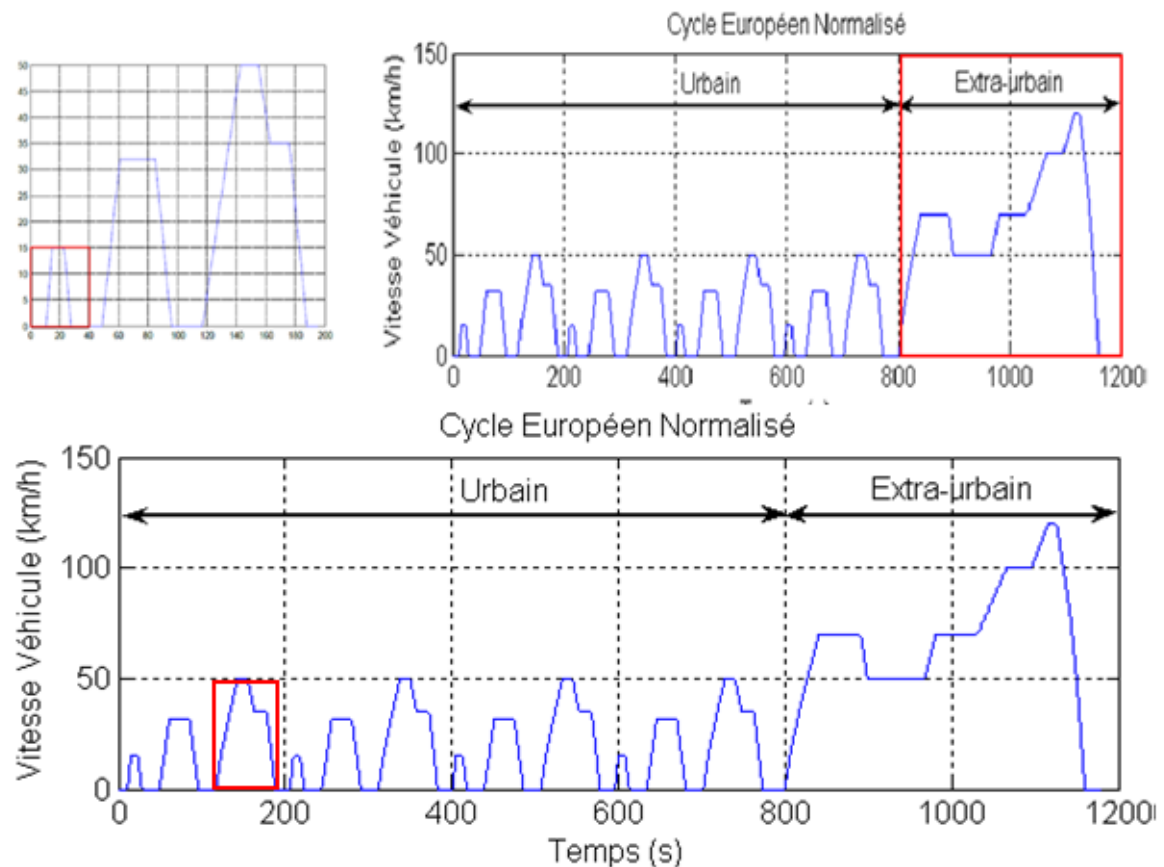


Figure 4.7 : les périodes des conduites utilisées

### 4.3.2 hypothèses

La simulation est établie sous les hypothèses suivantes :

- On choisissant le cycle NEDC pour faciliter l'interprétation des résultats ;
- On supposant la puissance consommée par les accessoires électriques à zéro ;

## Simulation et stratégie de commande d'optimisation globale

- On considérant l'état de charge initial de la batterie  $SOC(0) = 100\%$ ;
- La consigne de vitesse est délivrée par le conducteur via la pédale d'accélération

### 4.3.3 Illustration des différents modes de fonctionnement

#### 4.3.3.1 Le mode tout électrique

##### 4.3.3.1.1 Première période dans la zone urbain

La propulsion est assurée par le moteur électrique et durant lequel le moteur thermique est arrêté

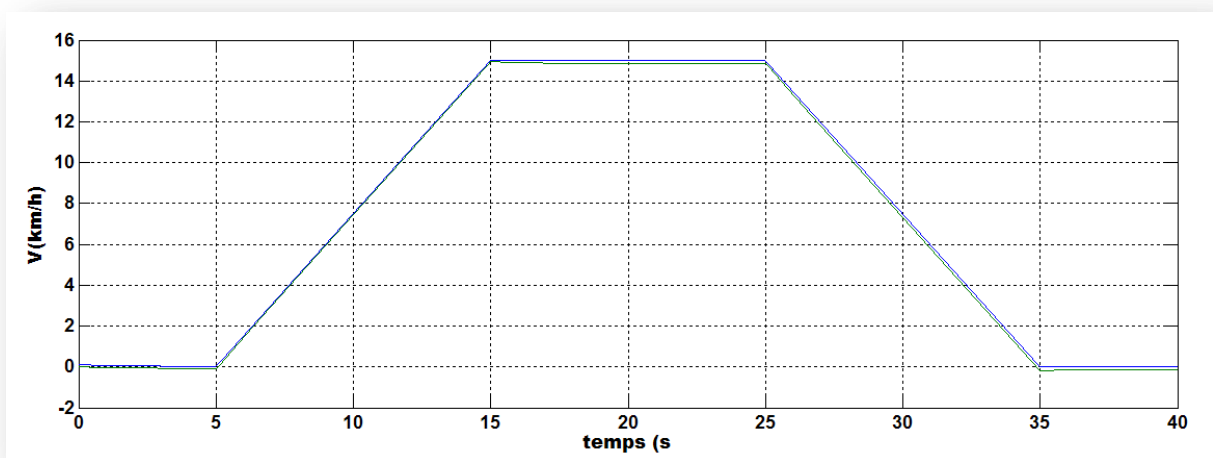


Figure 4.8 : Comparaison entre vitesse de référence et vitesse réelle.

La figure 4.8 montre le profil de vitesse demandée ainsi que la réponse du système dans ce mode la propulsion est assuré par le moteur électrique la vitesse ne dépasse pas 50km/h ainsi le véhicule il est dans une zone urbaine.

## Simulation et stratégie de commande d'optimisation globale

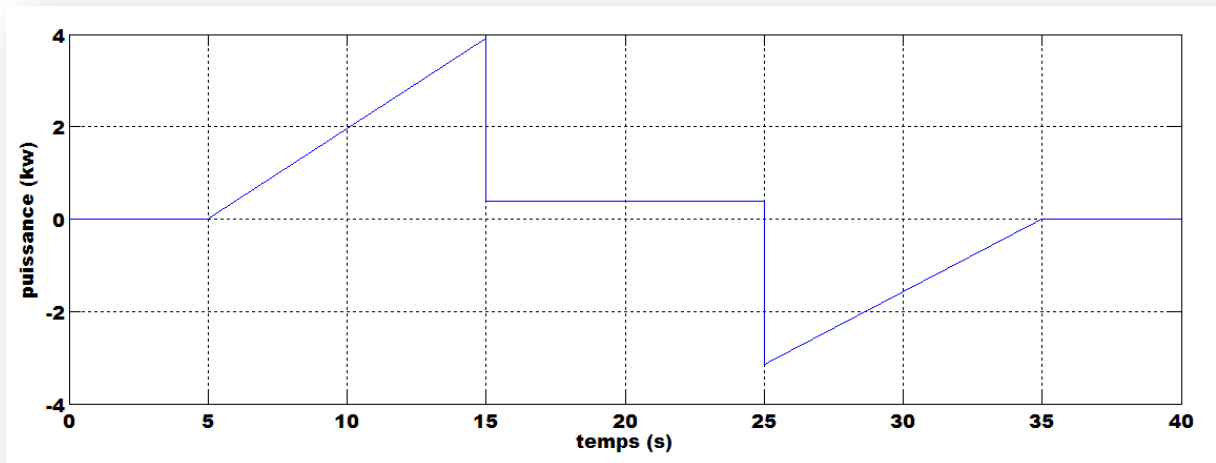


Figure 4.9 : La puissance demandée pour première période

La figure 4.9 montre que la puissance demandée n'a pas dépassé les 4 kW. Ainsi durant tout le cycle, seule la machine électrique est utilisée..

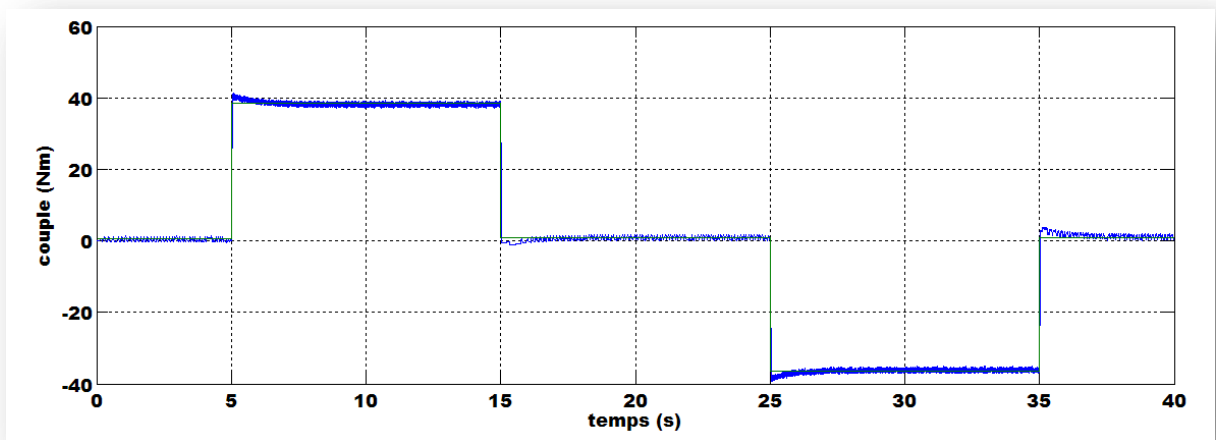


Figure 4.10 : Comparaison entre couple réel et couple de référence

La figure 4.10 montre le couple de référence ainsi que la réponse en couple du moteur électrique. Au début, durant la phase de démarrage, la machine est en mode moteur, puis vient la phase de freinage pour s'arrêter qui correspond à un fonctionnement en générateur.

## Simulation et stratégie de commande d'optimisation globale

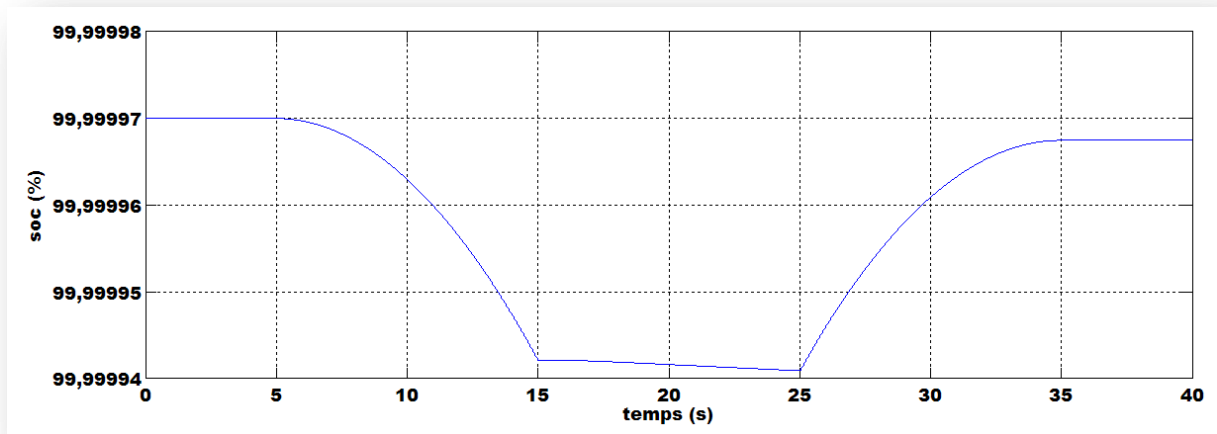


Figure 4.11 : La variation de l'état de charge de la batterie.

La figure 4.11 montre que La batterie passe par les deux états :

- Décharge pendant le fonctionnement moteur correspondant à une diminution du soc.
- Recharge pendant le fonctionnement générateur correspondant à une augmentation du soc

### 4.3.3.1.2 Deuxième période de zone urbain

La propulsion est tout jour assurée par le moteur électrique et durant lequel le moteur thermique est arrêté.

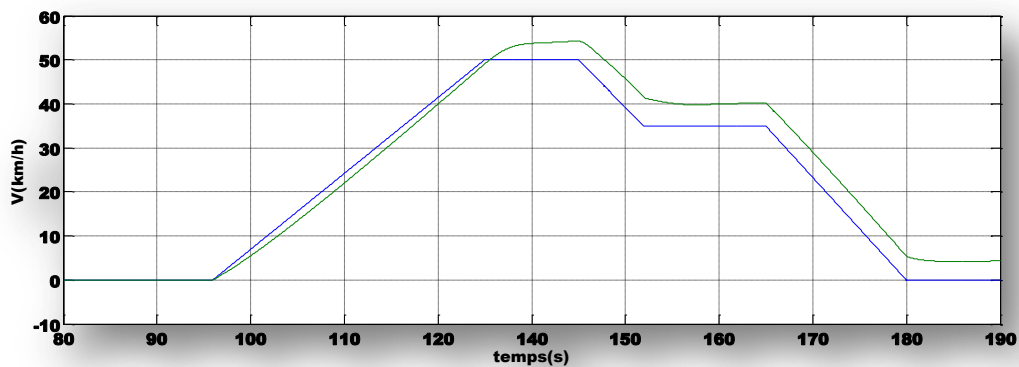


Figure 4.12 : Comparaison entre vitesse de référence et vitesse réelle(deuxième période).

## Simulation et stratégie de commande d'optimisation globale

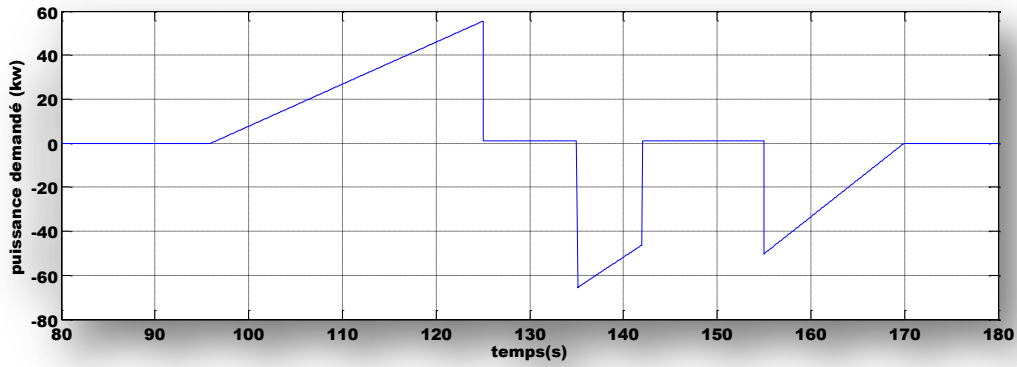


Figure 4.13 : La puissance demandée pour la deuxième période

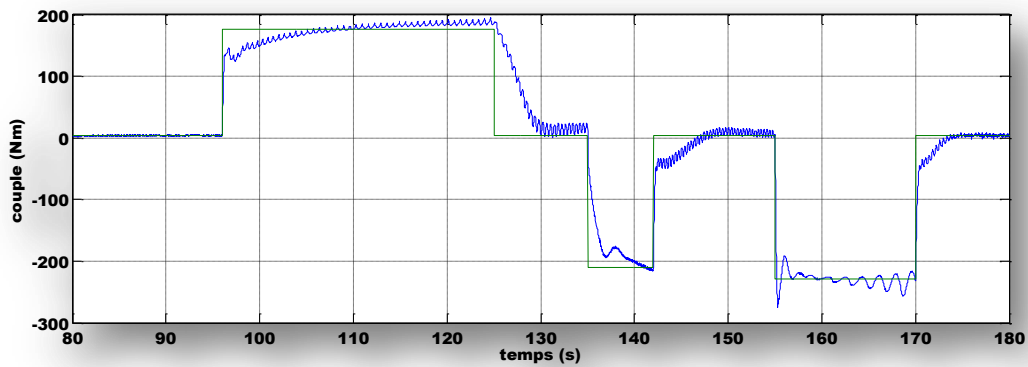


Figure 4.14 : Comparaison entre couple réel et couple de référence(deuxième période)

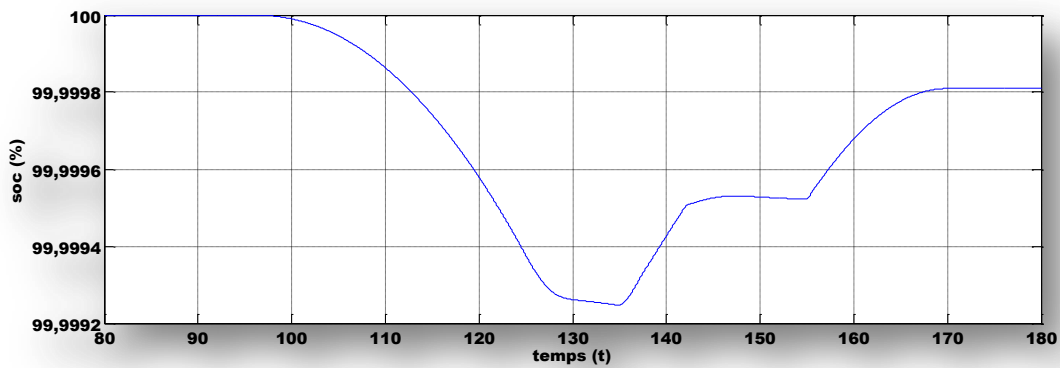


Figure 4.15 : La variation de l'état de charge de la batterie(deuxième période).

### 4.3.3.2 Le mode hybride (troisième période)

Sur ce profil de mission, la propulsion sera soit électrique, soit thermique ou les deux en même temps lors de certains points de fonctionnement, la propulsion sera assurée

## Simulation et stratégie de commande d'optimisation globale

simultanément par les deux moteurs On parle dans ce cas de mode assisté ou de mode bi propulsion.

En Europe, le cycle considéré comme le plus représentatif de l'utilisation moyenne d'une automobile pour la mesure des émissions et de la consommation est le Cycle Européen Normalisé

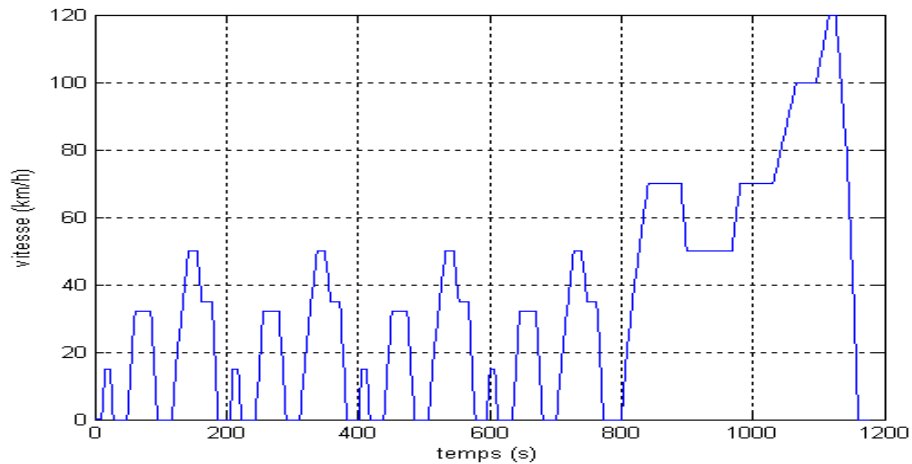


Figure 4.16 le Cycle Européen Normalisé

Seule une partie du cycle a été considérée pendant la simulation (entre 800 et 1150 s), la réponse en vitesse est montrée sur la figure 4.16.

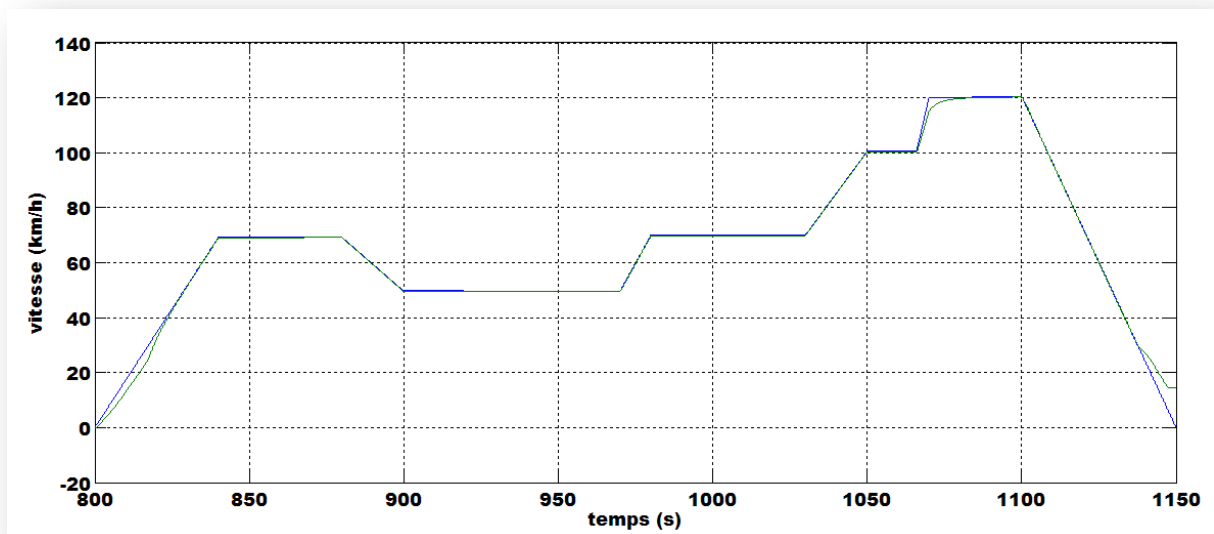


Figure 4.17 : Comparaison entre vitesse de référence et vitesse réelle.

La figure 4.17 montre le profil de vitesse demandée ainsi que la réponse du système pour pendant tout la partie du cycle.

## Simulation et stratégie de commande d'optimisation globale

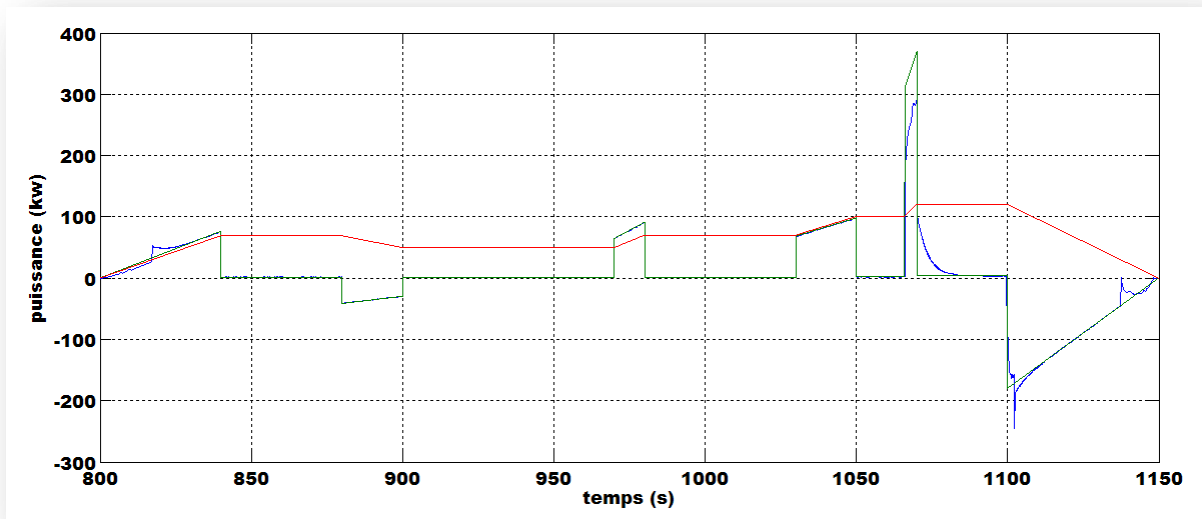


Figure 4.18 : les puissances demandée par le véhicule pendant tout la partie du cycle

Sur la figure 4.18, nous avons représenté la puissance demandée par le véhicule ainsi que les puissances de chaque moteur. On peut y voir les différents modes de fonctionnement.

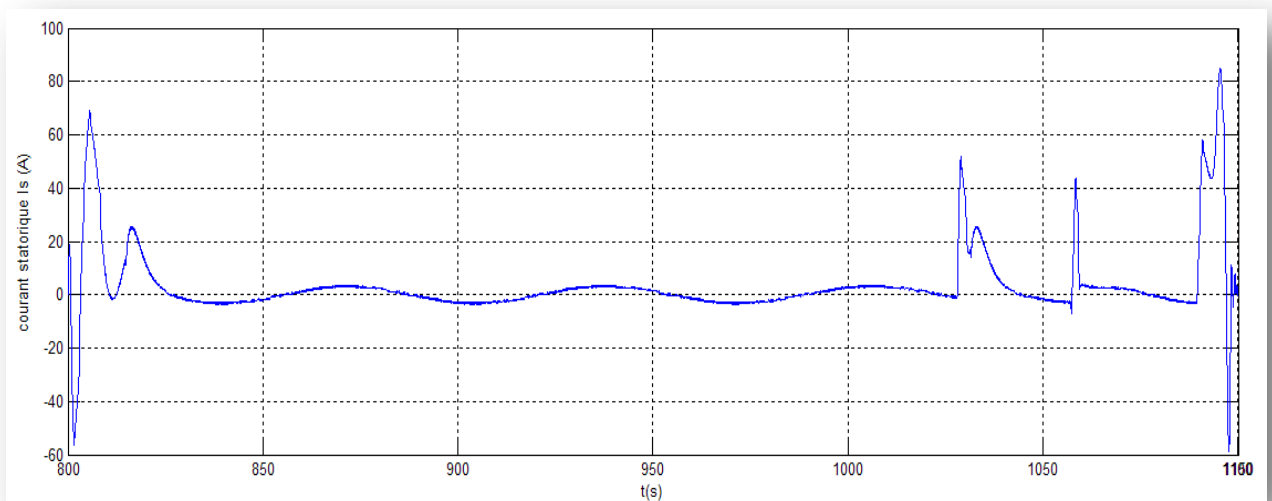


Figure 4.19 courant statorique instantané

Dans les figures illustrant l'évolution temporelle d'un courant de phase statorique lors d'une variation de la vitesse. L'amplitude ainsi que la fréquence s'adaptent suite à la variation de la vitesse.



## Simulation et stratégie de commande d'optimisation globale

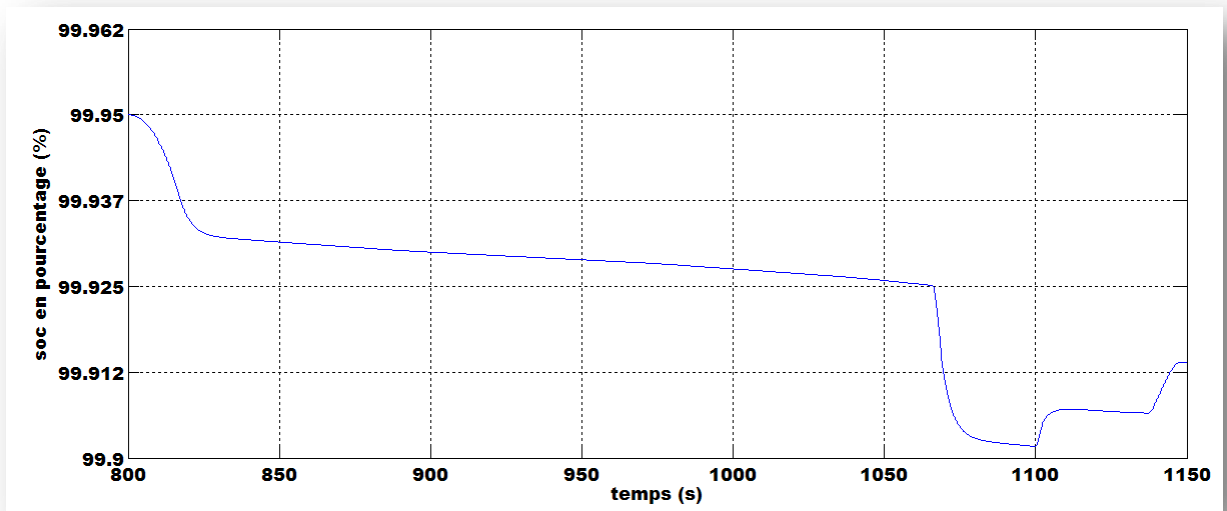


Figure 4.20 : La variation de l'état de charge de la batterie.

L'état de charge de la batterie (%) est l'historique de la batterie « State Of Charge » lors du cycle de conduite utilisé. La première SOC était de 100%. La plage de fonctionnement est comprise entre 100% et 99%. La tendance à la baisse de la courbe reflète la nature de décharge au cours de la période de simulation courte. Le fluctuante du SOC a été causé par la l'alimentation de la batterie par le freinage récupératif.

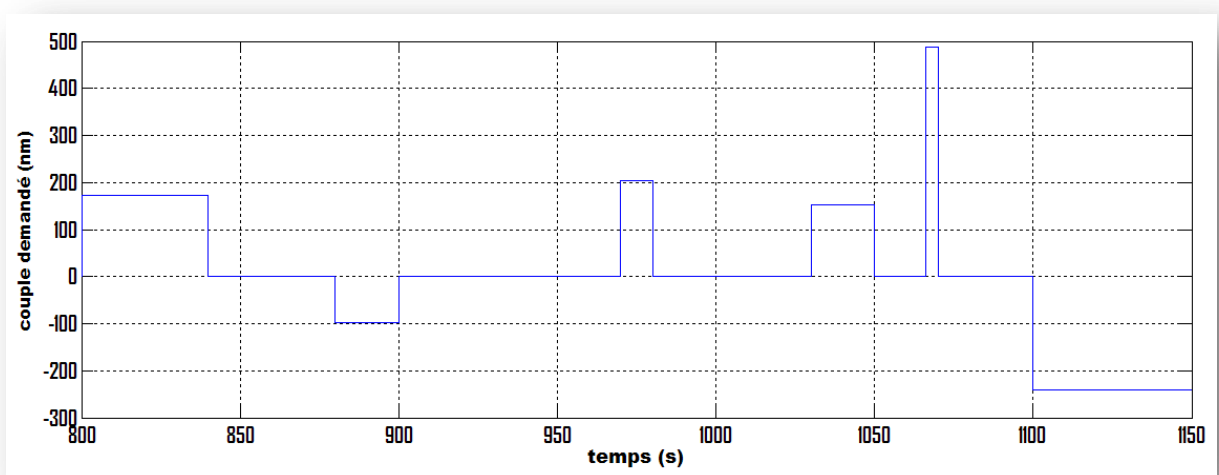


Figure 4.21 variation du couple demandé selon la vitesse demandé

## Simulation et stratégie de commande d'optimisation globale

La figure 4.21 montre le couple demandé (référence) par le véhicule pendant tout la partie du cycle ou il ya plusieurs modes de fonctionnement.

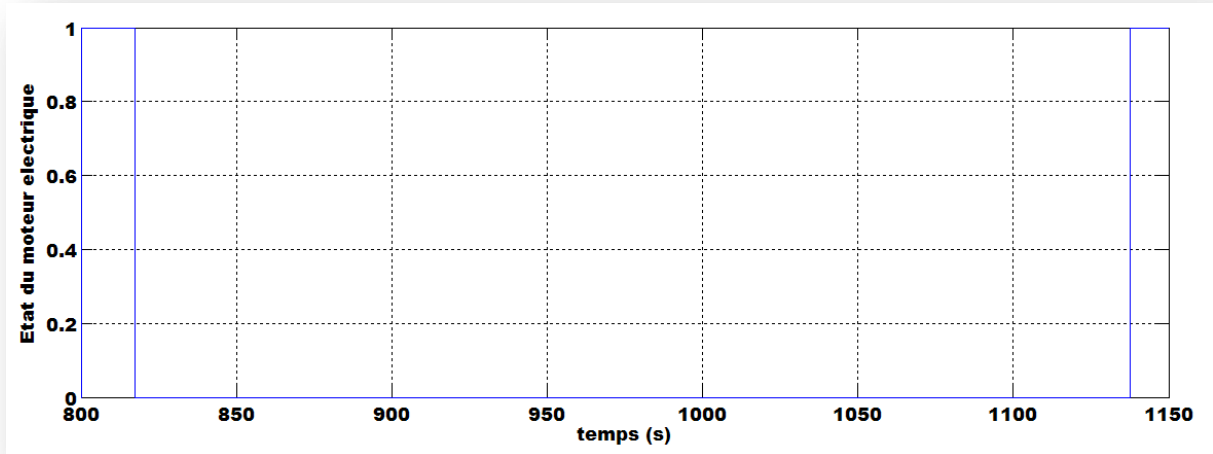


Figure 4.22 Etat de la machine électrique

La figure 4.22 montre l'état de fonctionnement du véhicule en mode électrique dont la première phase la propulsion est assuré par le moteur électrique et la dernière phase de cette partie de cycle le moteur asynchrone fonctionne comme un génératrice pendant le freinage.

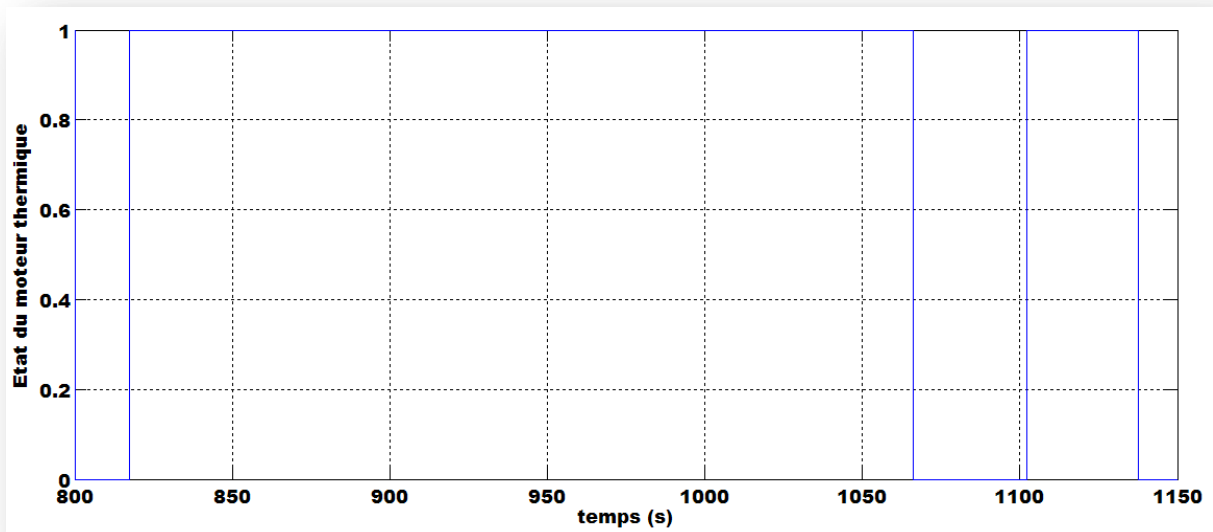


Figure 4.23 Etat du moteur thermique

## Simulation et stratégie de commande d'optimisation globale

La figure 4.23 montre l'état de fonctionnement du véhicule en mode thermique dont la propulsion est assuré par le moteur thermique seulement.

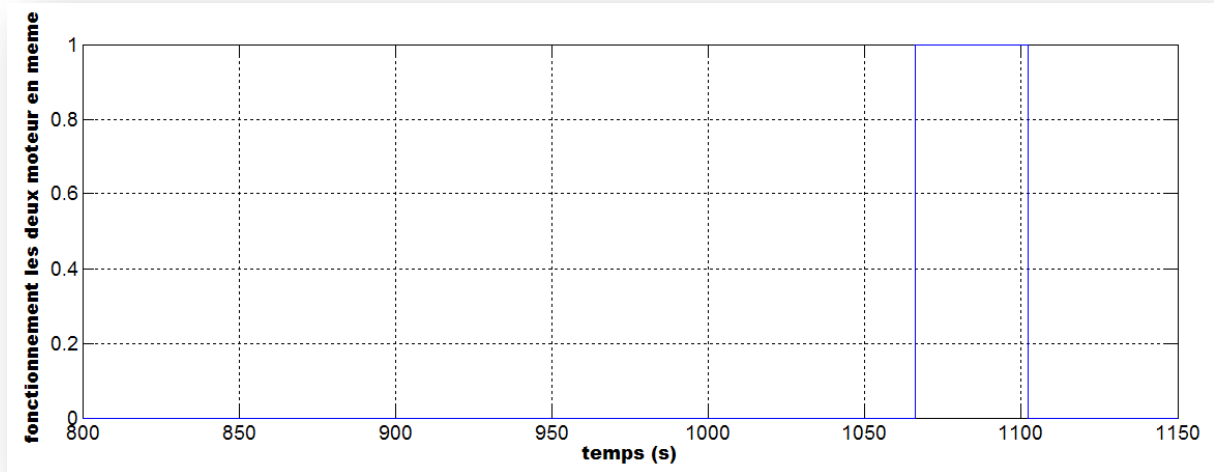


Figure 4.24 Etat de fonctionnement les deux moteurs en même temps

La figure 4.24 montre l'état de fonctionnement du véhicule en mode bi propulsion dont la propulsion est assuré par les deux moteurs électrique et thermique .

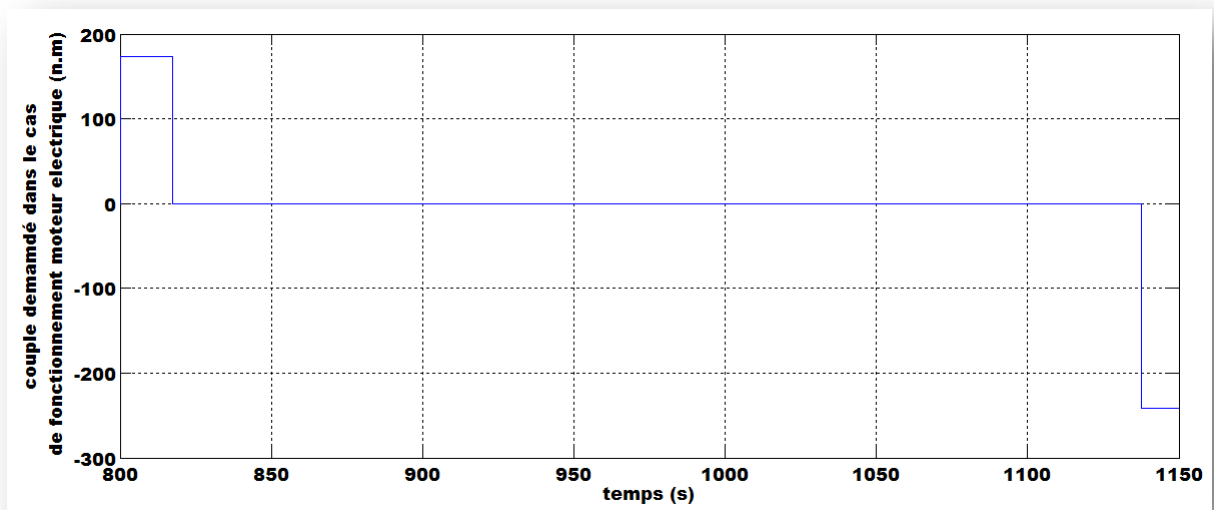


Figure 4.25 couple demandé pour létat électrique (moteur et génératrice )

La figure 4.25 montre le couple demandé par le véhicule pendant le mode électrique moteur et génératrice .

## Simulation et stratégie de commande d'optimisation globale

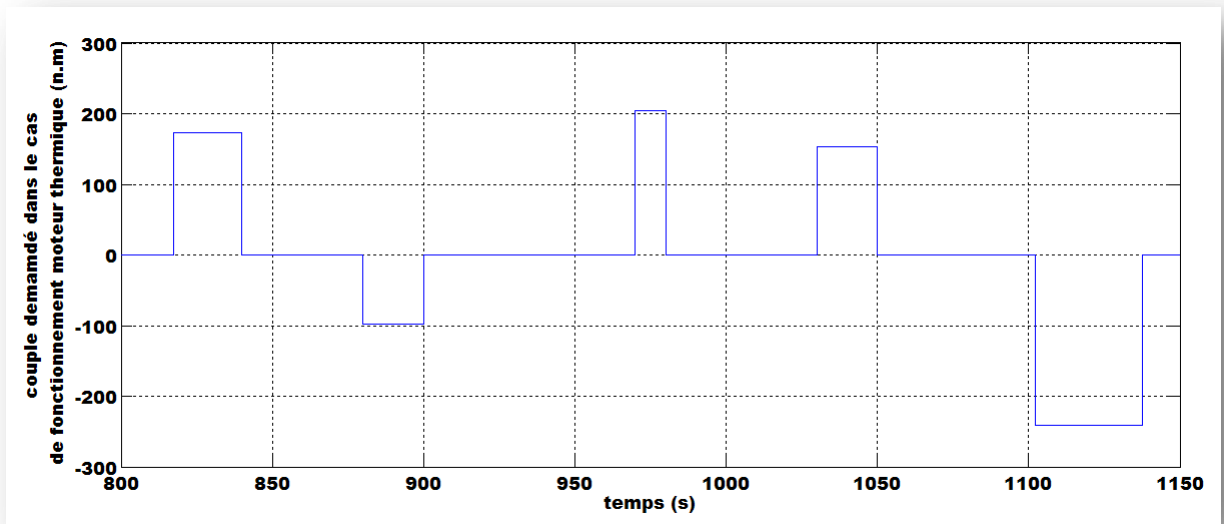


Figure 4.26 couple demandé pour état moteur thermique

La figure 4.26 montre le couple demandé par le véhicule pendant le mode thermique la propulsion est assuré par le moteur thermique seul .

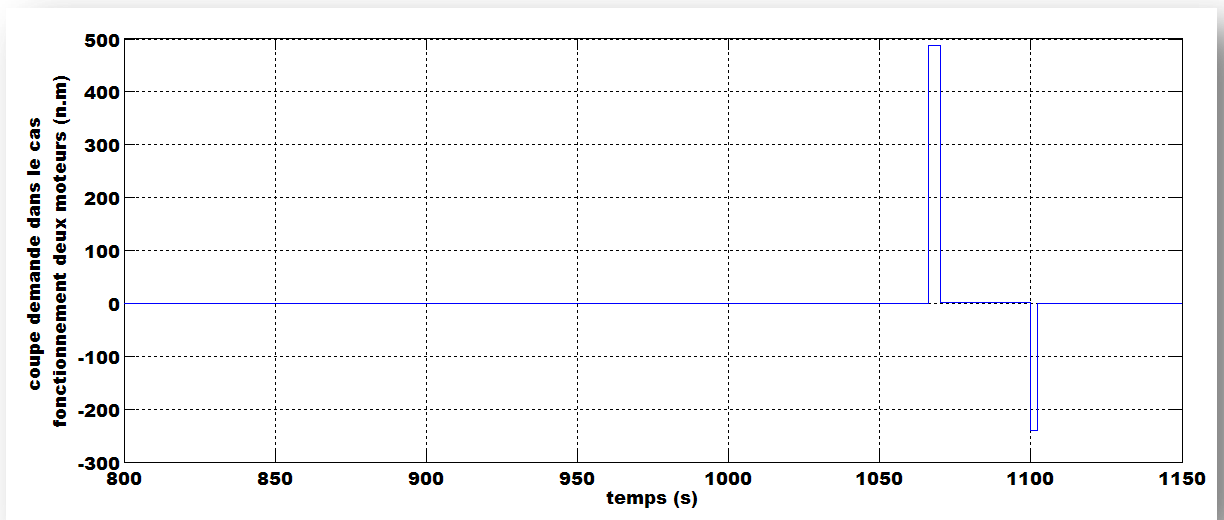


Figure 4.27 couple demandé pour etat deux moteurs

La figure 4.27 montre le couple demandé par le véhicule pendant le mode bi propulsion .

## Simulation et stratégie de commande d'optimisation globale

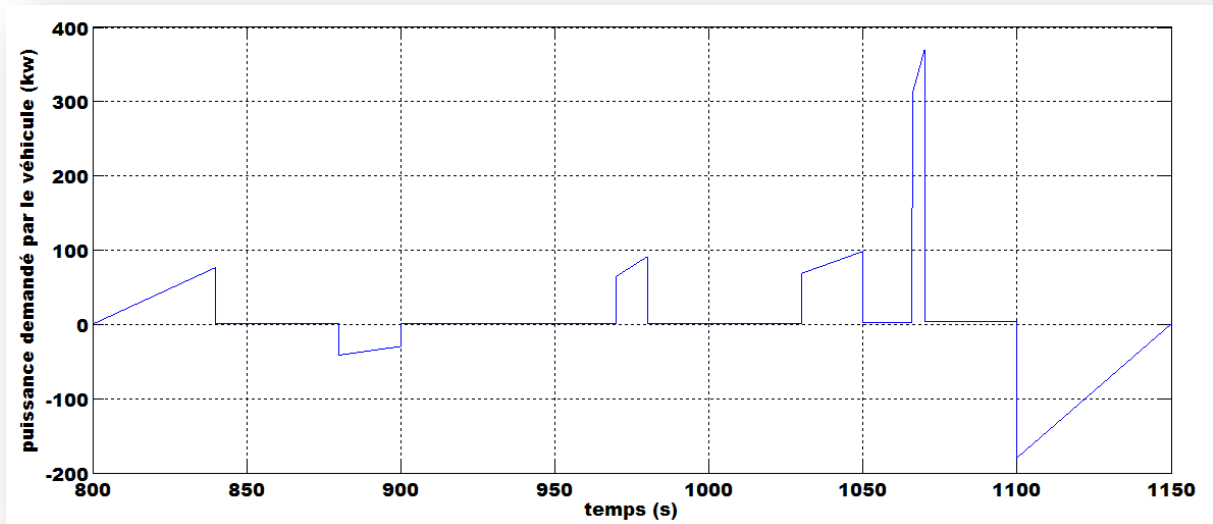


Figure 4.28 puissance demandé par le véhicule

La figure 4.28 montre la puissance demandé par le véhicule pendant tout la partie du cycle .

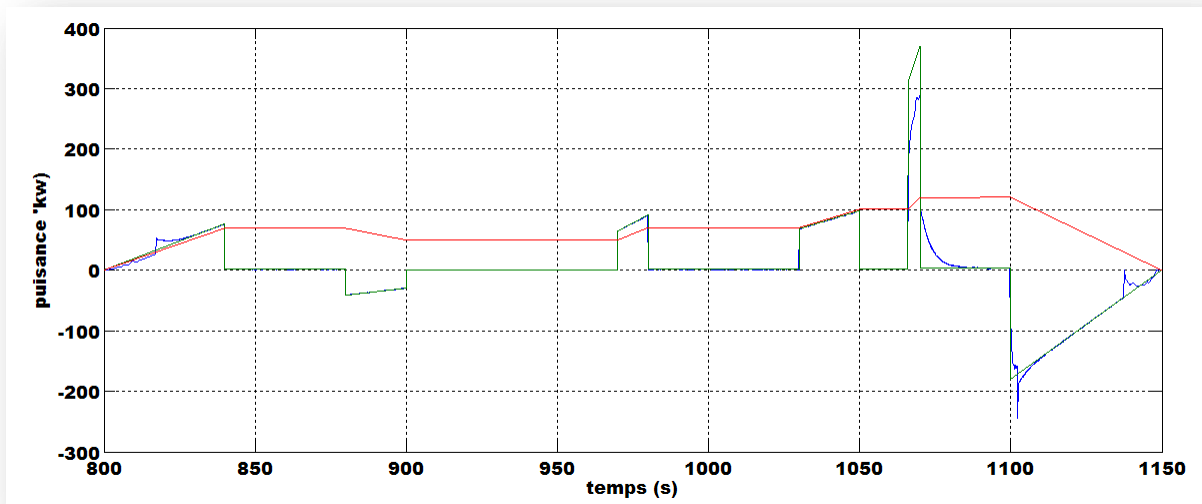


Figure 4.29 comparaison entre le puissance demandé et la puissance réel

La figure 4.29 montre la comparaison entre la puissance demandé par le véhicule et la puissance réel du véhicule pendant tout la partie du cycle .

## Simulation et stratégie de commande d'optimisation globale

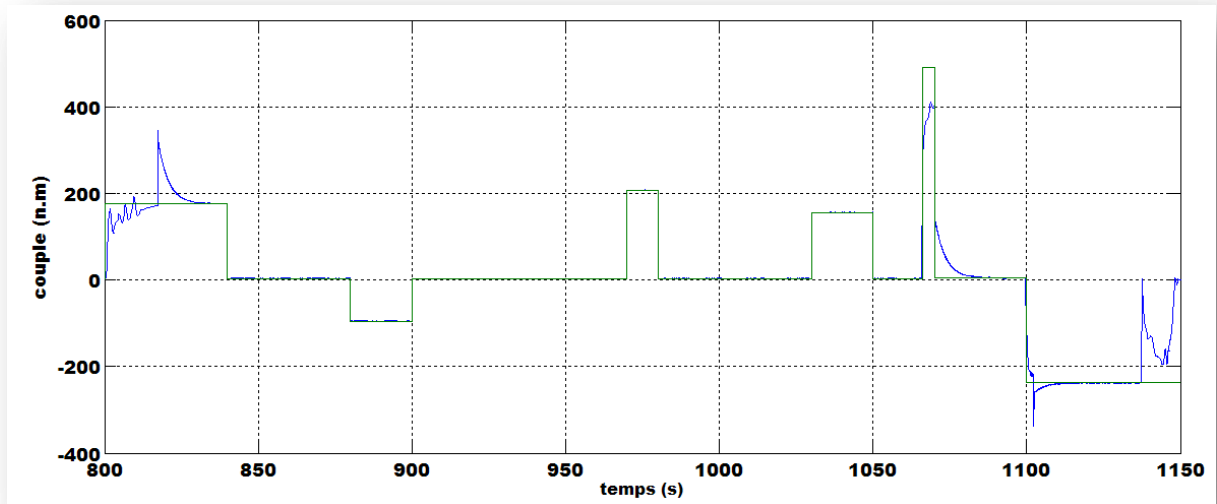


Figure 4.30 comparaison entre le couple demandé et le couple réel

La figure 4.30 montre la comparaison entre le couple demandé par le véhicule et le couple réel du véhicule pendant tout la partie du cycle .

### 4.4 Conclusion

Nous avons dans ce chapitre validé notre stratégie d'optimisation. Sur trois profils de mission différents, nous avons mis en évidence l'intérêt de l'hybridation et de la gestion optimale de l'énergie.

L'utilisation du seul moteur électrique en propulsion pour des puissances demandées faibles ou bien dans les zones urbaines permet d'éviter l'utilisation du moteur thermique dans un domaine de fonctionnement dans lequel il est particulièrement polluant et peu efficace et les émissions de CO<sub>2</sub> seront réduites.

# Conclusion

Du fait de normes de plus en plus contraignantes, et d'une prise de conscience globale concernant le réchauffement climatique, les véhicules hybrides représentent . à court terme . une solution pour réduire la consommation de carburant, les émissions de CO<sub>2</sub>, et les rejets de polluants. C'est d'ailleurs pour ces raisons qu'une majorité de constructeurs automobiles prévoient de proposer un véhicule avec motorisation hybride.

L'objectif initial de ce travail était de mettre en place un outil de simulation de l'ensemble de la chaîne de traction des véhicules hybrides et d'adopter une méthodologie permettant d'étudier différentes architectures.

Nous avons au cours de ce travail, d'abord présenté les enjeux sociétaux actuels en matière d'environnement. L'utilisation des véhicules hybrides est une étape vers les véhicules à zéro émission en termes de pollution.

Nous avons par la suite présenté les différentes architectures mécaniques des véhicules hybrides. Cette étude nous a permis de choisir la structure à couplage parallèle entre le moteur à combustion interne et la machine électrique. Cette structure dite à addition de couple est simple de mise en œuvre car les deux machines sont montées sur le même arbre.

Ensuite on a modélisé les différents organes de la traction hybride en proposant un modèle adéquat à chaque composant suivant les contraintes d'une double traction ; dans le cadre de ce travail le choix s'est fixé sur une architecture parallèle.

On a étudié des principales «stratégies de commande » ou encore « lois de gestion d'énergie » alors en essayé trouver la meilleure répartition de la puissance demandée par le conducteur entre les différentes sources d'énergie, de manière à minimiser un critère. Ce dernier peut-être basé sur la consommation de carburant, les émissions de polluants.

Enfin pou la dernière chapitre on a valider la stratégie par simulation sous le logiciel Matlab/Simulink. Elle va être appliquée à trois profils de mission c'est à dire trois cycles de vitesse afin d'illustrer les différents modes de fonctionnement pour cela on a choisie le cycle considéré comme le plus représentatif de l'utilisation moyenne d'une automobile pour la mesure des émissions et de la consommation est le Cycle Européen Normalisé

# REFERANCE

- [1] [Saida KERMANI 2009 ] **Gestion énergétique des véhicules hybrides : de la simulation à la commande temps réel** thèse à l'université de valenciennes et du hainaut cambrésis pour obtenir le grade de docteur d'université spécialité automatique .
- [2] [Sébastien DELPRAT 2002 ] **Evaluation de stratégies de commande pour véhicules hybrides parallèles** thèse à l'université de valenciennes et du hainaut cambrésis pour obtenir le grade de docteur d'université spécialité automatique .
- [3] [LHOMME Walter 2007 ] **gestion d'énergie de véhicules électriques hybrides basée sur la représentation énergétique macroscopique** thèse à l'université des sciences et technologies de lille pour obtenir le grade de docteur de l'université de lille spécialité génie électrique .
- [4] [GREGORY Rousseau 2008 ] **véhicule hybride et commande optimale** thèse à l'école nationale supérieur des mines de PARIS pour obtenir le grade de docteur de l'école supérieur des mines de PARIS .
- [5] [REMI Dubouil 2012 ] **Etude par simulation des transferts thermiques dans un groupe motopropulseur hybride électrique automobile** thèse à l'école centrale de NANTES pour obtenir le grade de docteur spécialité énergétique et mécanique des fluides .
- [6] [Alaxandra Dubray 2002 ] **Adaptation des lois de gestion d'énergie des véhicules hybrides suivant le profil de mission suivi** thèse à l'institut polytechnique de grenoble pour obtenir le grade de docteur de L'INPG spécialité automatique productive .
- [7] [GUENIDI Sif Eddine 2011 ] **Modélisation, commande et gestion de l'énergie d'un véhicule électrique hybride** mémoire magistère à l'école nationale polytechnique EL-HARACH ALGER spécialité robotique et informatique industrielle .
- [8] [HATTAB MAKER 2008 ] **optimisation et gestion d'énergie pour un système hybride :association pile combustible et supercondensateurs** thèse à l'université de technologie belfort montbeliard pour obtenir grade de docteur de l'université de technologie belfort montbeliard spécialité automatique .
- [9] [Mohamed NJEN 2006 ] **contribution au contrôle des pulsations de couple d'une propulsion hybride** thèse de l'université de poitiers pour obtenir le grade de docteur de l'université de poitiers spécialité automatique .
- [10] [Florian Dipriez-Robin 2010 ] **dimensionnement d'une voilier, basé sur la modélisation par les flux de puissance** thèse à l'université de NANTES pour obtenir le grade de docteur de l'université de NANTES .



- [11] [Hala HANNOUN 2005 ] **Minimisation de l'énergie consommée dans un véhicule hybride thermique-électrique** rapport de stage M2R LABORATOIRE de génie électrique de Paris .
- [12] [ALLERGE Anne-Laure 2010 ] **méthodologies de modélisation et de gestion de l'énergie de système de stockage mixtes véhicules électriques et hybrides** thèse à l'université de lille1 , sciences et technologies spécialité génie électrique .
- [13] [Alireza PAYMAN 2009 ] **Contribution à la gestion d'énergie dans les systèmes hybrides multi-sources multi-charges** thèse présenté à l'institut national de lorraine pour obtenir titre de docteur de L'I.N.P.L spécialité génie électrique .
- [14] [Mehrddad Ehsan,Yimin Gao,Ali Emadi 2010 ] « **Modern Electric Hybrid , and Fuel Cell Vehicles** » CRC Press Taylors & Francis Group Boca Raton London New York .
- [15] [Xi Zhang . Chris Mi 2011 ] « **Vehicle Power Management** » Departement of Electrical and Computer Engineering University of Michigan-Dearborn 4901 Evergreen Rd. Dearborn,Mi USA.
- [16] [Walid Hankache 2008 ] **gestion optimisée de l'énergie électrique d'un groupe électrogène hybride a pile a combustible** thèse présenté à l'institut national polytechnique de toulouse pour obtenir titre doctorat de l'institut national polytechnique de toulouse spécialité système automatiques ,embarqués.
- [17] CHAN (C. C.). – “**The state of the art of electric and hybrid vehicles**”. – Proc. of the IEEE. – February 2002, vol. 90, no. 2, p. 247 – 275.
- [18] Les Dossiers du CCFA. – « **Des progrès pour l'environnement. L'automobile citoyenne**». – référence de mai 2007. – disponible sur Internet <URL : <http://www.ccfa.fr/publications/dossiers/progresenv.pdf> >.
- [19] DUPRAZ (P.). – **Modélisation et commande avancées d'un moteur diesel à injection directe**. – Thèse de doctorat en Automatique : Institut National Polytechnique de Grenoble (INPG, France). – décembre 1998, 117 p.
- [20] D. Dörffel, « *Peace-of-Mind Series Hybrid Electric Vehicle Drivetrain* ».Transfer Thesis (MPhil/PhD). Southampton, UK, University of Southampton, School of Engineering Sciences, 118pp. April 2003.
- [21] VANGRAEFSCHPEPE (F.), MENEGAZZI (P.). – « **Véhicules hybrides, quel avenir** », Colloque International Panorama 2005 : Energie, Transports, Environnement, le développement durable des transports : quels moteurs, quels carburants ?. – février 2005. – référence de mai 2007. – disponible sur Internet <URL : [http://www.ifp.fr/IFP/fr/evenement/panorama/NotesSynthese\\_Archives.htm](http://www.ifp.fr/IFP/fr/evenement/panorama/NotesSynthese_Archives.htm)>.

- [22] M. Ehsani, et al., **Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles/Fundamentals, Theory, and Design**, CRC Press, 2005 .
- [23] I. Husain (2003). **Electric and Hybrid Vehicles: Design Fundamentals**.CRC Press LLC.
- [24] M. Kant (septembre 1995). **La voiture électrique, Dans Techniques de l'ingénieur**, numéro D5562.
- [25] J. Beretta (2005). **Le génie électrique automobile, la traction électrique**, H. Science, éd. LAVOISIER.
- [26] Chris Mi, Abul masrur and david wenzhong Gao « **Hybrid Electric Vehicles** » *University of Michigan–Dearborn, USA 2011.*
- [27] Duoba-M, Larsen-R, LeBlanc-N, 1996 : ***Design Diversity of HEVs with Example Vehicles from HEV Competitions.***  
SAE International Congress and Exposition, 26-29/02/1996, Detroit, Michigan, USA, Technical Paper N°960736.  
Society of Automotive Engineers, Warrendale, Pennsylvanie, USA.
- [27] Hochgraf-C., Ryan-M, Wiegman-H, 1996 :  
***Engine Control Strategy for a Series Hybrid Electric Vehicle incorporating Load-Leveling and Computer Control led Energy Management .***  
SAE International Congress and Exposition, 26-29/02/1996, Detroit, Michigan, USA, Technical Paper N°960230.  
Society of Automotive Engineers, Warrendale, Pennsylvanie, USA.
- [28] Duoba-M, Larsen-R, 1998 :  
***Investigation of Practical HEV Test Procedures with Prototypes from the 1997 FutureCar Challenge.***  
SAE International Congress and Exposition, 23-26/02/1998, Detroit, Michigan, USA, Technical Paper N°981080  
Society of Automotive Engineers, Warrendale, Pennsylvanie, USA.
- [29] Furutani-M, 1996 : ***Controller for Hybrid Electric Vehicle.***  
Brevet US5495906.
- [30] Jalil-N, Kheir-N, Salman-M, 1997 :  
***A Rule-Based Energy Management Strategy for a Series Hybrid Vehicle.***  
American Control Conference, 04-06/06/1997, Albuquerque, Nouveau Mexique, USA, vol. 1, pp. 689-693.  
IEEE, Piscataway, New Jersey, USA.

- [31] Anderson-C, Pettit-Erin, 1995 :  
***The Effects of APU Characteristics on the Design of Hybrid Control Strategies for Hybrid Electric Vehicles.***  
SAE International Congress and Exposition, 27/02-02/03/1995, Detroit , Michigan, USA, Technical Paper N°950493.  
Society of Automotive Engineers, Warrendale, Pennsylvanie, USA.
- [32] Brigham-D, Giardini-S, Lev-A et al., 1998 :  
***Method for Controlling Energy Flow in a Hybrid Electric Vehicle.***  
Brevet US5820172.
- [33] Ibarki-R, Taga-Y, Haga-H, et al., 1997 :  
***Hybrid Vehicle Control with Selection of Drive Mode according to Energy Conversion Efficiency in Electric Drive.***  
Brevet EP0759370.
- [34] Kim-C, NamGoong-E, Lee-SI, et al., 1999 :  
***Fuel Economy Optimization for Parallel Hybrid Vehicles with CVT.***  
SAE International Congress and Exposition, 01-04/03/1999, Detroit, Michigan, USA, Technical Paper N°1999-01-1148  
Society of Automotive Engineers, Warrendale, Pennsylvanie, USA.
- [35] Drozd-P, Fitzpatrick-N, Ghelesel-A, et al., 1996 :  
***A Hybrid Natural Gas Electric Fleet Vehicle.***  
SAE Future Transportation Technology Conference and Exposition, 05-08/08/1996,  
Vancouver, Canada, Technical Paper N°961657.  
Society of Automotive Engineers, Warrendale, Pennsylvanie, USA
- [36] Ibarki-R, Taga-Y, Haga-H, et al., 1997 :  
***Hybrid Vehicle Controller.***  
Brevet EP0769402.
- [37] Takahiro-I, Shuzo-M, Hideki-N, 1999 :  
***Vehicle.***  
Brevet US5892346.
- [38] Bourne-C, Faithfull-P, Quigley-C, 1996  
***Implementing Control of a Parallel Hybrid Vehicle.***  
International Journal of Vehicle Design, vol.17, n°.5-6, pp. 649-62.
- [39] Quigley-C, Ball-R, Vinsome-A, et al., 1995 :  
***Predicting the Use of a Hybrid Electric Vehicle.***  
Intelligent Components for Autonomous and Semi-Autonomous Vehicles,  
25-26/10/1995, Toulouse, France, pp. 129-34.  
Pergamon, Oxford, Royaume Unis.

- [40] Quigley-C, Ball-R, Vinsome-A, et al., 1996 :  
*Predicting Journey Parameters for the Intelligent Control of a Hybrid Electric Vehicle.*  
IEEE International Symposium on Intelligent Control, 15-18/09/1996, Dearborn, Michigan, USA, pp. 102-407.  
IEEE, Piscataway, New Jersey, USA.
- [41] **G. Grellet, G. Clerc**, « *Actionneurs électriques* », Edition Eyrolles, 1997.
- [42] **P. Vas**, « *Vector Control of AC Machines* », Oxford University Press, UK, 1990.
- [43] **F. Blaschke**, « *The principle of field orientation as applied to the new transvector closed-loop control system for rotating field machines* », Siemens Rev., No. 39, pp. 217–220, 1972.
- [44] **K. Hasse**. « *Zur dynamik drehzahl geregelter antriebe mit stromrichtegespeisten asynchron-kurzschlusslaufer-maschinen* », Ph. D. Dissertation, TH Darmstadt, 1969.
- [45] **G. Seguier, F. Notelet**, « *Electrotechnique industrielle* », Edition Technique et doc. Lavoisier, 1994.
- [46] **J. P. Caron, J. P. Hautier**, « *Modélisation et commande de la Machine asynchrone* », Edition Technip, 1995.
- [47] **F. Faidallah**, « *Contribution à l'identification et à la commande vectorielle des machines asynchrones* », Thèse de Doctorat, INPL, Lorraine 1995.
- [48] **K. Dakouche**, « *Commande vectorielle Numérique de machine asynchrone* », Thèse de Doctorat, INPG, Grenoble, 1990.
- [49] **L. Baghli**, « *Contribution à la Commande de la Machine Asynchrone, Utilisation de la Logique Floue, des Réseaux de Neurones et des Algorithmes Génétiques* », Thèse de Doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy-1, Nancy, 1999.
- [50] **W. Leonhard**, « *Control of Electrical Drives* », Springer, Berlin, Germany, 1996.

# Liste des figures

Figure I.1 - Principe de l'architecture série.....	09
Figure I.2 – Principe de l'architecture parallèle.....	10
Figure I.3 - Principe de l'architecture hybride combinée, type Prius.....	10
Figure 1.4 : Principaux modes de fonctionnement d'un véhicule hybride combinée.....	14
Figure 2.1 vue globale du groupe motopropulseur.....	18
Figure 2.2 Les forces agissant sur un véhicule.....	19
Figure 2.3: La distribution de la pression dans la zone de contact.....	20
Figure 2.4: Les forces agissant sur le pneu / déformation en chargement et déchargement....	21
Figure 2.5: Déformation de la surface du sol comme.....	22
Figure 2.6 : Trainée de la forme.....	24
Figure 2.7 : modèle dynamique du véhicule.....	27
Figure 2.8 : courbes iso-rendements du moteur thermique.....	28
Figure 2.9 : le modèle du moteur thermique.....	28
Figure 2.10: le modèle de la boîte de vitesses.....	29
Figure 2.11 : L'énergie massique en fonction de puissance massique .....	33
Figure 2.12 : Un model simple de batterie.....	34
Figure 2.13 : Un model de batterie générique pour les simulations dynamique des VEH.....	34
Figure 2.14 : le modèle détaillé de la batterie.....	36
Figure 2.15 : modèle moteur électrique.....	38
Figure 2.16 : Caractéristique Effort/Vitesse d'engins moteurs dans le domaine du transport.	42
Figure 2.17 : Comparatif des rendements.....	43
Figure 2.18 Représentation schématique d'une MAS triphasée.....	46
Figure 2.19 Modèle de Park de la MAS.....	48
Figure 2.20 Représentation des axes de la machine.....	49

Figure 2.21 : Principe d'orientation du flux rotorique.....	57
Figure 2.22 : Diagramme vectoriel pour la commande vectorielle directe.....	60
Figure 2.23 : Première méthode de la commande vectorielle directe (méthode de Blaschke)	61
Figure 2.24 Deuxième méthode de la commande vectorielle directe (méthode de Hasse).....	61
Figure 2.25 : Mise en évidence du couplage entre les axes (d) et (q).....	63
Figure 2.26 : Modèle réduit de la machine asynchrone.....	64
Figure 2.27 : Découplage par addition des termes de compensation.....	65
Figure 2.28: Boucle de régulation du courant $I_{sd}$ après découplage. ....	65
Figure 2.29 : Boucle de régulation du courant $I_{sq}$ après découplage.....	65
Figure 30 : Reconstitution des tensions $V_{sd}$ et $V_{sq}$ .....	66
Figure 2.31 : Boucle ouverte de $\phi_r$ .....	66
Figure 2.32 : Boucle de régulation de $\phi_r$ .....	67
Figure 2.33 : Schéma bloc de la régulation en cascade.....	67
Figure 2.34 : Schéma bloc de la commande vectorielle directe. ....	68
Figure 2.35 : résultats des simulation des grandeurs $C_{em}$ , $\phi_{rq}$ , $\phi_{rd}$ , $I_{sa}$ , $I_{sq}$ .....	70
Figure 2.36 train planétaire.....	74
Figure 2.37 Principe de fonctionnement d'un convertisseur continu-alternatif.....	75
Figure 2.38: Vue d'ensemble du groupe motopropulseur Prius et des systèmes de contrôle..	76
Figure 3.1 – Schéma général de la commande d'un véhicule électrique hybride.....	80
Figure 3.2 – Exemples de fonctionnement du véhicule avec maintien de l'état de charge SOC (haut) et décharge de la batterie (bas).....	81
Figure 3.3 : Exemple de description de l'état de charge en logique floue.....	87
Figure 3.4 : Calcul du régime 'optimal' pour le moteur thermique.....	88
Figure 3.5: Les pertes dans le groupe motopropulseur.....	89
Figure 4.1 : Modèle dynamique du véhicule électrique.....	93

Figure 4.2 : Architecture hybride parallèle un embrayage.....	94
Figure 4.3 : Puissance nécessaire à vitesse stabilisée sur terrain plat.....	95
Figure 4.4 : Accélération de 0-50 km/h en tout électrique.....	95
Figure 4.5 : Cycle de vitesse Européen Normalisé (NEDC).....	98
Figure 4.6 : Cycle Hyzem Urbain, cycle Hyzem Routier, cycle Hyzem Autoroutier.....	98
Figure 4.7 : le Cycle de conduite utilisé .....	99
Figure 4.8 : Comparaison entre vitesse de référence et vitesse réelle.....	100
Figure 4.9 : La puissance demandée pour suivre le cycle.....	100
Figure 4.10 : Comparaison entre couple réel et couple de référence.....	101
Figure 4.11 : La variation de l'état de charge de la batterie.....	101
Figure 4.12 : Comparaison entre vitesse de référence et vitesse réelle(deuxième période)...	102
Figure 4.13 : La puissance demandée pour la deuxième période.....	103
Figure 4.14 : Comparaison entre couple réel et couple de référence(deuxième période).....	103
Figure 4.15 : La variation de l'état de charge de la batterie(deuxième période).....	103
Figure 4.16 le Cycle Européen Normalisé.....	104
Figure 4.17 : Comparaison entre vitesse de référence et vitesse réelle.....	104
Figure 4.18 : les puissances demandée, thermique et électrique.....	105
Figure 4.19 courant statorique instantané.....	105
Figure 4.20 : La variation de l'état de charge de la batterie.....	106
Figure 4.21 variation du couple demandé selon la vitesse demandé.....	106
Figure 4.22 Etat du moteur électrique.....	107
Figure 4.23 Etat du moteur thermique.....	107
Figure 4.24 Etat de fonctionnement les deux moteurs en même temps.....	108
Figure 4.25 couple demandé pour l'état électrique (moteur et génératrice ).....	108
Figure 4.26 couple demandé pour l'état moteur thermique.....	109

Figure 4.27 couple demandé pour état deux moteurs.....	109
Figure 4.28 puissance demandé par le véhicule.....	110
Figure 4.29 comparaison entre le puissance demandé et la puissance réel.....	110
Figure 4.30 comparaison entre le couple demandé et le couple réel.....	111