

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA  
RECHERCHE SCIENTIFIQUE

**Ecole Nationale Polytechnique**

**Laboratoire de commande des processus**



**Projet de fin d'études**  
**En vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur en Automatique**

**Thème :**

**Véhicule hybride**

**Realisé par :**

**Abdellah ALAOUCHICHE**  
**Abdelatif GUETTOUCHE**

**Proposé et dirigé par :**

**Pr. M.S. BOUCHERIT**  
**Dr. K.BENMANSOUR**

**Juin 2014**

*Ecole Nationale Polytechnique, 10, Avenue Hassan Badi, 16200 El Harrach, Alger.*

# Dédicace

*Nous dédions ce travail à :*  
*nos familles,*  
*nos amis,*  
*et à la famille de l'Ecole Nationale Polytechnique.*

# Remerciement

*Nous tenons à remercier nos promoteurs Monsieur MS. BOUCHRIT et Monsieur K. BENMANSOUR pour leurs aides et encouragements durant toute cette étude.*

*Nous remercions également tous nos enseignants de l'Ecole Nationale Polytechnique qui nous ont tant donné tout au long de notre cursus.*

*Nous remercions aussi tous les enseignants et personnels du département de mécanique, en particulier Monsieur GUERGUEB et Monsieur Toufik pour leurs aides et conseils durant la phase de construction mécanique.*

## Résumé:

Ce travail a pour objectif essentiel, la réalisation d'un véhicule hybride électrique à partir d'un véhicule conventionnel c'est-à-dire à essence, afin d'avoir sous la main un outil expérimental d'étude et d'évaluation des véhicules hybrides. Le travail présente une identification de la chaîne de traction électrique par plusieurs méthodes linéaires et non linéaires. Un modèle d'un véhicule hybride a aussi été conçu où différentes méthodes à base de règles ont été appliquées pour la gestion de la répartition de l'énergie, dans le but d'analyser le comportement de ce dernier avant de passer au stade la pratique.

**Mots clés:** Véhicules électriques hybrides, identification, modélisation, gestion d'énergie, logique floue, réseaux de neurones, algorithmes génétiques.

## ملخص:

الهدف الرئيسي من هذه الدراسة هو تصميم سيارة هجينة ابتداءً من سيارة عادية لأجل الحصول على نموذج تجريبي يسمح بدراسة السيارات الهجينة. هذا العمل يقدم عدة طرق خطية و لا خطية لتعريف سلسلة الجر الكهربائية.

نموذج محاكاة هذه السيارة قد تم تصميمه, تطبيقاً لبعض الطرق التي تعتمد على قواعد عامة من أجل تسيير توزيع الطاقة, بهدف دراسة نظام تشغيلها قبل التجسيد العملي.

**الكلمات المفتاحية:** السيارة الكهربائية الهجينة, التعريف, النمذجة, تسيير الطاقة, المنطق الغامض, الشبكة العصبونية, الخوارزمية الجينية.

## Abstract:

The main objective of this work is the conception of a hybrid vehicle from its thermal counterpart, in order to have an experimental prototype allowing the study and the evaluation of hybrid cars. This work presents several linear and non linear identification methodes for the eletrical powertrain. A model of the hybrid vehicle has also been designed where different rules based methods have been applied for energy management in order to analyze the behavior of the latter before the practical implementation.

**Keywords:** hybrid vehicle, identification, modeling, energy management, fuzzy logic, neural network, genetic algorithms.



# Sommaire

Liste des symboles	5
Abréviation	6
Introduction générale	7
<b>I Moteurs thermiques et véhicules conventionnels</b>	<b>9</b>
I.1 Définition	9
I.2 Principe de fonctionnement	10
I.2.1 Principe de fonctionnement d'un moteur à allumage commandé	11
I.2.2 Principe de fonctionnement d'un moteur à allumage par compression	12
I.2.3 Comparaison entre les moteurs à essence et les moteurs diesel	12
I.3 Améliorations apportées au rendement global des moteurs à combustion interne	13
I.3.1 Le downsizing	14
I.3.2 Contrôle numérique du moteur	14
I.3.3 L'injection direct à rampe commune	15
I.4 Techniques employées pour limiter les émissions	16
I.4.1 Les pots catalytiques	17
I.4.1.1 Catalyseurs à trois voies	17
I.4.1.2 Catalyseurs deux voies	17
I.4.2 Piège à NOx	17
I.4.3 Le filtre à particules	18
I.4.4 La recirculation des gaz d'échappement	18
I.5 La transmission	18
I.5.1 La transmission manuelle	18
I.5.2 La transmission automatique	19
I.6 Modèle d'un véhicule thermique conventionnel avec Simdriveline	20
I.6.1 Matlab et la modélisation physique multi-domaines	20
I.6.2 Modèle dynamique du véhicule	20
I.6.3 Modèle du moteur thermique	21
I.6.4 Le modèle de la transmission	24
I.6.5 La simulation	25
I.7 Conclusion	26

<b>II</b>	<b>La traction électrique</b>	<b>28</b>
II.1	Machines utilisées dans le domaine de l'automobile . . . . .	28
II.2	Machine à courant continu sans balais . . . . .	29
II.2.1	Constitution du moteur BLDC . . . . .	29
II.2.2	Principe de fonctionnement du BLDC avec l'électronique de pilotage . . . . .	29
II.2.3	L'alimentation électronique du BLDC . . . . .	30
II.2.4	Modèle de la machine Brushless . . . . .	31
II.2.5	Le commutateur . . . . .	33
II.3	Batteries . . . . .	34
II.3.1	Les différentes technologies utilisées . . . . .	34
II.3.2	Etat de charge de la batterie . . . . .	35
II.3.3	Modèle de la batterie . . . . .	35
II.4	Identification de la chaine de traction électrique . . . . .	36
II.4.1	Introduction . . . . .	36
II.4.2	Banc d'essai . . . . .	38
II.4.3	Etude du système . . . . .	39
II.4.3.1	Simulation en boucle ouverte . . . . .	39
II.4.3.2	Caractéristique statique . . . . .	40
II.4.4	Estimation des paramètres par les méthodes numériques . . . . .	41
II.4.5	Identification par un modèle linéaire . . . . .	44
II.4.5.1	Méthode des moments . . . . .	44
II.4.5.1.1	Principe . . . . .	44
II.4.5.1.2	Mise en œuvre . . . . .	45
II.4.5.2	Méthodes numériques . . . . .	45
II.4.5.2.1	Principe . . . . .	45
II.4.5.2.2	Mise en œuvre . . . . .	47
II.4.6	Identification non linéaires . . . . .	47
II.4.6.0.3	Mise en œuvre . . . . .	48
II.4.6.1	Modèle de Hammerstein and Weiner . . . . .	49
II.4.6.1.1	Principe . . . . .	49
II.4.6.1.2	Mise en œuvre : . . . . .	51
II.5	Simulation de la chaine de traction électrique . . . . .	51
II.6	Conclusion . . . . .	52
<b>III</b>	<b>Les véhicules électriques hybrides</b>	<b>53</b>
III.1	Définition . . . . .	54
III.2	Les modes de fonctionnement d'un véhicule électrique hybride . . . . .	54
III.3	Taux d'hybridation . . . . .	55
III.4	Les principales architectures . . . . .	55
III.4.1	L'architecture Hybride-Série . . . . .	55
III.4.2	L'architecture Hybride-Parallèle . . . . .	56
III.4.3	L'architecture Hybride-Mixte . . . . .	56
III.5	Problématique de gestion d'énergie dans un véhicule hybride . . . . .	57
III.5.1	La gestion d'énergie offline . . . . .	58
III.5.2	La gestion d'énergie temps réel . . . . .	59
III.6	Application des lois de gestion d'énergie . . . . .	59

III.6.1	Stratégie à base de règles déterministes . . . . .	59
III.6.1.1	Principe de la méthode . . . . .	59
III.6.1.2	Résultats . . . . .	60
III.6.2	La gestion d'énergie par logique floue . . . . .	61
III.6.2.1	Introduction . . . . .	61
III.6.2.2	Principe de la méthode . . . . .	62
III.6.2.3	Mise en œuvre . . . . .	62
III.6.2.4	Résultats . . . . .	63
III.6.3	Optimisation du système flou par un algorithme génétique . . . . .	63
III.6.3.1	Introduction . . . . .	63
III.6.3.2	Principe de la méthode . . . . .	64
III.6.3.3	Mise en œuvre . . . . .	65
III.6.3.3.1	Codage : . . . . .	66
III.6.3.3.2	Fonction objectif : . . . . .	66
III.6.3.4	Résultats . . . . .	67
III.6.4	Approche par logique floue type-2 . . . . .	68
III.6.4.1	Introduction . . . . .	68
III.6.4.2	Principe de la méthode . . . . .	69
III.6.4.3	Mise en œuvre . . . . .	70
III.6.4.4	Résultats . . . . .	71
III.7	Conclusion . . . . .	71

**IV Réalisation expérimentale** **73**

IV.1	Position du problème . . . . .	74
IV.1.1	Dimensionnement de la chaîne de traction thermique . . . . .	74
IV.1.2	Dimensionnement de la chaîne de traction électrique . . . . .	76
IV.1.2.1	La machine électrique . . . . .	76
IV.1.2.2	Alimentation du moteur électrique . . . . .	77
IV.1.2.3	Convertisseur . . . . .	77
IV.1.3	Modification de la structure du véhicule . . . . .	78
IV.2	Conclusion . . . . .	79

**Conclusion générale et perspectives** **81**

**Bibliographie** **86**

# Liste des symboles

$DOC$  : Profondeur de charge de la batterie (Depth Of Charge) [%].  
 $SOC$  : Etat de charge de la batterie (State Of Charge) [%].  
 $C_r$  : Couple fourni par le moteur électrique [ $N.m$ ].  
 $C_{dem}$  : Couple demandé aux roues [ $N.m$ ].  
 $C_e$  : Couple fourni par le moteur électrique [ $N.m$ ].  
 $C_f$  : Couple utilisé par la roue électrique pour la recharge des batteries [ $N.m$ ].  
 $\alpha$  : Coefficient de répartition de puissance.  
 $TH$  : Taux d'hybridation [%].  
 $Pe$  : Puissance fournie par le moteur électrique [ $W$ ].  
 $Pth$  : Puissance fournie par le moteur thermique [ $W$ ].  
 $P_{dem}$  : Puissance demandée aux roues [ $W$ ].  
 $\beta$  : Pente de la route [ $rad$ ].  
 $A$  : Surface frontale du véhicule [ $m^2$ ].  
 $C_x$  : Coefficient de résistance aérodynamique.  
 $\rho$  : Masse volumique de l'air [ $kg/m^3$ ].  
 $m$  : Masse du véhicule [ $kg$ ].  
 $F_d$  : Force de traînée aérodynamique [ $N$ ].  
 $R_s$  : Résistance statorique des phases [ $\Omega$ ].  
 $L$  : Inductance de phase [ $H$ ].  
 $M$  : Inductance mutuelle des enroulements [ $H$ ].  
 $\lambda$  : Flux rotorique [ $Wb$ ].  
 $e$  : Force électromotrice [ $V$ ].  
 $i_a, i_b, i_c$  : Courants des phases [ $A$ ].  
 $T_e$  : Couple électromagnétique [ $N.m$ ].  
 $f$  : Coefficient de frottement [ $N.m.s$ ].  
 $J$  : Inertie [ $kg.m^2$ ].  
 $k_e$  : Constante de tension.  
 $G_c$  : Gain du convertisseur.  
 $T_c$  : Constante du temps du convertisseur [ $s$ ].  
 $K_p$  : Gain proportionnel.  
 $K_i$  : Gain intégral.  
 $M_k$  : Moment d'une fonction.  
 $\theta$  : Vecteur des paramètres.  
 $\phi$  : Matrice d'information.

# Abréviation

RNA : Réseaux de Neurones Artificiels.  
ARMAX : Autoregressive Moving Average with external input.  
ARX : Autoregressive with external input.  
NARX : Non Linear Autoregressive with external input.  
MLP : Multi Layer Perceptron.  
ECU : Engine Control Unit.  
CRDI : Common Rail Direct Injection.  
HDI : High Pressure Direct Injection.  
FAP : Filtre à particules.  
AG : Algorithmes génétiques.  
FL : Fuzzy Logic.  
CWW : Computing With Words.  
BLDC : Brushless Direct Current.  
PMH : Point Mort Haut.  
PMB : Point Mort Bas.  
SBPA : Séquence Binaire pseudo Aléatoire.  
IT2FS : Interval Type-2 Fuzzy System.  
EISAC : Enhanced Iterative Algorithm with Stop Condition.

# Introduction générale

Une dépendance croissante et abusive aux énergies fossiles, accompagnée d'une préoccupation accrue sur l'impact environnemental des moyens de transports, ont donné une forte impulsion à l'élaboration des systèmes de propulsion alternatifs pour les applications automobiles.

En effet, le secteur des transport est un contributeur majeur au phénomène du réchauffement climatique étant parmi les 1<sup>ers</sup> secteurs en termes d'émission de gaz à effet de serre [1]. Ceci est dû à la réaction de combustion des produits pétroliers à l'intérieur des moteurs thermiques conventionnels, qui dégagent de grandes quantités de  $CO_2$ .

Le  $CO_2$  n'est cependant pas un gaz polluant qui joue sur la qualité de l'air. Il contribue à l'effet de serre, mais n'est pas dangereux pour l'homme. Néanmoins d'autres gaz sont aussi émis par les véhicules conventionnels qui sont nocifs pour la santé humaine, à savoir, le Monoxyde de Carbone ( $CO$ ), les hydrocarbures imbrûlés ( $HC$ ) et les oxydes d'azote ( $NO_x$ ).

Dans le but de lutter contre ce phénomène, les pouvoirs publics ont instauré des lois visant à réduire les polluants émis par les véhicules, ce qui a obligé les constructeurs à améliorer leurs technologies de motorisation conventionnelles. Toutefois, ces améliorations sont loin d'être satisfaisantes, car malgré les avancés de la technologie thermique, l'objectif de zéro émission ne peut pas être atteint avec la motorisation conventionnelle.

Ce n'est pas uniquement le côté écologique qui est inquiétant, en effet, l'utilisation exclusive des énergies fossiles, en l'occurrence le pétrole, pour propulser les véhicules constitue aussi un grand problème. Après 120 ans de domination, l'ère du tout pétrole aborde la nouvelle décennie avec de sévères remises en question liée à la *disponibilité* et au *coût*.

Les combustibles fossiles sont issus de la méthanisation d'êtres vivants morts et enfouis dans le sol depuis plusieurs millions d'années, ils se renouvellent bien plus lentement que leur vitesse de consommation [2], et leurs utilisation par l'humanité en quantité considérable est à l'origine d'un déséquilibre important de leurs cycle de production.

La consommation d'hydrocarbures ne peut continuer au rythme actuel, il faut diminuer et diversifier notre consommation. C'est pourquoi d'autres constructeurs ont investi dans d'autres technologies utilisant d'autre moyen de propulsion.

Parmi les systèmes alternatifs, la propulsion électrique semble répondre à toutes les contraintes environnementales. Un véhicule électrique utilise un moteur électrique pour se mouvoir et des batteries pour stocker l'énergie nécessaire. Le moteur électrique étant indépendant des hydrocarbures il n'émet donc pas de polluants, de plus et grâce à son fonctionnement silencieux, il rend le véhicule adéquat pour le transport urbain. Mais malgré tous ces avantages, ce type de véhicule reste incapable de compléter une seule tâche : « *Satisfaire tout types de consommateurs* ». En effet, avec un coût relativement élevé, une autonomie réduite, et un temps de recharge de batteries relativement long [1], un utilisateur lambda trouve les fondamentaux non respectés.

Entre temps une autre famille de véhicules a vu le jour, un type qui combine les avantages des deux précédents, nommée les véhicules hybrides. Le véhicule hybride est souvent présenté comme l'axe d'évolution vers la voiture tout électrique et permet, par sa polyvalence, une transition douce en attendant le développement d'une infrastructure de recharge électrique à grande échelle.

Les véhicules hybrides intègrent deux sources d'énergies, une source thermique conventionnelle et une seconde source réversible propre. Ces deux sources ne peuvent fonctionner sans une gestion, qui assure l'optimalité d'utilisation et l'amélioration des performances du véhicule.

La gestion de l'énergie dans le domaine des véhicules hybrides est un art, où plusieurs travaux ont été effectués, partant des plus simples, qui sont les méthodes déterministes, jusqu'aux méthodes faisant appel à des technologies plus modernes, comme la logique floue ou les réseaux de neurones artificiels.

Dans cette étude nous focaliserons notre attention sur une étape plus précoce du problème des véhicules hybrides, où on va traiter la modélisation du véhicule, la gestion de l'énergie des deux sources et une partie sera consacrée à la réalisation d'un véhicule hybride pour pouvoir valider la performance des algorithmes de gestion de l'énergie dans la pratique.

L'ordonnancement des chapitres sera comme suit :

*Chapitre I* : Ce chapitre est consacré à l'étude du véhicule conventionnel, où on traite la modélisation de la chaîne de traction thermique du véhicule, qui inclut le moteur, la transmission et le modèle dynamique du véhicule.

*Chapitre II* : La deuxième source de traction dans un véhicule hybride est le moteur électrique, une description de la chaîne de traction électrique et une modélisation est effectuée dans ce chapitre. La possession des outils adéquats dans le laboratoire, nous a permis de réaliser une identification de la chaîne de traction en utilisant comme carte d'acquisition la carte dSpace, où plusieurs modèles ont été créés avant d'arriver à un modèle fiable de la chaîne de traction.

*Chapitre III* : En combinant les modèles des deux sources de tractions, le moteur thermique et le moteur électrique, on obtient le modèle du véhicule hybride, sur lequel des algorithmes de gestion de l'énergie ont été appliqués. On introduit également dans le chapitre, une approche génétique de la gestion de l'énergie par logique floue.

*Chapitre IV* : Dans ce chapitre on présentera les étapes qui mènent à la conception du véhicule hybride, on présentera également son fonctionnement et les modes possibles d'utilisation du véhicule.

On terminera l'étude par une conclusion et une série de perspectives qui serviront comme un point de départ pour les travaux à venir.

# Chapitre I

## Moteurs thermiques et véhicules conventionnels

Les fondements des moteurs à combustion interne remontent à 1876 quand l'ingénieur allemand Nikolaus Otto a inventé le moteur à allumage commandé (Spark-Ignition Engine) communément appelé moteur à essence. Une autre invention de ce type a vu le jour en 1892 par Rudolf Diesel un autre ingénieur allemand qui a mis en place le moteur à allumage par compression (Compression-Ignition Engine), appelé aussi le moteur Diesel. Depuis ce temps, ces moteurs n'ont pas cessé de se développer, avec le développement de notre connaissance des processus du moteur, avec la disponibilité des nouvelles technologies, et avec le changement des contraintes environnementales concernant leurs utilisations.

Dès leur existence, ils ont été les plus utilisés pour la propulsion des véhicules terrestres en raison de leur densité de puissance favorable, leurs autonomies importantes et leur relativement faible coût de fabrication.

Ce chapitre présente un panorama des moteurs à combustion interne, incluant leurs modes de fonctionnement, les technologies utilisées et leurs domaines d'applications.

Pour plus de détails concernant le sujet, on peut se conférer à [3] qui présente une description thermique bien étalée, et [4] pour les détails de la construction des moteurs.

### I.1 Définition

Les moteurs thermiques (dits moteurs à combustion interne) transforment l'énergie chimique contenue dans les molécules du carburant en énergie mécanique nécessaire à assurer le mouvement du véhicule.

On les appelle moteurs à combustion interne car le processus de combustion a lieu dans des cylindres à l'intérieur du moteur, contrairement aux moteurs à combustion externe où la combustion est obtenue dans une chambre séparée, appelée habituellement brûleur.

Le noyau d'un moteur thermique est le cylindre, dans lequel coulisse un piston entre deux points appelés Point Mort Haut (PMH) et Point Mort Bas (PMB) en un mouvement rectiligne alternatif. Ce mouvement est transformé en rotation par l'intermédiaire d'une bielle reliant le piston à un vilebrequin. La figure I.1 montre les parties essentielles d'un cylindre.

Dans un moteur on trouve plusieurs cylindres, 4, 6 et 8 sont les plus communs, montés en plusieurs formations, en ligne, en V, à plat... (figure I.2) [5].



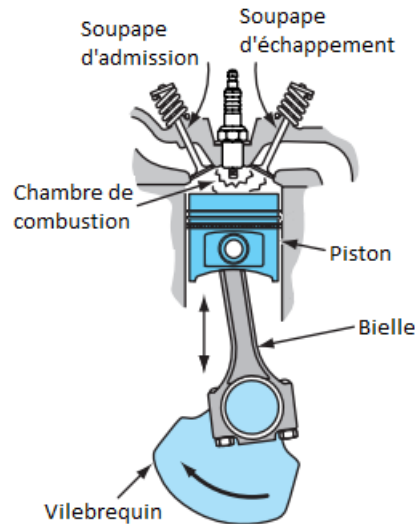


FIGURE I.1 – La construction d'un cylindre [4].

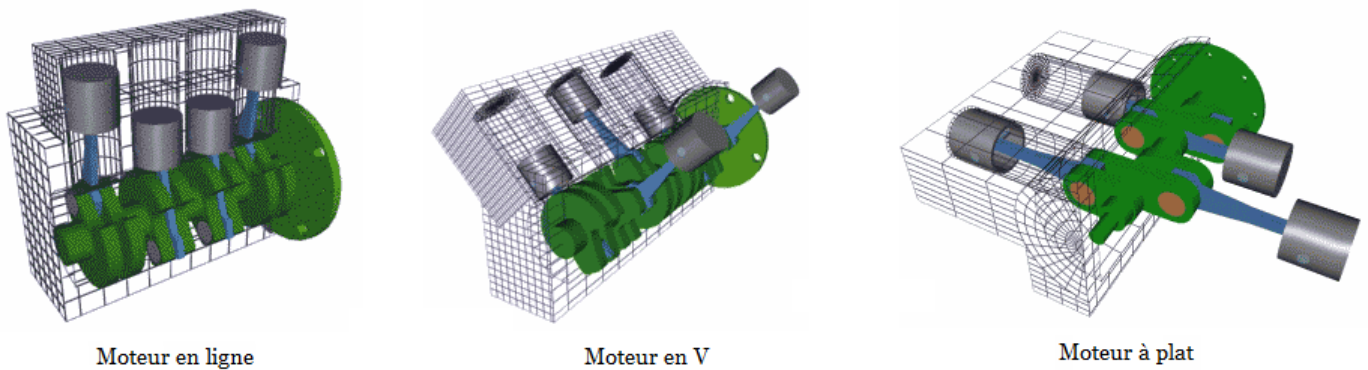


FIGURE I.2 – Les différents arrangements des cylindres [5].

## I.2 Principe de fonctionnement

La réaction de combustion est la génératrice d'énergie pour un moteur thermique, elle a pour rôle de transformer l'énergie chimique potentielle contenue dans le carburant en une énergie thermique. Pour produire une combustion il est essentiel de réunir trois éléments, appelé le triangle du feu : un carburant (l'essence ou le gazole), un comburant (l'oxygène de l'air) et une source de chaleur (Figure I.3).

Le principe est de mettre une petite quantité de carburant plus de l'air dans un espace réduit (la chambre de combustion) et les enflammer. Une combustion aura lieu en libérant une quantité d'énergie capable de faire pousser le piston et tourner le vilebrequin. Si on répète cette opération plusieurs fois par minute suivant un cycle déterminé on aura un mouvement de rotation continu. Le cycle de fonctionnement d'un moteur thermique a été défini théoriquement par le scientifique français Beau de Rochas en 1862, et mis en pratique pour la première fois par l'ingénieur allemand Nikolaus Otto en 1876, on le trouve porter le nom de l'un des deux [3].

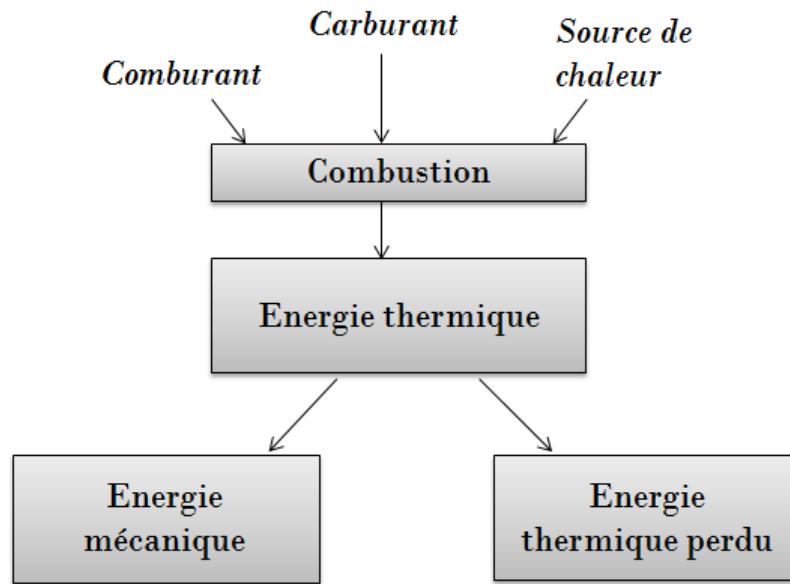


FIGURE I.3 – Transformation de l'énergie.

Il existe trois types d'application de ce cycle [6] :

- Les moteurs à quatre temps qui réalisent le cycle en quatre courses de piston et deux tours de vilebrequin ;
- Les moteurs à deux temps qui réalisent le cycle en deux courses de piston et un tour de vilebrequin [7] ;
- Les moteurs rotatifs dont le mouvement rectiligne alternatif du piston classique est remplacé par la rotation d'un rotor qui réalise le cycle trois fois par tour [8].

Par la suite, on décrira le cycle quatre temps, pour les moteurs à essence et les moteurs diesel, étant donné qu'il est le cycle le plus utilisé [5] [4] [9].

### I.2.1 Principe de fonctionnement d'un moteur à allumage commandé

Dans les moteurs à allumage commandé, des carburants ayant une réactivité relativement faible sont utilisés, tels que l'essence, le gaz naturel comprimé (GNC) ou le gaz de pétrole liquéfié (GPL). Ces carburants sont mélangés avec l'air, et comprimés par le piston dans le cylindre pour atteindre des températures de l'ordre de 400 °C et des pressions de 20 bars. La combustion est ensuite initiée par une étincelle provenant d'une bougie. Les quatre temps sont illustrés dans la figure I.4, et qu'ils sont :

**1er temps** : l'admission ; le piston est au point mort haut, la soupape d'admission s'ouvre laissant entrer le mélange air-carburant dans le cylindre, ce qui a pour effet de pousser le piston vers le bas.

**2eme temps** : la compression ; les deux valves sont fermées, le piston remonte comprimant ainsi le mélange air-essence dans une surface réduite, en conséquence la pression dans le cylindre augmentera.

**3eme temps** : la combustion ; quand le piston atteint le point mort haut, une étincelle est générée par la bougie d'allumage pour enflammer le mélange. La charge d'essence dans

l'explosion de cylindre entraînera le piston vers le bas faisant tourner ainsi le vilebrequin.

**4eme temps** : l'échappement ; la soupape d'échappement s'ouvre, le piston remonte et évacue les gaz brûlés.

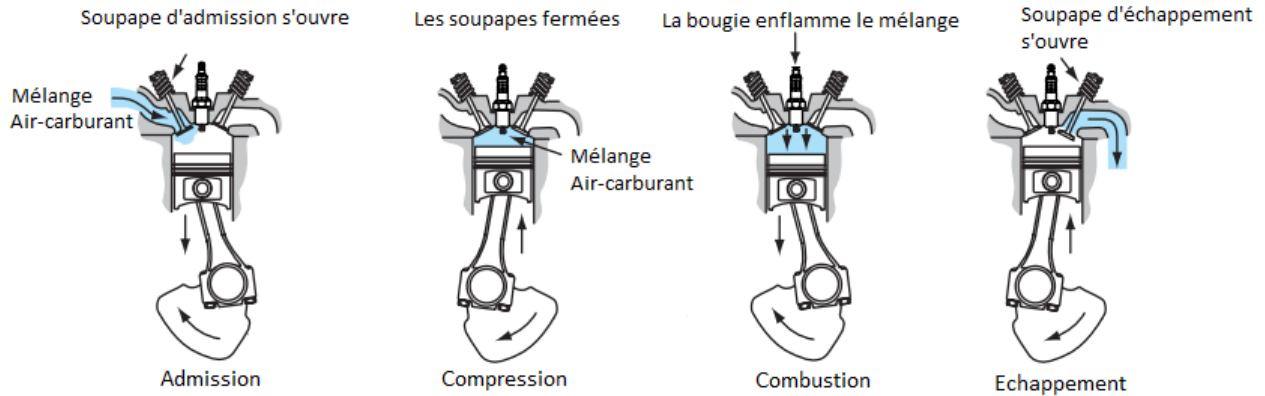


FIGURE I.4 – Le cycle quatre temps d'Otto. [4]

## I.2.2 Principe de fonctionnement d'un moteur à allumage par compression

Le fonctionnement du moteur diesel est basé sur le même cycle que celui d'un moteur à essence, à quelques exceptions près. La première différence entre les deux réside au fait que le moteur à allumage par compression n'injecte pas de carburant avec l'air au temps d'admission. En effet l'air est seul injecté dans le cylindre et est comprimé par le mouvement du piston, pour atteindre des températures élevées. Quand le piston atteint le point mort haut, un carburant avec une réactivité élevée, tel que le diesel, est directement injecté sous pression dans la chambre de combustion. La température élevée de l'air enflamme spontanément le carburant, et c'est là la deuxième différence entre les deux moteurs, les moteurs diesel n'ont pas besoin d'une bougie pour initier la combustion elle se fait spontanément [10] [11].

Les quatre temps d'un moteur à allumage par compression sont alors <sup>1</sup> :

**1er temps** : Admission ; La soupape d'admission s'ouvre, laissant passer l'air et déplaçant le piston vers le bas.

**2eme temps** : Compression ; le piston remonte comprimant l'air.

**3eme temps** : Combustion ; lorsque le piston atteint le sommet, le carburant est injecté et s'enflamme spontanément, forçant le piston de redescendre vers le bas.

**4eme temps** : Echappement ; le piston évacue les gaz brûlés par la soupape d'échappement.

## I.2.3 Comparaison entre les moteurs à essence et les moteurs diesel

Les deux moteurs présentent des avantages et des inconvénients, [11]

1. Ce cycle est aussi appelé dans la littérature "Cycle Diesel".

**Taux de compression** Aussi appelé rapport volumique, est défini comme étant le rapport entre le volume du cylindre lorsque le piston est au PMB et le volume lorsque le piston est au PMH. Il est généralement donné sous une forme semblable à 10 :1, qui veut dire dans cet exemple, que le volume quand le piston est au PMB est 10 fois plus grand que le volume du cylindre quand le piston se trouve au PMH.

Les moteurs à essence ont un taux de compression entre 7 :1, 10 :1, mais pour produire l'auto-inflammation les moteurs diesels ont besoin d'un taux de compression plus élevé, entre 14 :1 et 24 :1. Le taux de compression est lié au rendement du moteur, plus le taux de compression est élevé, meilleur est le rendement.

**Rendement** C'est le ratio de la puissance mécanique restitué à partir de la combustion et la puissance thermique fournie par le carburant. Les moteurs essences ont un rendement entre 20% à 30%, tandis que les moteurs diesels ont un rendement supérieur entre 30% et 40%.

**Puissance** Le moteur à essence fonctionne sur une plage de vitesse plus grande que celle d'un moteur diesel grâce à leurs constructions légères, ceci permet donc de développer plus de puissance.

**Prix** A cause de leurs constructions lourdes et les systèmes d'injections à rajouter, les moteurs diesels sont plus chères que les moteurs à essence.

Le tableau ci-dessous récapitule la comparaison.

	Moteur essence	Moteur diesel
Cycle de fonctionnement	Cycle d'Otto	Cycle Diesel
Carburant utilisé	Essence	Gazole
Addmission du carburant	Air + Carburant sont introduit lors de l'admission.	L'air seul est introduit lors de l'admission, le carburant est directement injecté dans la chambre de combustion.
Allumage	Une bougie est nécessaire pour initier la combustion.	La combustion s'effectue spontanément lors de l'injection.
Rapport volumique	Entre 7 :1 et 10 :1	Entre 14 :1 et 24 :1
Vitesse	Vitesse maximale plus élevé en raison d'un poids plus léger	Vitesse maximale relativement réduite à cause d'un poids plus élevé.

TABLE I.1 – Tableau récapitulatif

### I.3 Améliorations apportées au rendement global des moteurs à combustion interne

Dans un moteur thermique toute la chaleur fournie ne peut pas être récupérée mécaniquement. En effet, dans des conditions optimales de fonctionnement, le moteur offre aujourd'hui un rendement maximal de l'ordre de 36% pour un moteur à essence et de 42% pour un moteur

Diesel. C'est-à-dire, qu'en moyenne, un peu plus d'un tiers de l'énergie fournie par le carburant est transformée en énergie utile pour faire avancer le véhicule, le reste étant principalement dissipé en chaleur dans l'atmosphère. A ceux-là s'ajoutent les différentes pertes au niveau de la transmission, des pistons dans les cylindres, sur l'axe du vilebrequin... Les ingénieurs ont d'ores et déjà ouvert plusieurs voies de recherche afin d'améliorer le rendement des moteurs dans toutes les conditions d'utilisation des véhicules. Nous présentons dans ce qui suit, quelques progrès et technologies qui sont déjà utilisées.

### I.3.1 Le downsizing

Pour améliorer les performances du moteur, on peut jouer sur sa cylindrée. Plus la cylindrée est élevée, plus il tournera vite et plus la puissance qu'il délivrera sera grande. Toutefois, en faisant ainsi, on augmente aussi la taille des pièces en mouvement, et par voie de conséquence leur inertie est importante. Par ailleurs, les frictions internes d'un moteur sont directement liées aux dimensions des pièces en contact. Ici encore, plus le moteur est gros, plus les surfaces en contact sont importantes, plus les frottements sont élevés et plus ils dépensent inutilement l'énergie lors de son fonctionnement. Or, cette énergie provient directement du carburant. Donc, toute perte d'énergie se traduit par un accroissement de la consommation et une baisse du rendement. Un moteur de petite cylindrée peut tourner plus vite qu'un moteur plus volumineux. Comme la puissance que délivre un moteur est fonction du produit de son couple par sa vitesse de rotation, toute augmentation de celle-ci permet de gagner en puissance.

Le downsizing consiste à réduire la cylindrée d'un moteur tout en préservant ses performances. Le principe est basé sur la suralimentation en aire avec des turbocompresseurs.

**Turbocompresseurs** Les turbocompresseurs sont utilisés pour assurer un meilleur remplissage en air des cylindres.

Le turbocompresseur se sert de l'énergie contenue dans les gaz d'échappement pour entraîner une turbine solidaire d'un compresseur d'aire, lui-même branché sur le circuit d'admission du moteur (Figure I.5). Les gaz font tourner la turbine qui à son tour, tournera le compresseur lui permettant de comprimer et réinjecter de l'air à haute pression vers le circuit d'admission. Grâce à cet apport d'air comprimé, il devient possible de suralimenter le moteur en carburant [12].

En comprimant l'air au niveau de l'admission, le turbo accroît virtuellement le taux de compression du moteur et donc sa cylindrée. Il permet ainsi d'augmenter la puissance spécifique qu'il est capable de délivrer tout en lui conservant une masse inférieure à celle d'un moteur équivalent sans turbo. Cette alternance de substitution permet de réduire à la fois la consommation ainsi que les émissions des polluants.

### I.3.2 Contrôle numérique du moteur

Un moteur est un système très compliqué. Il regroupe des dizaines de pièces mobiles et des dizaines de différents processus qui se déroulent à la fois. Un système de commande précis est donc nécessaire pour contrôler tous ces processus afin d'assurer le bon fonctionnement du moteur et les besoins du conducteur, tout en minimisant la consommation et le rejet des polluants.

Les systèmes à base de microprocesseurs ont envahi tout domaine où précision et temps de calcul rapide s'entremêlent. Leurs disponibilités à faible coût et leurs encombrements réduits

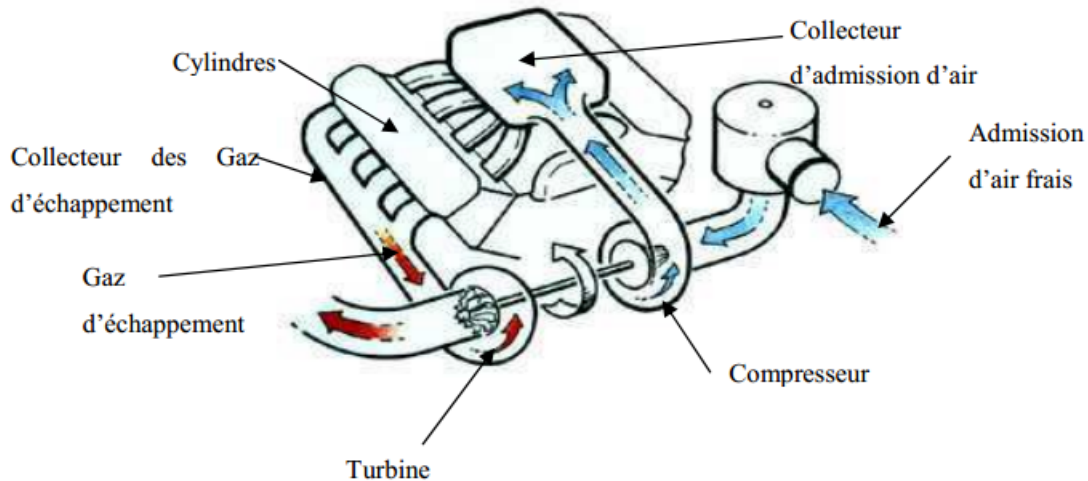


FIGURE I.5 – Fonctionnement du turbocompresseur [9].

constituent des atouts indéniables qui leurs ont permis de remplacer les systèmes de contrôle classiques précédents. Un contrôle à base de microprocesseurs pour un moteur permet d'avoir :

- Un contrôle moteur sophistiqué pour répondre à des émissions et des normes d'économie de carburant ;
- Des diagnostics avancés ;
- Simplification de la fabrication et la conception de voitures ;
- La réduction de la quantité de câbles dans les voitures ;
- Des nouvelles fonctionnalités de sécurité ;
- Des nouvelles fonctionnalités de confort et de commodité.

Le calculateur du moteur (Appelé ECU « Engine Control Unit ») calcule en permanence les valeurs optimums des paramètres de contrôle à appliquer aux différents actionneurs. Il analyse en temps réel les signaux provenant des divers capteurs installés sur le véhicule, et communique avec les calculateurs auxiliaires présents dans le véhicule afin de renforcer leurs fonctions.

### I.3.3 L'injection direct à rampe commune

L'injection directe à rampe commune (commun rail Direct Injection « CRDI ») ou injection directe à haute pression (High Pressure Direct Injection « HDI ») selon les constructeurs, est un système qui permet un dosage plus précis du gazole et l'amélioration de sa pulvérisation, afin de créer des mélanges plus homogènes air-carburant, grâce au choix de la pression d'injection pour chaque point de fonctionnement moteur. Aussi l'utilisation des injecteurs de grande précision et à réponse rapide a permis de mieux contrôler le temps, la pression, la durée et le nombre des différentes injections du carburant faites sur un cycle thermodynamique qui se traduira par un meilleur contrôle du processus de la combustion. Le système d'injection à rampe commune est constitué principalement des dispositifs suivants (Figure I.6) : [13]

- Un filtre à carburant. Permet d'éliminer le maximum d'impuretés en suspension dans le carburant présent dans le réservoir.
- Une pompe haute pression. Le carburant est aspiré par cette pompe et accumulé dans le Rail.

- L'accumulateur haute pression Rail. Il permet l'alimentation à pression constante des injecteurs en carburant.
- Les injecteurs. Ils sont contrôlés par l'ECU et assurent l'injection du carburant nécessaire dans les cylindres.
- Les tubes hautes pressions. Ils assurent l'acheminement du carburant en haute pression vers le Rail et les injecteurs.
- Les tubes basses pressions. Ils permettent la récupération du retour du carburant des injecteurs de la pompe et son réacheminement vers le réservoir.

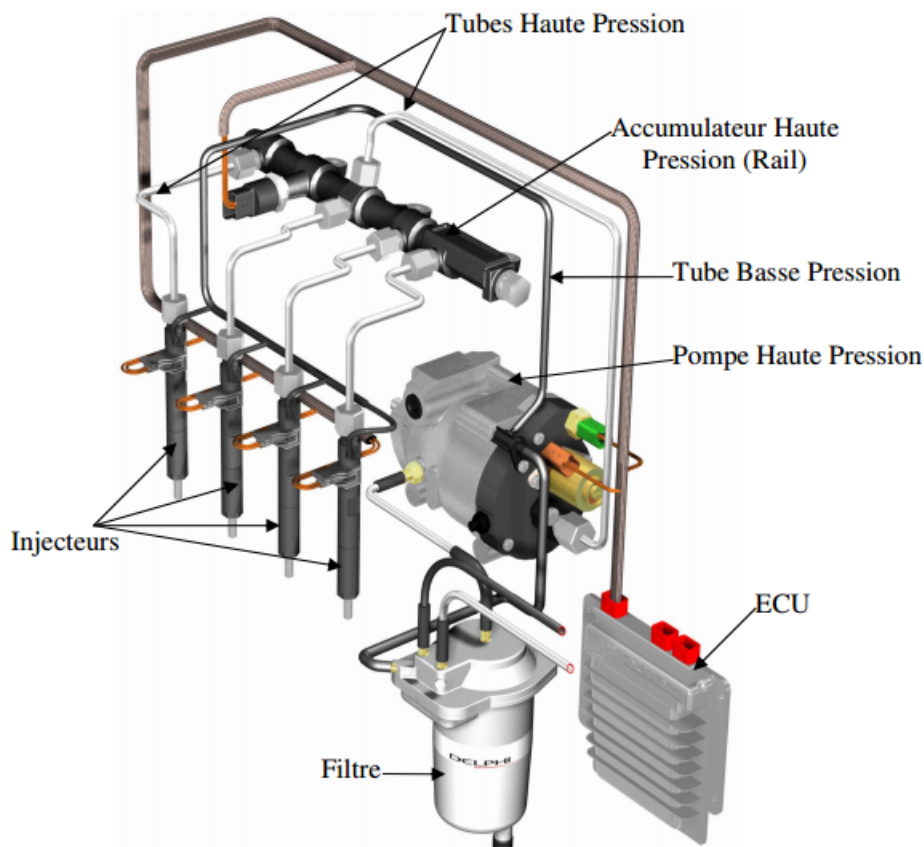


FIGURE I.6 – Système d'injection à rampe commune. [13]

## I.4 Techniques employées pour limiter les émissions

Les moteurs sont censés brûler le carburant pour le transformer en dioxyde de carbone, azote et vapeur d'eau. Mais la combustion n'est pas optimale et les gaz d'échappement contiennent aussi des composés toxiques tels que le monoxyde de carbone, les hydrocarbures imbrûlés et l'oxyde d'azote.

Les normes d'émissions concernant ces gaz toxiques vont vers une sévérité croissante chaque année, c'est pourquoi de nombreux efforts de recherche sont aujourd'hui consentis pour la mise au point de systèmes de post-traitement capable de limiter les émissions et répondre aux normes actuelles.

### I.4.1 Les pots catalytiques

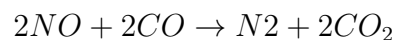
Le pot catalytique (ou catalyseur) est un système de dépollution présent dans la ligne d'échappement qui transforme les gaz toxiques, par une réaction d'oxydation ou de réduction avec l'oxygène présent dans les gaz, en composants inoffensifs.

Le catalyseur utilise un procédé nommé catalyse pour accélérer la réaction chimique de conversion des polluants. Il est constitué d'un support, généralement en céramique, qui présente une structure en nid d'abeilles composée de multiples canaux, dans lesquels se trouvent des particules microscopiques de métaux précieux (platine, palladium...). C'est la réaction entre ces métaux et les polluants qui accélèrent la transformation des substances toxiques. Sur les voitures à essence, on trouve le plus souvent des catalyseurs à trois voies, capables de transformer trois substances toxiques, les hydrocarbures ( $HC$ ), le monoxyde de carbone ( $CO$ ) et les oxydes d'azote ( $NO_x$ ). Ils les convertissent en vapeur d'eau, en dioxyde de carbone ( $CO_2$ ) et en azote. Les diesels se contentent généralement de catalyseurs à deux voies, qui ne traitent pas les oxydes d'azote.

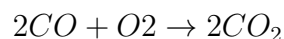
#### I.4.1.1 Catalyseurs à trois voies

Les catalyseurs à trois voies présents dans les véhicules à essence provoquent 3 réactions simultanées :

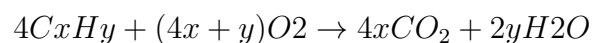
1. Une réduction des oxydes d'azote en diazote et en dioxyde de carbone :



2. Une oxydation des monoxydes de carbone en dioxyde de carbone :



3. Une oxydation des hydrocarbures imbrulés en dioxyde de carbone et en eau



#### I.4.1.2 Catalyseurs deux voies

Les catalyseurs à deux voies des moteurs diesel transforment le monoxyde de carbone et les hydrocarbures imbrulés en  $CO_2$  et en eau. Pour réduire l'émission de  $NO_x$  deux technologies peuvent être utilisées : Le piège à  $NO_x$  et le système SCR.

### I.4.2 Piège à NOx

Le piège à NOx vient compléter l'action du pot catalytique pour abaisser le niveau des rejets en oxydes d'azotes. Imprégné de métaux précieux (platine, baryum, rhodium), il piège chimiquement les oxydes d'azote et, régulièrement, les convertit en gaz neutres, principalement de l'azote ( $N_2$ ) et de l'oxygène ( $O_2$ ).



### I.4.3 Le filtre à particules

Spécifique aux moteurs diesel, le filtre à particules élimine les particules toxiques, ou suies, qui résultent de la combustion incomplète du gazole et se matérialisent par des fumées noires. Le filtre à particules est placé juste après le catalyseur et est constitué d'un substrat alvéolé poreux dont le diamètre est inférieur à celui des particules que rejette le moteur. Les parois poreuses de cette structure en nids d'abeilles retiennent alors les particules et purifie donc les gaz d'échappement. Toutefois le filtre à particules s'encrasse rapidement au fil des kilomètres et pour qu'il reste efficace et ne s'oppose pas au gaz d'échappement il faut le régénérer régulièrement. La régénération consiste à brûler les particules et les transformer en gaz carbonique et en vapeur d'eau. Ces gaz traversent facilement la paroi poreuse du FAP et sont éliminés par le pot d'échappement. Cette opération s'effectue automatiquement et reste indécélable pour le conducteur de la voiture.

### I.4.4 La recirculation des gaz d'échappement

Le système de recirculation des gaz d'échappement (Exhaust Gaz Recirculation « EGR ») assure une diminution de la formation des  $NO_x$  dans les moteurs diesel. Cette opération est réalisée en injectant une partie des gaz d'échappement dans l'air frais que le circuit d'admission fournit au moteur. Cette recirculation des gaz d'échappement ralentit la combustion du mélange et absorbe une partie des calories. De plus elle réduit la concentration en oxygène du mélange. Il s'ensuit une réduction de la température maximale atteinte lors de la combustion et par suite de la formation des  $NO_x$ .

## I.5 La transmission

La transmission est la liaison entre le moteur et les roues du véhicule, sa tâche principale consiste à transmettre la puissance provenant du moteur aux roues pour propulser le véhicule. La transmission se sert des engrenages pour utiliser plus efficacement le couple fournie par le moteur en maintenant le fonctionnement de ce dernier à des vitesses approprié tout en offrant une large gamme de vitesses à la sortie au véhicule. La transmission permet aussi de :

- Démarrer le véhicule à partir du repos, avec le moteur fonctionnant en continu ;
- L'arrêt du véhicule sans caler le moteur en le déconnectant de l'axe ;
- Faire varier le rapport de vitesse entre le moteur et les roues.

Une transmission a des rapports multiples de vitesse, et permet le changement entre ces vitesses soit manuellement (transmission manuelle) soit automatiquement (transmission automatique).

### I.5.1 La transmission manuelle

La boîte manuelle est la formule la plus commune de transmission sur les voitures. Elle est dite à engrenages puisqu'elle comporte une série de pignons qui permet de monter ou de descendre les rapports de façon synchronisée. La boîte manuelle est actionnée avec un levier de vitesse (Figure I.7). Le levier de vitesse assure le déplacement horizontal des baladeurs qui rendront un pignon fou solidaire à l'arbre de sortie permettant ainsi le changement de rapport. Les boîtes manuelles se déclinent le plus souvent en 5 vitesses + marche arrière mais de nombreux nouveaux modèles sont à 6 rapports + marche arrière. Il est toutefois essentiel de

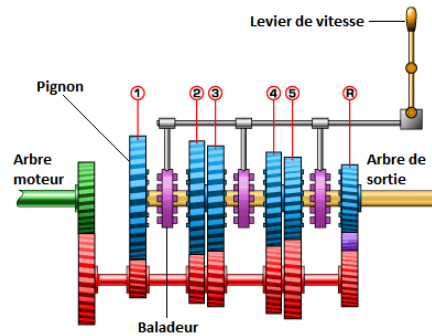


FIGURE I.7 – Transmission manuelle à 5 vitesses.

déconnecter le moteur avant de passer d'un rapport à un autre, cette opération est assurée par l'embrayage qui est actionné manuellement via la pédale d'embrayage. Le principal avantage de ce système est qu'il permet au conducteur de pouvoir parfaitement gérer le changement de rapport. Au négatif, chaque passage de vitesse se doit d'être réalisé dans les règles de l'art : débrayage, embrayage, actionnement du levier. Pour une conduite en ville notamment, la boîte manuelle est loin d'être aussi confortable que la boîte automatique.

### I.5.2 La transmission automatique

Tandis que la transmission manuelle utilise différents engrenages pour réaliser les différents rapports de vitesse, la transmission automatique fonctionne d'une manière complètement différentes. En effet, tous les rapports de vitesse sont accomplis par le même ensemble d'engrenage nommé le train planétaire composé. C'est une sorte de deux trains planétaires couplés.

Un train planétaire simple (Figure I.8) est constitué par :

- D'un pignon central appelé soleil (sun gear),
- D'une roue à denture intérieure appelée couronne (ring gear).
- D'un ou plusieurs pignons appelés satellites (Planet gear) engrenant avec le planétaire et la couronne. Les satellites sont portés par un porte-satellite (Planet carrier) animé d'un mouvement de rotation.

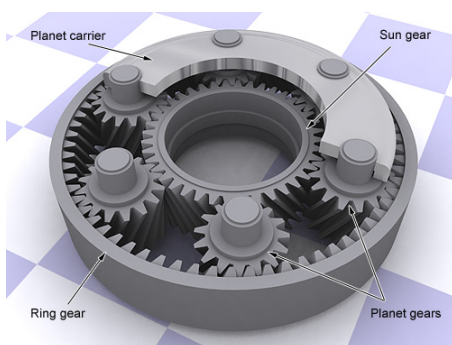


FIGURE I.8 – Train planétaire simple. [14]

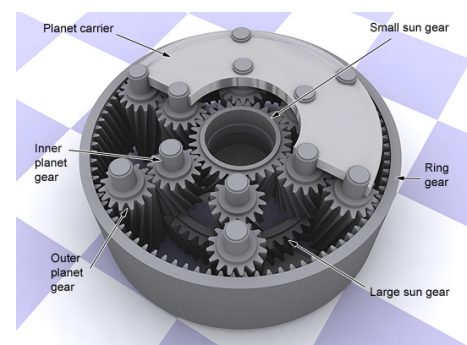


FIGURE I.9 – Train planétaire composé. [14]

Le train planétaire composé est l'association de deux trains planétaires avec une seule couronne. En effet il contient (Figure I.9) : Deux soleils, l'un à l'intérieur de l'autre, deux groupes de planètes portés sur le même porte-satellite et une couronne.

Chacun de ces composants peut être l'entrée, la sortie ou peut être bloqué et garder immobile. Choisir quelle pièce joue quel rôle détermine le rapport de vitesse à réaliser. Le tableau suivant résume les configurations et les rapports associés.

Rapport	Entrée	Sortie	Immuable	Rapport
1	Petit soleil	Couronne	Porte-Planète	$1+g_o$
2	Petit soleil	Couronne	Grand soleil	$1+g_o/(1+g_i)$
3	Couronne	Couronne	Le tout tourne	1
4	Porte-Planète	Couronne	Grand soleil	$g_i/(1+g_i)$
R	Grand soleil	Couronne	Porte-Planète	$-g_i$

TABLE I.2 – Rapport de vitesse pour une boîte automatique.

## I.6 Modèle d'un véhicule thermique conventionnel avec Simdriveline

Dans cette partie on présente un modèle complet d'un véhicule thermique conventionnel. Le modèle comporte les différents organes allant du moteur jusqu'à la dynamique du véhicule. Ce modèle a été fait avec la Library Simdriveline de Matlab/Simulink.

### I.6.1 Matlab et la modélisation physique multi-domaines

Matlab propose le toolbox Simscape qui offre un environnement de modélisation et de simulation de systèmes physiques couvrant les systèmes mécaniques, électriques, hydrauliques... Il fournit les éléments fondamentaux de ces domaines qu'on peut assembler pour réaliser des modèles complets. L'avantage de cette approche par rapport aux blocs Simulink, - qui représentent des opérations mathématiques ou opèrent sur des signaux -, est qu'elle utilise des connexions physiques et décrit la structure physique d'un système plutôt que les équations mathématiques sous-jacentes. Simdriveline, qui est une partie de Simscape, est la boîte à outils utilisé pour simuler les composants mécaniques, et est employé principalement dans l'industrie automobile. Simdriveline comporte différents blocks, on trouve entre autre des modèles de moteurs thermiques, des embrayages, des freins... On s'en servira de ces blocks pour construire un modèle complet d'un véhicule.

### I.6.2 Modèle dynamique du véhicule

Le comportement d'un véhicule en mouvement le long de son sens de déplacement est déterminé par les forces agissant sur ce dernier dans cette direction (figure I.10). L'aspect énergétique seul nous intéresse ici, ce qui nous permet de poser les hypothèses suivantes :

- Le véhicule se déplace longitudinalement,
- Le véhicule est considéré comme un solide ponctuel,

- Certaines dynamiques telles que le glissement des roues sur la chaussée sont négligées.

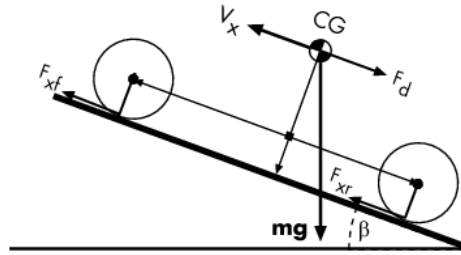


FIGURE I.10 – Les différentes forces agissant sur le véhicule.

Le principe fondamental de la dynamique donne :

$$m \frac{dV_x}{dt} = F_x - F_d - mg \sin \beta$$

Où :

$$F_x = n(F_{xf} + F_{xr})$$

$$F_d = \frac{1}{2} C_x \rho A V_x^2$$

avec :

$F_{xf}, F_{xr}$	Les forces longitudinales sur chaque roue au niveau des points de contact au sol avant et arrière
$F_d$	La force de traînée aérodynamique
$V_x$	La vitesse du véhicule
$A$	La surface frontale du véhicule
$\rho$	La masse volumique de l'air
$C_x$	Le coefficient de résistance aérodynamique
$m$	La masse du véhicule.
$n$	Le nombre de roues sur chaque essieu

TABLE I.3 – Paramètres du modèle dynamique du véhicule.

Le modèle Simdriveline est représenté à la figure I.11, il inclut aussi les pneus et les freins.

### I.6.3 Modèle du moteur thermique

Dans cette partie on présente le modèle du moteur à combustion interne. La première équation est obtenue par la loi de la conservation de la masse :

$$\dot{m}_a = \dot{m}_{maf} - \dot{m}_{cyl} \tag{I.1}$$

Tel que,  $m_a$  est la masse de l'air dans le collecteur d'admission (intake manifold) (figure I.12),  $m_{maf}$  est le taux de masse de l'air à l'entrée du collecteur et  $m_{cyl}$  est le taux de masse à la

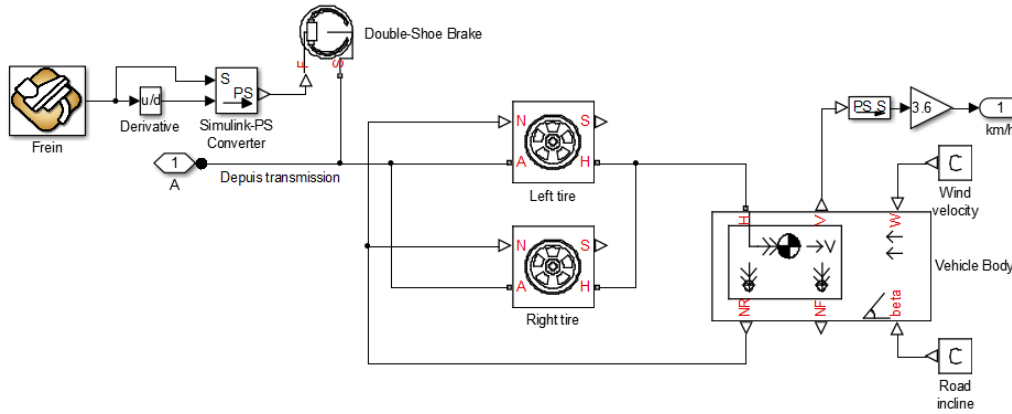


FIGURE I.11 – Modèle du corps du véhicule.

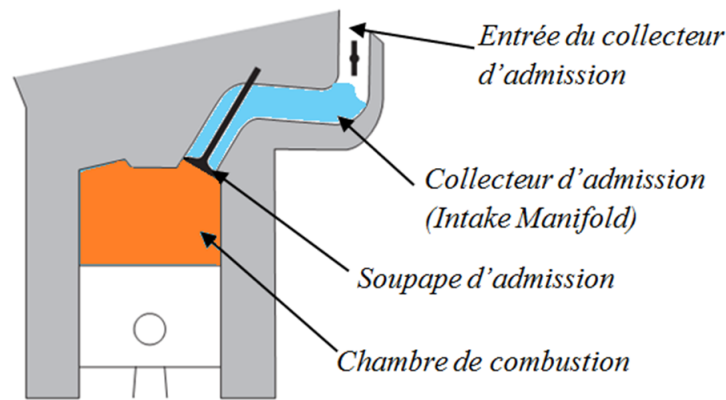


FIGURE I.12 – Admission d'air.

sortie du collecteur qui va vers la chambre de combustion dans le cylindre. La masse de l'air qui rentre dans le collecteur peut être modélisé par :

$$\dot{m}_{maf} = a_1 u_1 p_r \quad (\text{I.2})$$

Où  $a_1$  est une constante qui dépend du moteur,  $u_1$  est la valeur normalisé de la position de l'accélérateur, elle est comprise entre  $[0 : 1]$ ,  $p_r$  est l'influence normalisé de la pression :

$$p_r = \begin{cases} \sqrt{\left(\frac{p}{p_0}\right)^{1.428} - \left(\frac{p}{p_0}\right)^{1.714}} & \text{si } \frac{p}{p_0} > 0.528 \\ 0.259 & \text{sinon} \end{cases} \quad (\text{I.3})$$

Où  $p$  est la pression dans le collecteur d'admission,  $p_0$  est la pression atmosphérique ( $p_0 = 1\text{Bar}$ ). La pression  $p$  dans le collecteur d'admission, change selon l'équation suivante, qui est déduite de la dérivée de l'équation des gaz parfaits, en supposant que la température dans le collecteur est constante.

$$\dot{p} = k_m (\dot{m}_{maf} - \dot{m}_{cyl}) \quad (\text{I.4})$$

avec :

$$k_m = \frac{RT}{V_m}$$

$R = 287.9 Nm/kg$ ,  $K$  est la constante des gaz parfait  
 $T$  est la température du collecteur d'admission  
 $V_m$  est le volume du collecteur.

Il est plus pratique d'utiliser le rapport  $\frac{p}{p_0}$  comme variable d'état. Le rapport de pression  $\frac{p}{p_0}$  varie selon l'équation :

$$\frac{p}{p_0} = k_1(\dot{m}_{maf} - \dot{m}_{cyl}) \quad (I.5)$$

avec :

$$k_1 = \frac{T}{V_m T_0 \rho_0}$$

$\rho_0 = 1.2 kg/m^3$  est la densité atmosphérique

$T_0 = 288K$  est la température atmosphérique.

Le taux de masse dans la chambre de combustion peut s'écrire :

$$\dot{m}_{cyl} = k\omega \frac{p}{p_0} \quad (I.6)$$

avec :

$$k = \frac{\rho_0 T_0 V_{cyl} \eta}{4\pi T}$$

$\omega$  est la vitesse du moteur mesurée en  $[rad/s]$

$\eta$  est le rendement volumique (pour des raisons de simplicité on prend cette valeur constante,  $\eta = 0.8$ )

$V_{cyl}$  est le volume des cylindres. L'équation dynamique de rotation du moteur s'écrit :

$$J_e \dot{\omega} = T_{ind} - T_f - T_d - T_p \quad (I.7)$$

Où  $J_e$  est l'inertie du moteur,  $T_{ind}$  le couple développé par les pistons,  $T_f$  est le couple des frottements,  $T_p$  est le couple de la pompe et  $T_d$  est le couple de perturbation. Le couple développé par les pistons s'écrit :

$$T_{ind} = a_2 \frac{\dot{m}_{cyl}(t - t_d)}{\omega(t - t_d)} a_{fi}(t - t_d) f_s(t - t_s) \quad (I.8)$$

Où  $a_2$  représente la capacité maximale du couple.  $a_{fi}$  est l'influence normalisée de l'air sur le fuel, on la prend constante et égale à 1 pour cette démonstration,  $f_s(t - t_s)$  est la fonction de l'influence de la bougie d'allumage.

Remplaçant l'équation I.6 dans I.7 on trouve l'expression du couple développé par les pistons :

$$T_{ind} = a_2 k \frac{p(t - t_d)}{p_0} f_s(t - t_s) \quad (I.9)$$

$t_d = \frac{5.48}{\omega} t_s = \frac{1.3}{\omega} t_d$  et  $t_s$  sont respectivement le retard entre l'arrivée de l'air et le développement du couple, et le retard entre l'allumage de la bougie et le développement du couple.

La fonction  $f_s$  est définie par l'équation suivante :

$$f_s = (\cos(-b + u_2))^{2.875}$$

$b$  est le degré de décalage de l'allumage de la bougie, il se mesure en  $[rad]$  et  $u_2$  est la commande de ce décalage.

Le couple du frottement peut s'écrire

$$T_f = (a_{1f} + a_{2f}\omega + a_{3f}\omega^2) \frac{V_{1cyl}1000z}{4\pi}$$

Où les  $a_{if}$  sont des coefficients de frottement,  $V_{1cyl}$  est le volume d'un seul cylindre,  $z$  le nombre du cylindres. Le couple de la pompe peut être modélisé par :

$$T_p = (p_0 - p) \frac{V_{1cyl}z}{4\pi}$$

En regroupant les équations I.5 I.6 et I.7 on obtient le modèle du moteur :

$$\begin{cases} J_e \dot{\omega} &= a_2 k \frac{p(t-t_d)}{p_0} (\cos(-b + u_2))^{2.875} - T_f - T_d - T_p \\ \dot{m}_{cyl} &= k \omega \frac{p}{p_0} \\ \frac{\dot{p}}{p_0} &= k_1 (a_1 p_r u_1 - \dot{m}_{cyl}) \end{cases} \quad (I.10)$$

**Commande en couple du moteur :** Le couple du moteur peut être réglé par les deux commandes,  $u_1$  et  $u_2$ ,  $u_1$  est la commande de l'accélérateur et  $u_2$  est la commande de l'allumage des bougies. Le timing d'allumage des bougies peut être pris constant, car il n'a pas une grande influence sur la commande du couple, son influence est pour le raffinement de la commande seulement. Si on prend la commande des bougies comme constante ( $u_2 = 0$ ) dans I.9; le couple devient linéaire par rapport à  $\frac{p}{p_0}$ , et le rapport  $\frac{p}{p_0}$  est complètement commandable par  $u_1$ . On choisit la position de l'accélérateur  $u_1$  comme suit (Pour plus de détail le lecteur peut se conférer à [15]) :

$$u_1 = \frac{1}{a_1 p_r} k \omega \frac{p}{p_0} + \frac{1}{a_1 p_r k_1} \left( -\alpha_2 \left( \frac{p}{p_0} - \frac{p}{p_{0d}} \right) + \frac{\dot{p}}{p_{0d}} \right)$$

Le système I.10 est simulé avec la commande en couple  $u_1$ . A l'instant  $t = 30s$  on fait introduire une perturbation  $T_d = 10N.m$  (figure I.13).

On remarque que le couple suit exactement le couple de référence, et qu'il n'est pas affecté par la perturbation, par contre et comme la vitesse n'est pas réglée, une baisse de vitesse est observée à l'instant  $t = 30s$  où on envoi la perturbation.

**Consommation du carburant** La consommation du moteur thermique est déterminée en fonction du couple et du régime. Elle est donnée sous forme d'une cartographie matricielle construite à partir des tests réalisés sur banc d'essai. Elle relie la vitesse de rotation du moteur (en RPM) avec le couple du moteur et au point de croisement on trouve la consommation du carburant donnée en g/s, débit de carburant nécessaire pour produire le couple et la vitesse donnés.

#### I.6.4 Le modèle de la transmission

La transmission est une transmission automatique à quatre vitesses. Elle est composée de deux trains planétaires et cinq embrayages, qui constitueront les commandes en assurant le blocage ou la mise en marche de chaque composant pour produire les rapports de vitesses nécessaires(Figure I.14).

Le tableau I.4 donne la logique de commande des embrayages.

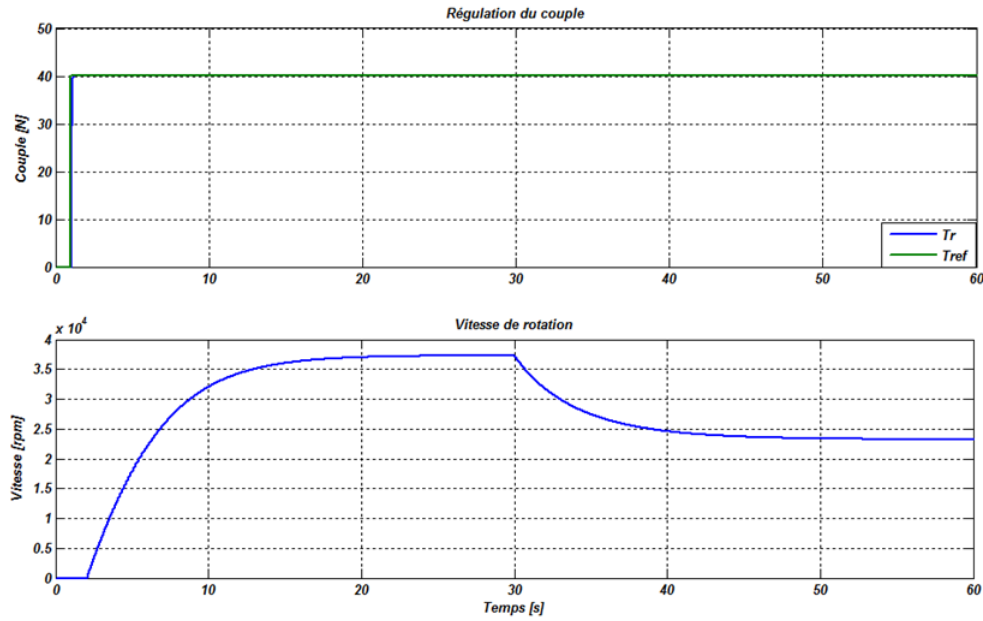


FIGURE I.13 – Couple + Vitesse du moteur.

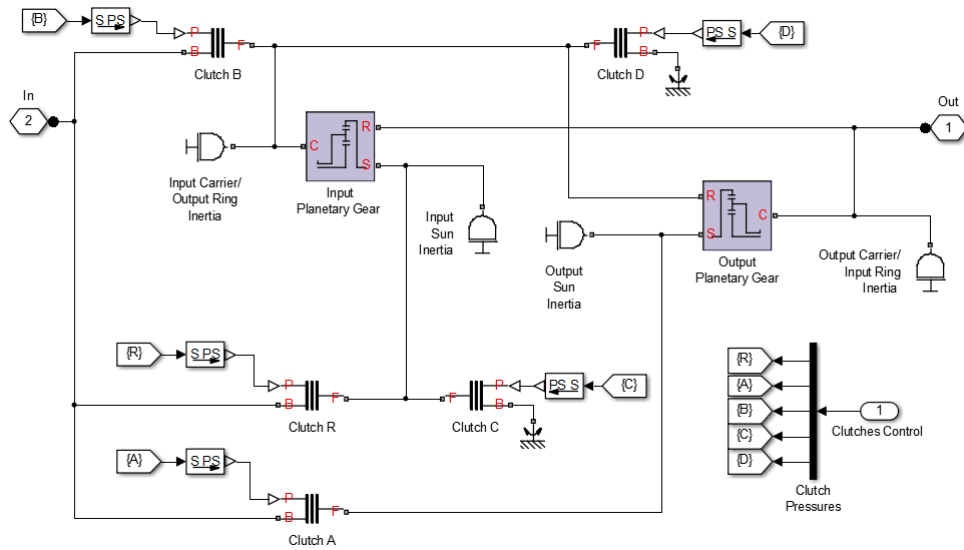


FIGURE I.14 – Modèle du véhicule.

### I.6.5 La simulation

Le modèle complet est représenté à la figure I.15. Pour les tests, on donne comme consigne un cycle de vitesse normalisé, dans notre cas se sera le cycle NEDC, et on observe les différentes sorties au niveau des différents blocks (figure I.17) ainsi que la consommation du carburant. Les commandes en accélération et en freinage sont données pour un modèle de conducteur qui est considéré comme un régulateur PI qui en agissant sur les deux pédales (accélérateur, et frein) corrige l'erreur entre la vitesse actuelle et la consigne.



Vitesse	Embrayage					
	A	B	C	D	R	
1	1	0	0	1	0	
2	1	0	1	0	0	
3	1	1	0	0	0	
4	0	1	1	0	0	
R	0	0	0	1	1	

TABLE I.4 – Commande des embrayages.

La figure I.16 montre qu'on a un bon suivi le long du cycle. L'erreur ne dépasse pas les 2 Km/h, et on trouve les pics d'erreurs au niveau du changement de rapport de transmission où la vitesse du véhicule diminue avant de reprendre le suivi. Notons aussi qu'aucune gestion d'optimalité n'est prise en compte, on ne cherche pas à placer le moteur dans sa plage de fonctionnement optimale, il répond uniquement au couple demandé par le véhicule.

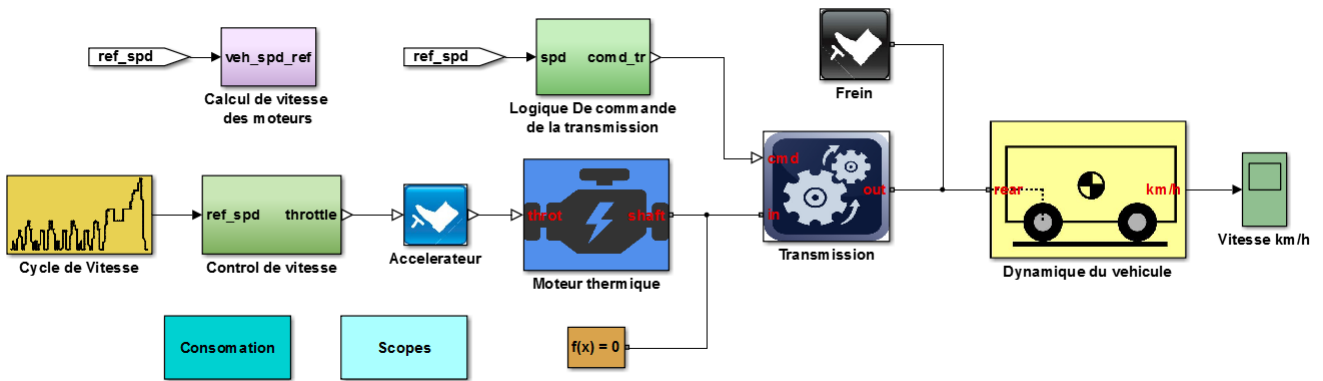


FIGURE I.15 – Modèle du véhicule thermique.

La consommation à la fin du cycle est de 8.113 L/100 km. Cette valeur sera prise comme référence pour juger le gain apporté par les méthodes de gestion d'énergie lors de l'hybridation.

## I.7 Conclusion

Après une définition et un état de l'art de la technologie des véhicules thermiques, un modèle contenant les principaux organes a été présenté dans ce chapitre, dont l'objectif était de disposer d'un outil de simulation de base permettant de tester facilement les performances du système et les comparer avec d'autres technologies.

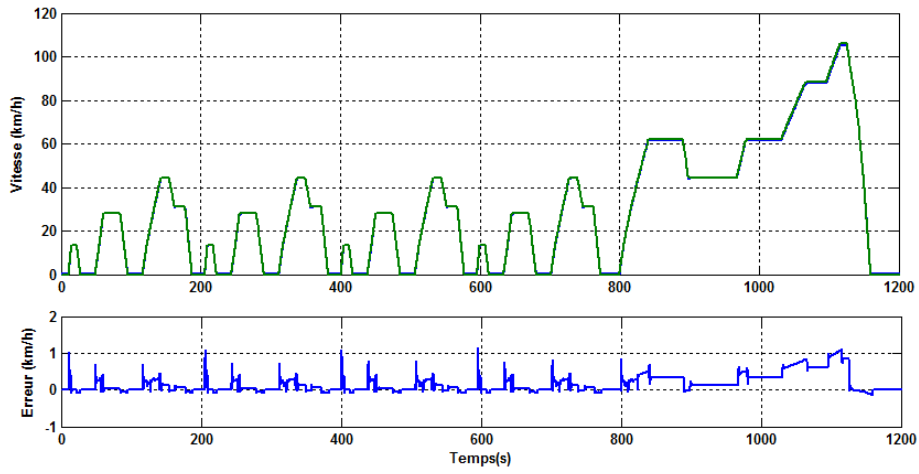


FIGURE I.16 – Vitesse du vehicule + erreur.

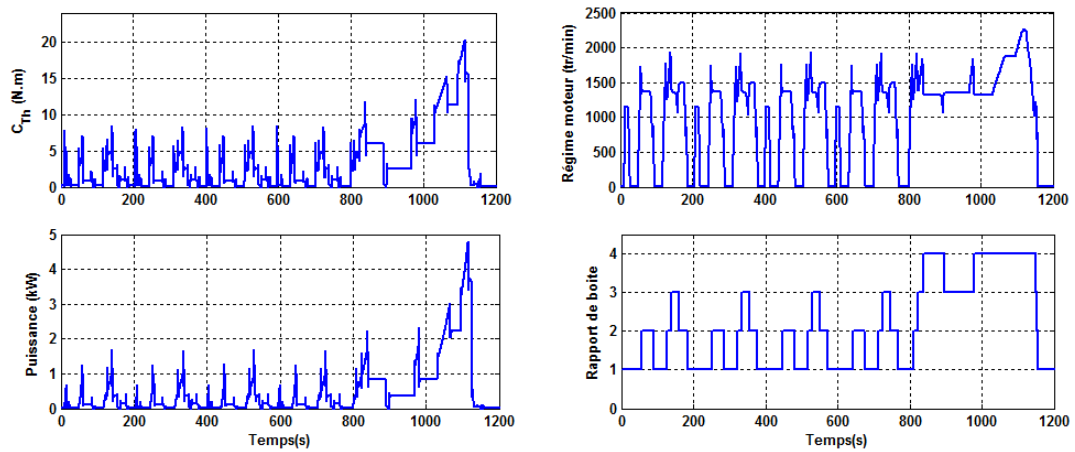


FIGURE I.17 – Graphes de simulation.

# Chapitre II

## La traction électrique

L'utilisation des moteurs électriques pour propulser les véhicules n'est pas une idée nouvelle en soi. En effet, les véhicules électriques sont connus dès 1890 où ils ont été utilisés jusqu'à la fin des années trente, période à partir de laquelle les véhicules à moteur thermique les supplantent en raison de leurs autonomies. Toutefois, les progrès techniques et les exigences environnementales ont permis la résurrection de cette technologie, et la propulsion électrique revient en force dans l'industrie automobile. Efficacité énergétique, haut niveau de rendement des moteurs, zéro émission, fiabilité, silence, tels sont les avantages de ce mode de propulsion. Ce chapitre passe en revue les différents moteurs électriques utilisés dans le domaine automobile, en mettant l'accent sur les moteurs à courant continu sans balais dont un modèle d'un système de traction électrique basé sur un tel moteur est développé et simulé à la fin.

### II.1 Machines utilisées dans le domaine de l'automobile

Les premiers moteurs électriques à alimenter les véhicules étaient des moteurs à courant continu, soit dans la version à excitation série, une solution qui était la référence pendant longtemps, soit plus récemment, dans la version à excitation séparée commandée par hacheur qui était d'ailleurs la solution adoptée par Peugeot pour la 106 électrique. Le choix de ce moteur était guidé par la facilité du pilotage en vitesse et son faible coût. Toutefois ces moteurs souffrent du problème de commutation qui est assuré mécaniquement par le collecteur et les balais, qui sont sujet à l'usure et demande un entretien régulier. Enfin, un rendement maximal de 90% rend ce modèle un peu obsolète pour son utilisation dans un véhicule électrique.

D'autres types de moteurs ont pu apparaître dans les applications automobiles avec l'émergence de nouvelles technologies en électronique de puissance, il s'agit des moteurs à courant alternatif. Le plus communément utilisé aujourd'hui est le moteur asynchrone qui présente un rendement assez élevé et une puissance massique importante. Dans ce moteur, le rotor tourne à une vitesse plus faible que celle du stator. L'écart de vitesse est caractérisé par le glissement. C'est ce glissement qui est la grande faiblesse des moteurs asynchrones : plus il est important, plus le rendement du moteur est faible.

De l'autre côté les moteurs synchrones présentent un glissement nul. Ils sont donc ceux vers qui se tournent aujourd'hui les constructeurs, avec de meilleurs rapports couple/poids et puissance volumique et avec des rendements supérieurs. Ils sont divisés en deux catégories : ceux à rotor bobiné et ceux à aimants permanents. Tandis que les bobinés ont un rotor aimanté à l'aide de courants, les moteurs synchrones à aimants permanents n'ont pas besoin d'enroulements au

rotor. Ils sont donc plus légers et n'ont plus de pertes joules au rotor. Ce dernier type de moteur peut donc paraître supérieur, mais les aimants permanents étant, comme de nombreuses terres rares, un matériau dont l'approvisionnement dépend énormément des conditions économiques et reste assez chère.

## II.2 Machine à courant continu sans balais

Les machines synchrones à aimant permanent, dont la forme de la force contre-électromotrice est trapézoïdale sont connues sous le nom de machines à courant continu sans balais [16].

La souplesse à la commande, la longue durée de vie due à l'absence de la commutation mécanique ainsi que la présence de moins de bruit acoustique sont les principaux avantages de ce moteur. Leur principal inconvénient est la nécessité d'avoir une électronique de contrôle. Mais cet inconvénient est dépassé grâce au progrès réalisé dans les domaines de l'électronique de puissance et l'arrivée de nouveaux calculateurs numériques très sophistiqués permettant de réaliser des variateurs performants [17].

### II.2.1 Constitution du moteur BLDC

Un moteur brushless comporte les mêmes éléments qu'un moteur à courant continu, excepté le collecteur, mais l'emplacement des bobines et des aimants permanents sont inversés. En effet, les moteurs Brushless sont constitués de trois éléments principaux (Figure II.1) :

**Le stator** C'est la partie fixe du moteur, elle est muni de trois groupes de bobines appelées les trois phases du moteur. Ces bobines fonctionnent comme des électro-aimants et permettent de générer diverses orientations du champ magnétique régulièrement réparties autour de l'axe central du moteur.

**Le rotor** C'est la partie tournante du moteur, elle est constitué d'un ou de plusieurs aimants permanents. Le nombre de pôles dans le rotor change d'une application à une autre. L'augmentation du nombre de pôles donne un couple plus élevé mais au détriment de la vitesse maximale produite.

**Les capteurs à effet hall** Les moteurs Brushless sont pourvus de capteurs à effet hall qui permettent de connaître à chaque instant la position des aimants du rotor.

### II.2.2 Principe de fonctionnement du BLDC avec l'électronique de pilotage

L'étude du moteur lui-même est indissociable de celle de l'électronique qui lui est associée. On a en fait une machine alternative qui est transformée en moteur à courant continu quand on y inclut les circuits électroniques assurant les commutations. L'électronique de pilotage détermine la position du rotor à partir des capteurs à effet hall. Elle en déduit l'orientation à donner au champ magnétique du stator. Au cours de la rotation, elle commande les trois bobines pour ajuster régulièrement l'orientation du champ à la position du rotor, de façon à entraîner celui-ci dans le sens choisi par l'utilisateur [17].

Les tensions des trois phases et le courant de phase idéal d'une machine à courant continu sans balais sont représentés dans la figure II.2, la forme des signaux des forces contre-électromotrices

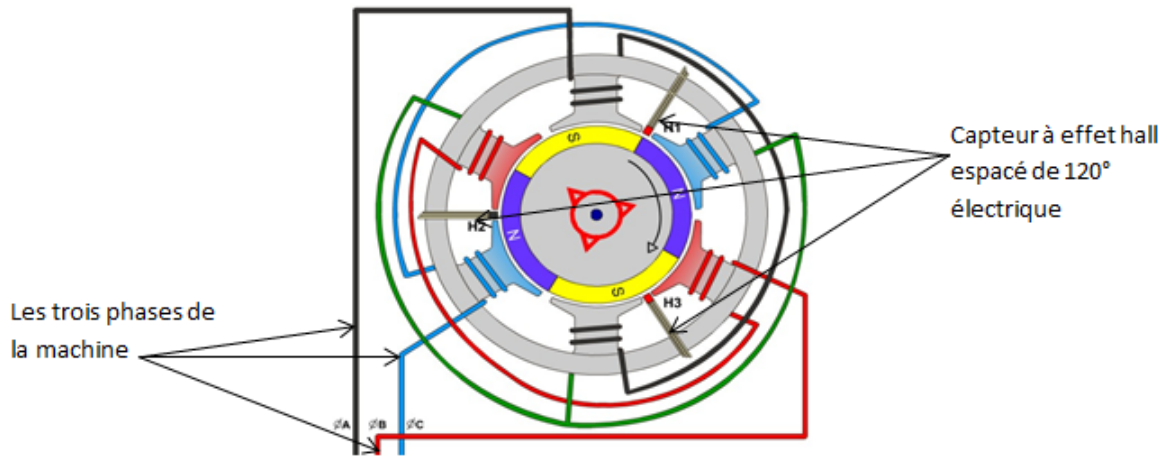


FIGURE II.1 – Machine brushless avec une paire de pôle

induites dépend de la position du rotor. Dans les moteurs à courant continu sans balais, on souhaite alimenter les enroulements par des courants en créneaux synchronisés avec la valeur maximale de la tension de la phase respective, afin d’obtenir un couple constant (Figure II.2) [16].

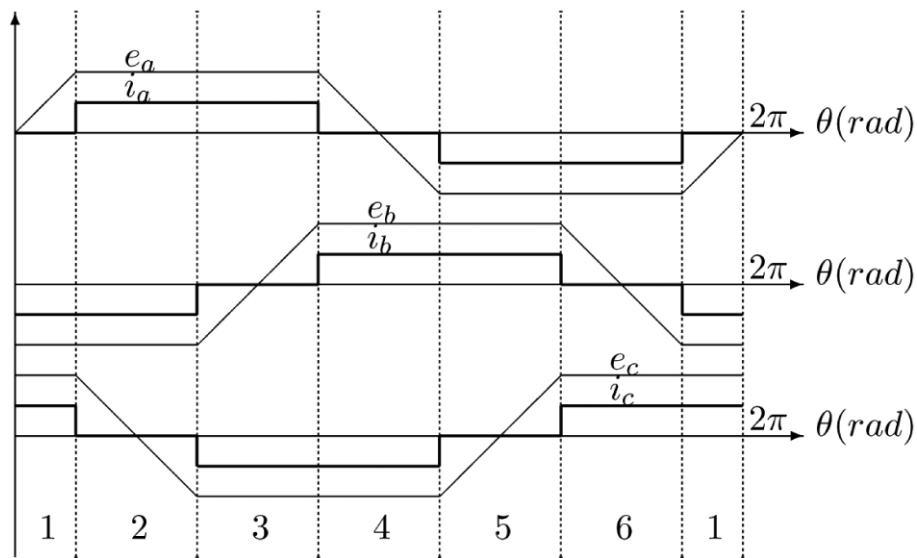


FIGURE II.2 – Courbe des forces électromotrices et des courants dans une machine triphasée.

### II.2.3 L’alimentation électronique du BLDC

La structure globale d’un moteur à courant continu sans balais comprend (Figure II.3) :

- des capteurs, munis éventuellement de circuits de mise en forme, qui permettent de connaître la position du rotor à tout instant notamment des capteurs à effet hall.
- un circuit logique qui élabore les commutations à appliquer aux différentes phases du moteur compte tenu des signaux issus des capteurs.

- un commutateur de puissance qui alimente les enroulements en fonction des informations reçues par la logique de commande.
- une commande de la tension ou du courant permettant d’agir sur la vitesse du moteur.

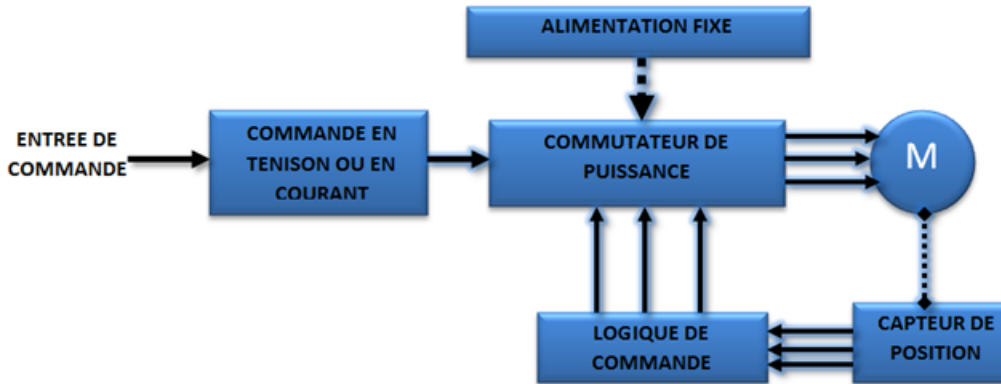


FIGURE II.3 – Structure générale de l’alimentation d’un moteur BLDC.

Les trois premières fonctions permettent d’effectuer les commutations assurées par le système balais-collecteur dans un moteur à courant continu classique tandis que la dernière est analogue à celle qui est utilisée pour la commande de ces mêmes moteurs [17].

## II.2.4 Modèle de la machine Brushless

L’aimant permanent dans le rotor peut être représenté par une source de courant constant, qui induit une force contre-électromotrice dans l’enroulement statorique (Figure II.4). Les trois phases de l’enroulement du stator sont supposées identiques et déphasées de  $120^\circ$  électrique. On suppose que les résistances et les self-inductances statoriques sont identiques.

Soient :  $R_s$  : résistance statorique des phases,

$L_{aa} = L_{bb} = L_{cc} = L$  : l’inductance des phases

$L_{ab} = L_{ac} = L_{bc} = M$  : l’inductance mutuelle des enroulements.

La loi des mailles donne :

$$\begin{pmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{pmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} L & M & M \\ M & L & M \\ M & M & L \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{pmatrix} \quad (\text{II.1})$$

La force contre-électromotrice est reliée au flux rotorique par la relation :

$$e = \frac{d\lambda}{dt} = \frac{d\lambda}{d\theta_r} \cdot \frac{d\theta_r}{dt}, \quad \lambda : \text{flux rotorique.}$$

Mais  $\frac{d\theta_r}{dt} = \omega_r$  qui est la vitesse de rotation, donc :

$$e = \frac{d\lambda}{(d\theta_r)} \cdot \omega_r$$

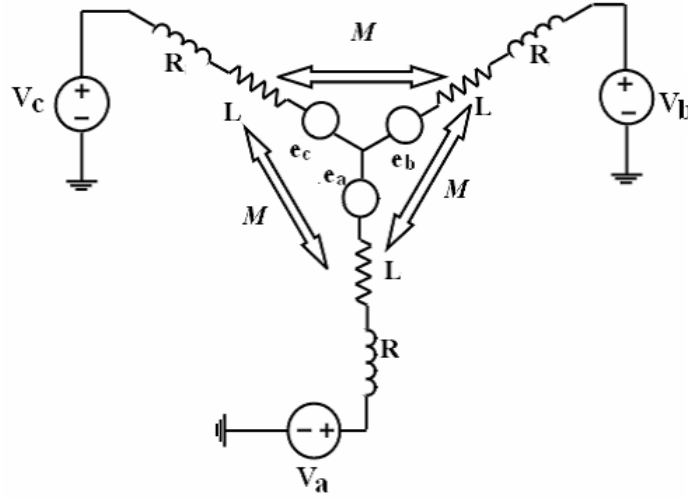


FIGURE II.4 – Modèle électrique simplifié du BLDC.

Puisque les enroulements du stator sont couplés en étoile, la somme des trois courants de phase est nulle  $i_a + i_b + i_c = 0$  alors  $i_a + i_b = -i_c$

Par conséquent, la tension prend la forme suivante :

$$\begin{pmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{pmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} L - M & 0 & 0 \\ 0 & L - M & 0 \\ 0 & 0 & L - M \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{pmatrix} \quad (\text{II.2})$$

**Remarque :** Le coefficient de l'inductance mutuelle  $M$  peut être exprimé en fonction du coefficient  $L$  : Quand les conducteurs d'enroulement sont massés dans la même encoche :  $M = -L/3$

La puissance électrique transmise au rotor est égale à la puissance mécanique disponible sur l'arbre du rotor. Cette égalité donne l'expression du couple électromagnétique pour la machine brushless :

$$T_e = \frac{e_a \cdot i_a + e_b \cdot i_b + e_c \cdot i_c}{\omega_r}$$

Pour la stratégie décrite en haut, où seulement deux courants de phase sont actives, la troisième étant inactive, l'expression du couple pour une intensité de courant identique dans les deux phases se simplifie à :

$$T_e = \frac{2e_{max} \cdot I}{\omega_r} \quad (\text{II.3})$$

On a utilisé  $e_{max}$  au lieu de  $e$  parce que les courants sont synchronisés avec la valeur maximale de la tension de la phase respective, si on suppose que le flux magnétique est linéaire par rapport à l'inductance :  $e = K \cdot \omega_r \frac{dL}{d\theta} \Rightarrow e_{max} = K \cdot \omega_r \frac{dL}{d\theta}_{max}$

$$e_{max} = K' \omega_r \quad (\text{II.4})$$

on remarque que les équations II.3 et II.4 sont identiques aux équations  $e = k.w$  et  $T = k.i$ , de la machine à courant continu classique. Donc le BLDC avec son électronique se comporte comme une machine à courant continu à balais.

Le modèle mécanique du moteur BLDC est donné par l'équation :

$$j \frac{d\omega_r}{dt} = T_e - f\omega_r - T_r$$

Où :

- $\omega_r$  : La vitesse angulaire [ $rad/s$ ]
- $T_e$  : Couple électro électromagnétique [ $Nm$ ]
- $T_r$  : Couple de charge [ $Nm$ ]
- $f$  : Coefficient de frottement [ $N.m.s$ ]
- $J$  : Inertie [ $kg.m^2$ ]

### II.2.5 Le commutateur

Le commutateur assure l'alimentation de la machine triphasée à partir de la source continue. Il existe deux types de montage, l'alimentation bidirectionnelle et l'alimentation unidirectionnelle. La figure II.5 montre un circuit d'alimentation bidirectionnelle.

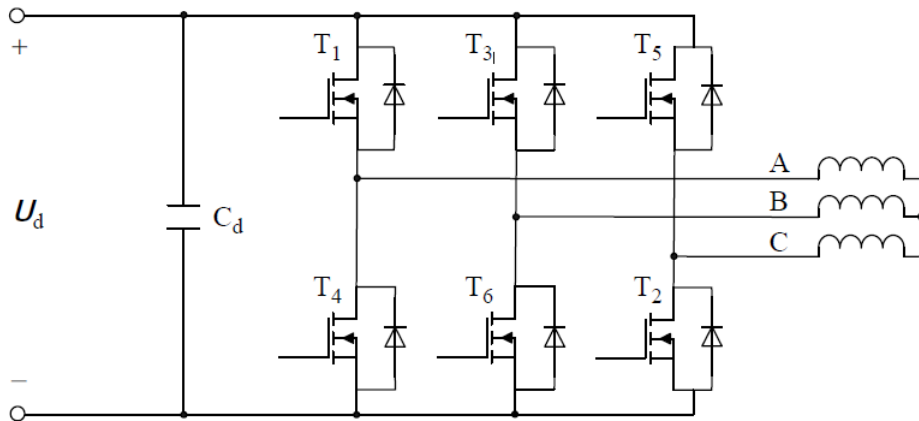


FIGURE II.5 – Commutateur full bridge .

L'ordre de la commutation des transistors, qui alimentent les trois phases de la machine, est donné par les signaux produits par les capteurs à effet hall [18]. En effet, les capteurs à effet hall envoient des signaux binaires selon la direction du champ. Si le champ est positive (Nord) ils renvoient un '1' sinon (le champ est Sud) ils renvoient un '0'. La commutation des transistors se fait selon la logique suivante :

$$\begin{aligned} C1 &= h1\bar{h}2 & C'1 &= \bar{h}1h2 \\ C2 &= h2\bar{h}3 & C'2 &= \bar{h}2h3 \\ C3 &= h3\bar{h}1 & C'3 &= \bar{h}3h1 \end{aligned}$$



## II.3 Batteries

Les véhicules électriques, tout comme les véhicules thermiques, ont besoin d'une unité de stockage d'énergie. L'analogie d'un réservoir à carburant est les batteries accumulateurs d'énergie électrique. Les batteries sont au cœur des préoccupations actuelles de nombreux constructeurs car elles représentent la clé des performances et du prix de vente de ces modèles. La multiplication de nouveaux acteurs sur le marché automobile génère une demande importante. Depuis EV1 de General Motors et ses batteries NiMh, depuis les 106 ou Saxo et leurs batteries NiCd, à la fin des années 90, la production de packs de batteries spécifiques aux VE est passée des phases pilotes à l'industrialisation de masse. Simultanément à l'arrivée de la technologie des cellules au Lithium, on a constaté une croissance vertigineuse des capacités de production. Les constructeurs des batteries sont en compétition pour équiper les véhicules électriques. Cette diversité permet une large palette de choix aux concepteurs [19].

### II.3.1 Les différentes technologies utilisées

Les batteries pour véhicules électriques (et hybrides) sont classées dans la catégorie des batteries de traction, appelées aussi batteries de puissance [20]. Les batteries sont comparées par rapport à leur densité de puissance, qui est définie comme étant la quantité d'énergie électrique qu'une batterie contient dans un Kilogramme (Wh/Kg). Un autre critère déterminant pour comparer les performances des batteries est leurs durées de vie. En effet, les performances d'une batterie se dégradent en fonction du temps et certaines technologies sont beaucoup plus endurantes que d'autres. Le critère utilisé est le nombre de cycles de charge et décharge (Figure II.6).

**Plomb-Acide (PB) :** Ce sont les plus simples de conception et de fabrication. Les processus de production sont bien maîtrisés, les industriels les produisant innovent pour les rendre plus performantes face à la concurrence des autres technologies. Elles sont lourdes et peu puissantes, leur densité énergétique est d'environ  $50Wh/kg$ , mais ont pour avantage leur prix.

**Cadmium-Nickel (Ni – Cd) :** Ces batteries ont été couramment utilisées depuis une quinzaine d'années dans les appareils portatifs. Elles sont très endurantes et ont une densité énergétique supérieure aux batteries Plomb-Acide. Toutefois, elles contiennent des substances dangereuses, à savoir le Cadmium qui est un élément toxique. Un autre inconvénient est leur "effet mémoire"<sup>1</sup> qui nécessite des décharges profondes régulières pour maintenir leur capacité maximale. Ces accumulateurs sont peu répandus et réservés à des applications spécifiques.

**Nickel-Métal Hydrure (Ni – MH) :** Ces batteries sont apparues, dans un premier temps, dans l'outillage sans fil et la téléphonie. Elles peuvent stocker deux fois plus d'énergie que les batteries au plomb et 35 % de plus que les Nickel/Cadmium à poids égal. C'est ce type de batterie qui a été choisie pour équiper la plupart des voitures hybrides (notamment par Toyota).

---

1. L'effet mémoire est un phénomène physico-chimique qui altère la capacité des batteries si elles ne sont pas complètement déchargées avant d'être rechargées. En effet, si la batterie subit un cycle de charge avant d'être complètement déchargé, la batterie finira par ne plus pouvoir se décharger en deçà du seuil où elle a été remise à charger. La batterie se comporte comme si elle conservait la « mémoire » du seuil de décharge et refuse de se décharger davantage [20].

**Lithium et dérivés :** Plusieurs technologies composent la famille des batteries au Lithium. Elles occupent aujourd'hui une place prédominante sur le marché de l'électronique portable, et sont de plus en plus utilisées dans les VE. La technologie Lithium-ion (*Li-ion*) est la plus courante et présente une densité d'énergie élevée, de l'ordre de  $160Wh/kg$ , ainsi que l'absence d'effet mémoire. D'autres technologies au Lithium existent et présentent des caractéristiques intéressantes, à savoir le Lithium Polymère (*Li-Po*) et le Lithium-phosphate (*LiFePO4*) qui arrivent à des densités d'énergies de  $200Wh/kg$ .

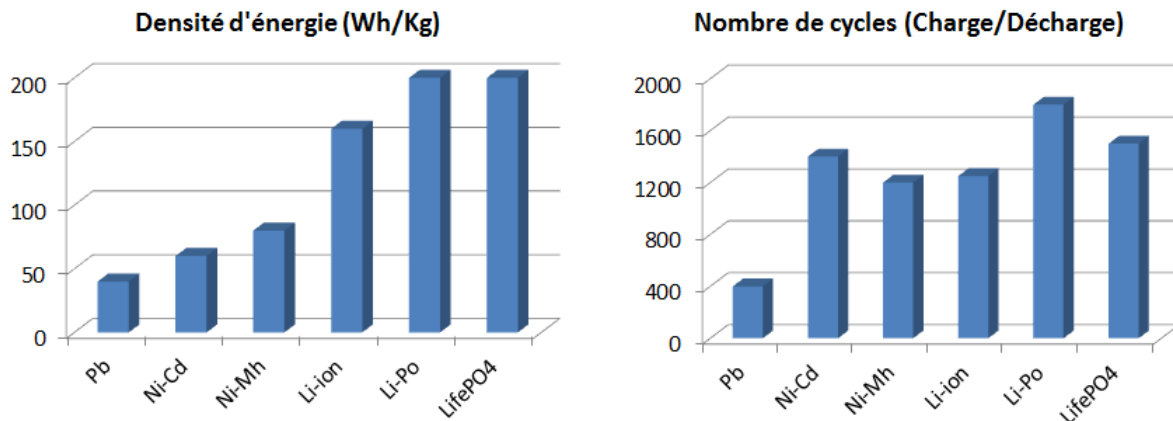


FIGURE II.6 – Différence entre les types de batteries.

### II.3.2 Etat de charge de la batterie

L'état de charge de la batterie (State Of Charge « SOC ») exprime le taux de charge restant dans la batterie, il est défini comme étant le ratio entre la capacité à l'instant  $t$ ,  $Q(t)$  et la capacité nominale de la batterie  $Q(n)$ .

$$SOC(t) = \frac{Q(t)}{Qn}$$

Alors que la mesure du carburant restant dans un véhicule thermique est un problème assez simple, il se limite à la mesure du niveau du liquide dans le réservoir, mesurer le SOC avec précision est une tâche très complexe et difficile à mettre en œuvre, d'une part parce que les modèles de batterie sont limités et d'autre part, parce que les paramètres varient en fonction du temps et de la température. Dans ce cas on a plutôt recours à des estimateurs. Plusieurs méthodes d'estimation existent utilisant différentes approches [21], entre autres, l'intégration du courant de décharge [22], calcul de la tension du circuit ouvert [23], filtre de Kalman [24], réseaux de neurones [25]. On définit aussi la profondeur de charge de la batterie comme étant le taux de la charge utile restant, car les courants forts expireraient la charge de la batterie plus prématurément.

### II.3.3 Modèle de la batterie

La littérature propose une variété de modèle électrique pour les batteries ([24] [26]) mais le modèle le plus utilisé est celui qui considère la batterie comme un générateur de tension parfait

( $E_B$ ), en série avec une résistance ( $R_B$ )(Figure II.7) [27].

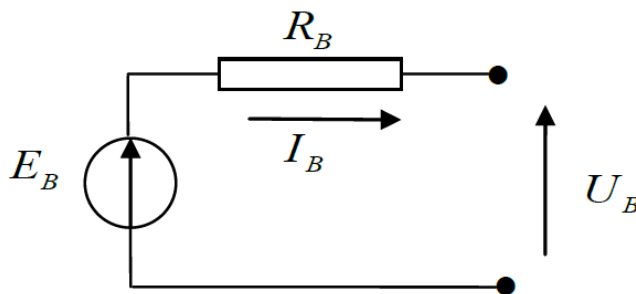


FIGURE II.7 – Modèle simplifié de la batterie.

Le modèle prend en considération les non-linéarités des composants, et leur dépendance de certains paramètres comme, l'état de charge de la batterie ("SOC"), la profondeur de charge ("DOC") et la température ambiante [28].

## II.4 Identification de la chaîne de traction électrique

### II.4.1 Introduction

Les procédés industriels sont des systèmes très complexes et difficiles à piloter. C'est pour cela qu'il est impératif de posséder un modèle représentatif qui permet leur étude et analyse, afin d'en tirer leurs caractéristiques et leurs particularités. Cette connaissance une fois acquise, il est par la suite possible de déterminer la commande adéquate qui répond au mieux aux exigences de cahier des charges. L'acquisition de cette connaissance est le rôle de l'identification. L'identification est l'opération de détermination des caractéristiques dynamiques d'un procédé dont la connaissance est nécessaire pour la conception et la mise en œuvre d'un système performant de régulation [29].

En pratique, les systèmes complexes sont approximés par des modèles plus simples, souvent linéaires stationnaires autour d'un point de fonctionnement. Cette approximation permet d'appliquer les méthodes d'identifications classiques qui sont des approches bien maîtrisées. Toutefois, l'évolution rapide de l'outil informatique a permis de développer des méthodes d'identifications numériques plus puissantes qui superforment les méthodes classiques.

Il existe aussi d'autres méthodes plus modernes, comme celles utilisant les réseaux de neurones artificiels. Ces derniers permettent, grâce à leur propriété d'« *approximateurs universels* » [30] de reproduire le comportement des systèmes les plus complexes. Ils sont utilisés dans la modélisation des systèmes non linéaires.

Pour certains systèmes, il est possible d'établir le modèle à partir des connaissances physiques, chimiques, biologiques ou autres : une telle représentation est appelée modèle de connaissance, modèle boîte blanche ou modèle théorique. Il est cependant très difficile, voire parfois même impossible d'établir de tels modèles pour des systèmes complexes.

La démarche la plus courante est l'établissement d'un modèle boîte noire (modélisation expérimentale), basé sur les informations recueillies sur le fonctionnement du système, notamment

les mesures faites sur les variables. Le choix des relations qui expliquent le fonctionnement du système est alors guidé par deux objectifs contradictoires :

- la relation doit être suffisamment complexe pour représenter le plus fidèlement possible le système ;
- la relation doit être suffisamment simple de sorte que l'estimation paramétrique ne soit pas très coûteuse en temps de calcul.

La difficulté d'une modélisation de type boîte noire est de trouver un compromis entre ces deux objectifs contradictoires [31].

Dans ce qui suit on va procéder à l'identification du système de traction électrique et déterminer les paramètres du moteur. La chaîne de traction électrique est constituée essentiellement de la roue motrice qui est solidaire au rotor du moteur, le commutateur de puissance et le convertisseur d'énergie (hacheur abaisseur), comme il est montré dans la figure II.8. La roue est

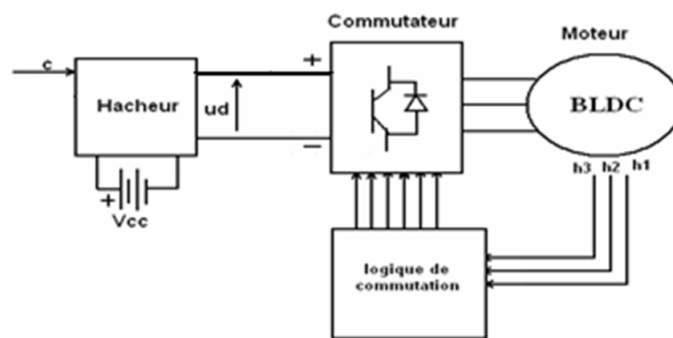


FIGURE II.8 – Schéma de commande du moteur brushless.

solidaire au rotor du moteur, donc on peut considérer la roue comme un moteur dont l'inertie est celle du rotor plus celle de la roue.

Les paramètres du moteur sont : la résistance interne  $R$ , la self inductance  $L$ , l'inductance mutuelle  $M$ , l'inertie du moteur  $J$ , le coefficient des frottements visqueux  $f$ , le couple des frottements statiques  $T_f$  et la constante de tension  $ke$ .

Le hacheur peut être représenté par un système du premier ordre  $\frac{G}{(1+T_c s)}$ , où  $G$  est le gain du convertisseur, et  $T_c$  est la constante du temps ou le retard du convertisseur.

Pour l'identification de ces paramètres il existe deux approches :

**L'approche classique :** Où on utilise les méthodes d'électrotechniques.

- Mesure de la résistance et de l'inductance : La résistance est mesurée par un ohmmètre placé entre les phases. On divise la valeur trouvée sur deux pour avoir la valeur de la résistance d'une phase. La mesure de l'inductance se fait par un RLC mètre.
- Mesure du frottement et de l'inertie : Pour mesurer l'inertie et le frottement d'un moteur on fait tourner le moteur à vitesse donnée ' $\omega_{r_0}$ ' puis on coupe l'alimentation et on enregistre la courbe de la vitesse.

Théoriquement cette courbe est décrite par l'équation :

$$J \frac{d\omega_r}{dt} = T_e - f\omega_r - T_r$$

$T_e = 0, T_r = 0$  ;(aucun couple moteur. On néglige le couple résistant)

$$J \frac{d\omega_r}{dt} = -f\omega_r \Rightarrow \frac{d\omega_r}{\omega_r} = -(f/J)dt \Rightarrow \omega_r = \omega_{r0}(e^{-(\frac{f}{J})t})$$

Les frottements peuvent être dérivés de la même équation. Au régime permanent l'accélération de la vitesse est nulle ce qui donne :

$$T_e - f\omega_r - T_r = 0$$

Si on néglige les couples résistants, on obtient :

$$T_e - f\omega_r = 0 \Rightarrow f = \frac{T_e}{\omega_r} \Rightarrow f = I.V. \frac{\sqrt{3}}{\omega_r^2}$$

**L'approche de l'automatique :** Malgré que les méthodes classiques donnent les valeurs exactes des paramètres, aux erreurs de mesure près, elles ne sont pas adaptées pour notre cas, car notre système n'est pas composé du moteur uniquement mais contient aussi d'autres éléments (pneu, convertisseur,... ) qui lui sont indissociables. Dans ce cas on utilise les méthodes d'indentifications de l'automatique qui seront traitées dans ce chapitre.

## II.4.2 Banc d'essai

Le banc d'essai de la chaîne de traction électrique du véhicule hybride est présenté dans la figure II.9.

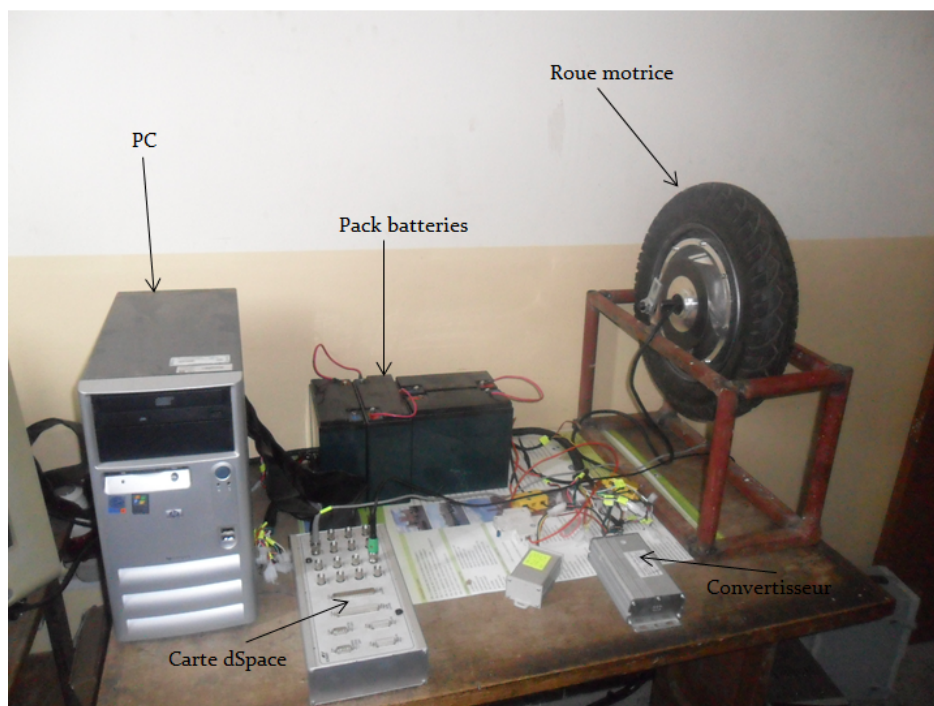


FIGURE II.9 – Banc d'essai de la traction électrique.

Pour la commande et l'acquisition des données, le moteur est connecté à l'ordinateur par le

biais de la carte d'acquisition et de commande dSpace.

Le système dSpace (Digital Signal Procession And Control Engineering) est un outil de prototypage rapide. Le prototypage rapide signifie que les algorithmes de commandes sont implémentés en temps réel, donc les stratégies de commande peuvent être testées directement en pratique. L'environnement de travail de la carte dSpace est Simulink/Matlab, dans lequel on réalise un modèle de commande, et une fois que nous sommes satisfait des résultats de simulation, on teste le contrôleur sur le système réel. Cela est effectué en remplaçant les entrées et les sorties de ce modèle par les sorties et les entrées de la carte dSpace(figure II.10).

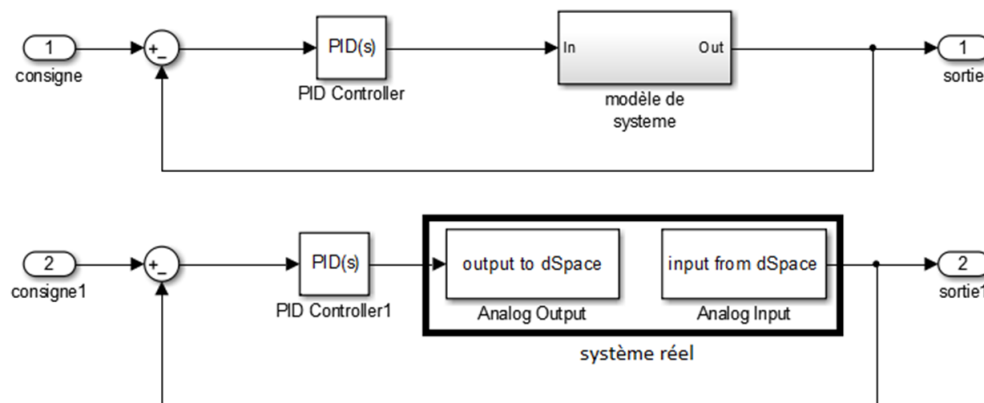


FIGURE II.10 – Commande par dSpace.

Pour faire l'étude de notre système, le signal d'entrée, pour notre cas c'est la tension que produit l'accélérateur, qui est intercepté et remplacé par une sortie analogique de la carte dSpace. Les capteurs à effet hall du moteur sont exploités et utilisés pour la mesure de la vitesse de rotation(figure II.11).

### II.4.3 Etude du système

Avant d'appliquer les méthodes d'identifications relevant de l'automatique sur un processus, une étude au préalable est nécessaire, pour avoir une idée sur l'ordre des grandeurs des signaux d'entrées et de sorties du système, et si nécessaire installer des limiteurs.

La figure suivante montre un schéma d'acquisition des données :

Les données relevées sont entachées de bruits et afin de pouvoir les exploiter on doit tout d'abord procéder à un filtrage. Avant de choisir le filtre, on fait une analyse fréquentielle du signal et on choisit le filtre qui élimine les bruits des hautes fréquences sans altérer le signal utile. Pour notre cas on a utilisé un filtre passe bas d'ordre trois(figure II.13).

#### II.4.3.1 Simulation en boucle ouverte

Une fois les données acquises, on commence par étudier le comportement du système global en boucle ouverte. Pour ce faire, on envoie un échelon de tension en entrée comme référence, et on observe la sortie.

A partir de la figure II.14, on remarque que le système présente un retard pur de 0.182 secondes.

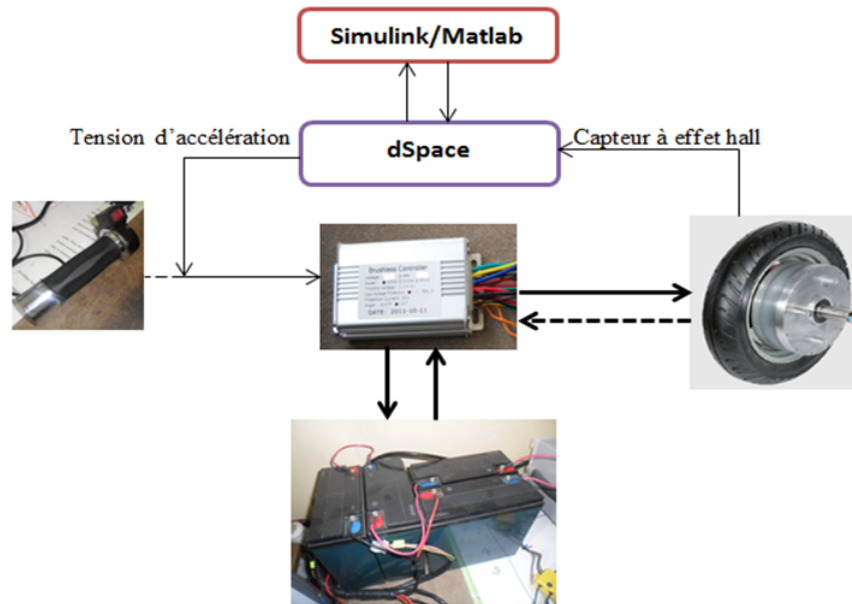


FIGURE II.11 – Système globale de commande.

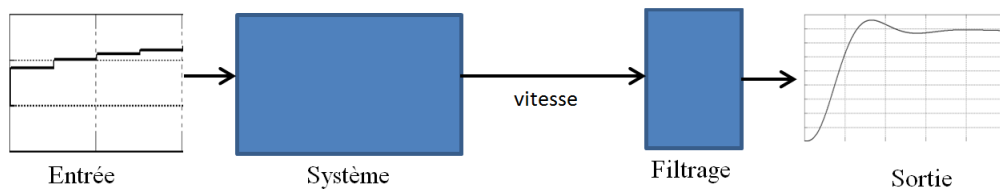


FIGURE II.12 – Schéma d'acquisition de données.

D'après la forme de la réponse on en déduit que le système est d'ordre supérieur à deux.

### II.4.3.2 Caractéristique statique

Une deuxième approche serait de tracer la caractéristique statique du système, qui montre la linéarité entre l'entrée et la sortie.

Pour tracer cette caractéristique on donne un signal d'entrée en escalier ou bien une succession de signaux en échelon à différents niveaux, et à chaque niveau la sortie doit atteindre le régime permanent (figure II.15). Puis on trace la courbe de la sortie par rapport à l'entrée en prenant comme valeurs, les valeurs atteintes au régime permanent.

On remarque à partir de la figure II.16 que le système présente des non linéarités de type saturation entre les valeurs de signal d'entrée [0V, 1.45V], et de [3.5V, 5V].

La caractéristique statique entre les valeurs [1.45V, 3.5V] est presque linéaire, cela est dû aux non linéarités qui sont liées à la constitution de la machine elle-même, où la forme des forces contre électromotrices est trapézoïdale.

Dans un premier lieu on peut considérer le système comme linéaire dans la plage [1.45V, 3.5V]

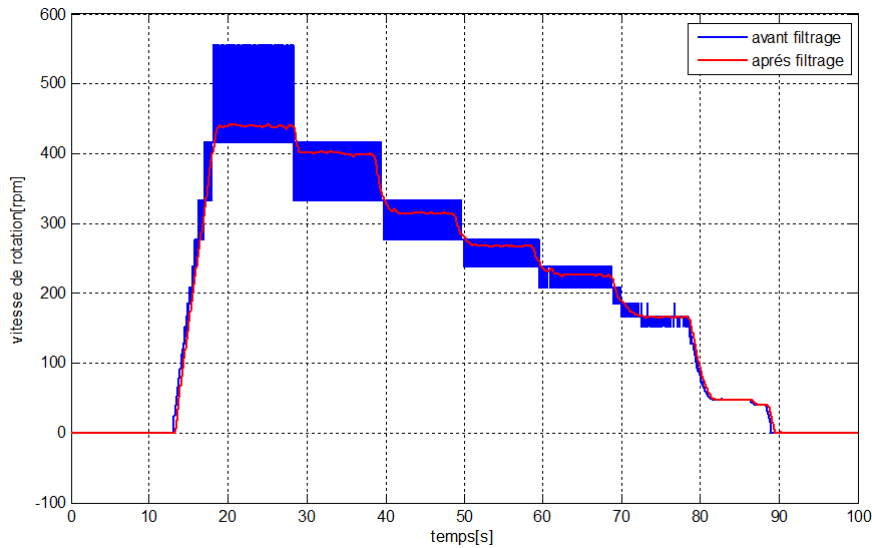


FIGURE II.13 – Filtrage du signal.

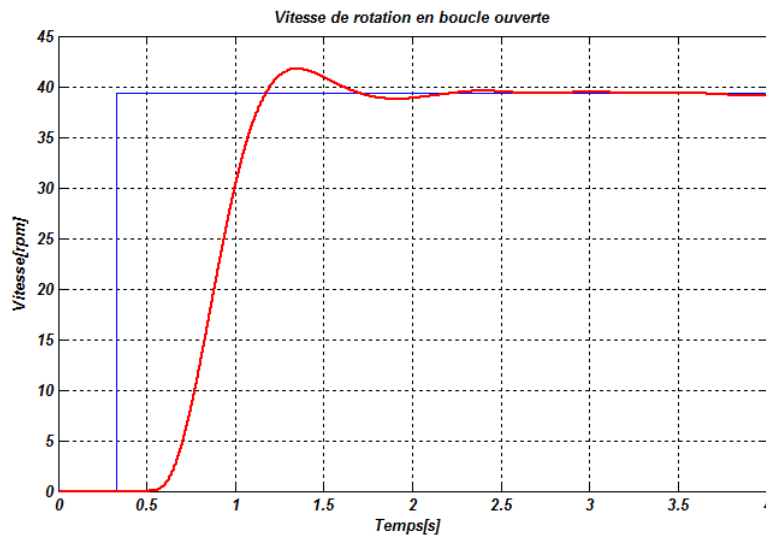


FIGURE II.14 – Réponse du système en boucle ouverte

et utiliser les méthodes d'identifications des systèmes linéaires.

#### II.4.4 Estimation des paramètres par les méthodes numériques

Outre les méthodes classiques de l'électrotechnique qui permettent la mesure directe des paramètres du moteur, une autre approche serait d'utiliser les algorithmes d'optimisation globale pour trouver des estimés des paramètres du système afin de minimiser l'écart entre la réponse du modèle et celle du système réel. Cette méthode est favorable dans notre cas, car nous possédons un modèle de connaissance du système.

Cette technique est basée sur la recherche d'une direction de l'espace des paramètres suivant



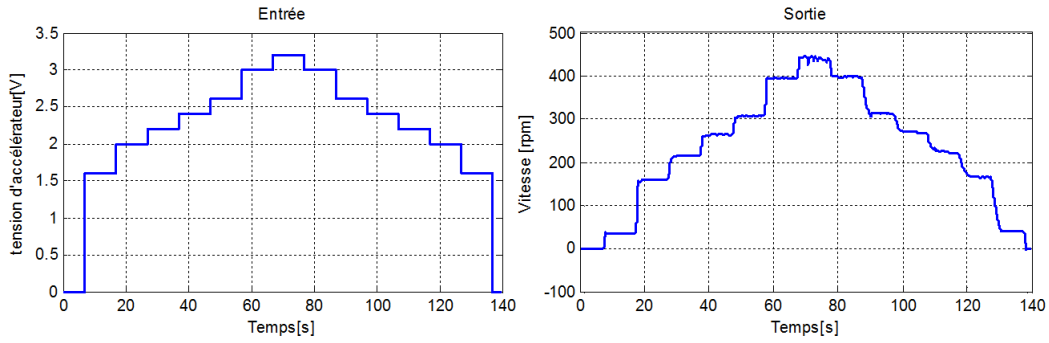


FIGURE II.15 – Entrée/Sortie du système.

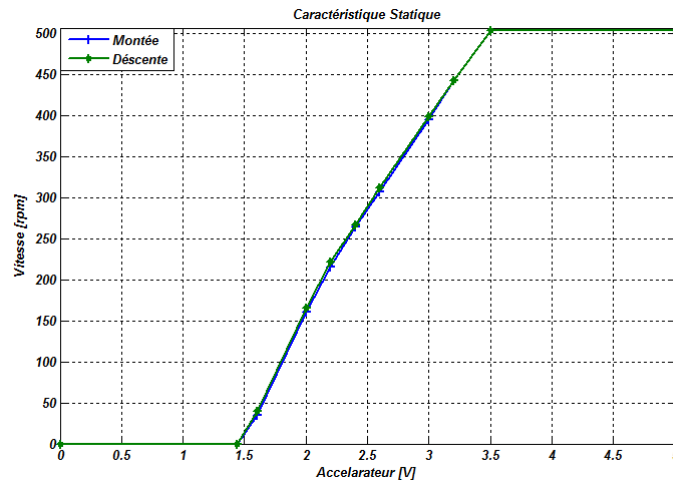


FIGURE II.16 – Caractéristique statique du système.

laquelle le critère  $J$  diminue. La modification pas à pas de  $\theta$  dans cette direction est donnée par :

$$\hat{\theta}_{k+1} = \hat{\theta}_k - \mu_k \underline{d}_k$$

$\hat{\theta}_k$  : L'estimée de  $\theta$  à l'itération  $k$ .

$\mu_k$  : Le pas de recherche.

$\underline{d}_k$  : La direction de recherche dans l'espace des paramètres.

Il existe différentes méthodes d'optimisation selon le choix de la direction de recherche  $\underline{d}_k$ . Ces méthodes font intervenir le Gradient ou le Hessien du critère  $J$ . Il est donc nécessaire que le critère  $J$  possède des dérivées premières ou des dérivées secondes selon le cas.

La méthode la plus simple qu'on trouve dans la littérature, est la méthode du gradient.

$$\hat{\theta}_{k+1} = \hat{\theta}_k - \mu \underline{G}_k$$

$\underline{G}_k$  est le gradient du critère  $J$  à  $\hat{\theta}_k$

$$\underline{G}_k = \nabla(J_k) = \left. \frac{\partial J}{\partial \theta} \right|_{\theta=\hat{\theta}}$$

D'après l'étude de la commande des moteurs sans balais, on trouve qu'ils sont constitués du moteur, son commutateur, un filtre LC pour le lissage du courant et un hacheur réversible en courant pour diriger le courant dans le sens inverse dans les phases de freinage II.17. Le hacheur est commandé par la modulation de la largeur d'impulsion (PWM).

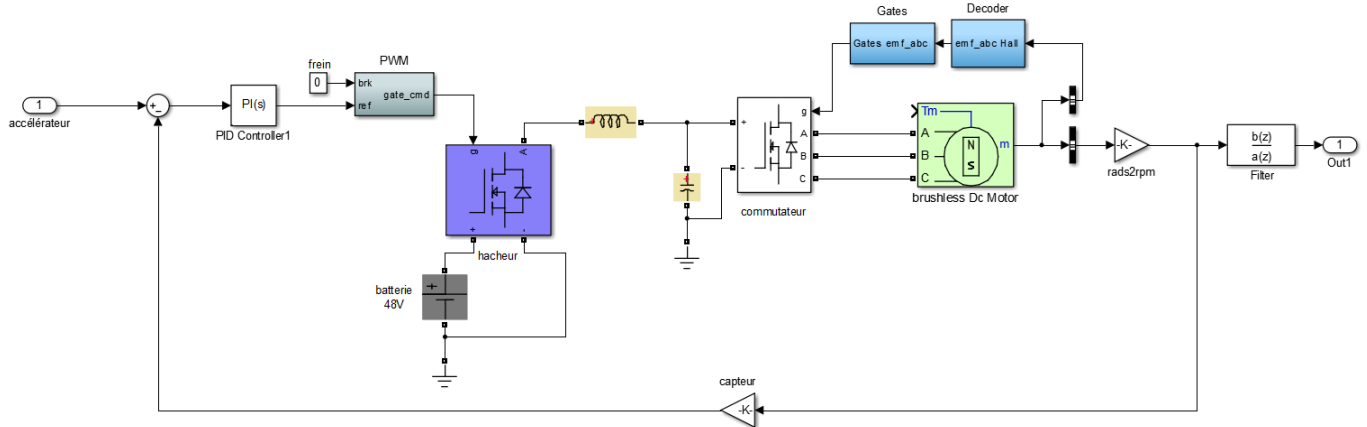


FIGURE II.17 – Modèle électrique.

En utilisant l'algorithme du gradient pour minimiser la somme des carrés de l'erreur, on obtient les valeurs des paramètres du modèle II.1.

Paramètres	Valeurs
Inertie $J$ [ $kg.m^2$ ]	0.004
Frottement $f$ [N.m.s]	0.00065
Couple des frottements statiques $T_f$ [N.m]	0.0165
Résistance interne $R_s$ [ $\Omega$ ]	3.644
Inductance interne $L_s$ [H]	0.0215
Constante de tension $K_e$	3
Gain du convertisseur $G_c$	10
Constante de temps du convertisseur $T_c$ [s]	0.052
Gain proportionnel $K_p$	5.81
Gain intégral $K_i$	1.98

TABLE II.1 – Paramètres du système.

A partir des graphes de simulation (figure II.18), on remarque que le modèle identifié imite bien le système pour les données d'identifications. Pour les données de validation le modèle donne aussi de bon résultats. On note toutefois une erreur un peu plus importante à la dernière phase de freinage, ceci est dû probablement à une gestion du frein récupératif au sein du convertisseur.

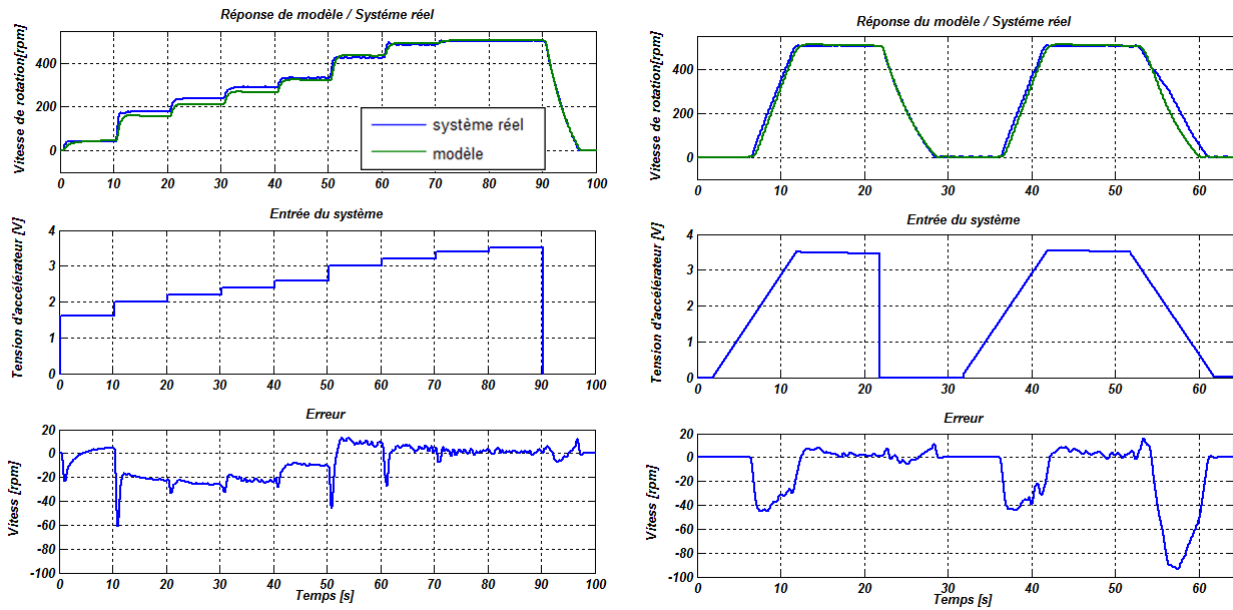


FIGURE II.18 – Résultats de simulation de la méthode numérique.

## II.4.5 Identification par un modèle linéaire

Dans la plupart des cas, les systèmes non-linéaires peuvent être représentés par un système linéaire à proximité d'un point de fonctionnement. Il existe plusieurs représentations des systèmes linéaires : représentation d'état, fonctions de transfert, représentation polynomial (ARX, ARMAX,...).

### II.4.5.1 Méthode des moments

**II.4.5.1.1 Principe** Parmi les méthodes analytiques, la méthode des moments est l'une des approches les plus utilisées dans l'identification des modèles linéaires en vue de sa simplicité. On appelle moment d'ordre  $k$  d'une fonction  $f(t)$ , la quantité :

$$M_k = \frac{(-1)^k}{k!} \times \int_0^\infty t^k f(t) dt, \quad k = 0, 1, 3, \dots$$

La méthode des moments, comme son nom l'indique, est basée sur le calcul des moments d'une fonction  $f(t)$ . Cette fonction peut être la réponse impulsionnelle du système ou la réponse indicielle, ou bien n'importe quelle fonction : dans ce cas on parle de la méthode des moments généralisés.

Pour l'identification de notre système on a choisit une structure polynomiale comme suit :

$$H(s) = \frac{K}{1 + A_1 s + A_2 s^2 + \dots + A_n s^n}$$

Et comme fonction 'f(t)' on prend l'erreur de la réponse indicielle  $y(t)$  du système :

$$f(t) = e(t) = 1 - \frac{y(t)}{K}$$

$K$  : la valeur atteinte au régime permanent suite à un signal d'entrée en échelon d'amplitude unitaire.

On définit la transformée de Laplace de l'erreur  $e(t)$  :

$$E(s) = \sum_{k=0}^{\infty} M_k = M_0 + M_1s + M_2s^2 + \dots \quad (\text{II.5})$$

On trouve la relation qui relie les moments et les coefficients du système :

$$A_n = M_{n-1} + \sum_{k=1}^{n-1} M_{n-1-k}A_k$$

**II.4.5.1.2 Mise en œuvre** Pour l'utilisation de la méthode des moments, on doit tout d'abord fixer une structure pour le modèle. Après plusieurs essais, on a remarqué que la réponse du modèle du troisième ordre approche au mieux la réponse du système réel.

Le modèle a donc la forme  $F(s) = \frac{K}{(A_3s^3 + A_2s^2 + A_1s + 1)}$  et d'après la relation II.5 les paramètres du système sont reliés aux moments avec les équations suivantes :

$$K = 263.1$$

$$A_1 = M_0$$

$$A_2 = M_1 + M_0^2$$

$$A_3 = M_2 + M_1A_1 + M_0A_2$$

Le calcul des différents moments donne le modèle suivant.

$$F(s) = \frac{263.1}{0.00586s^3 + 0.05842s^2 + 0.3483s + 1}$$

La figure II.19 présente la réponse indicielle du système réel et celle identifiée par le modèle. On remarque que la réponse du modèle du troisième ordre approche la réponse du système réel. Mais après des tests de validation sur d'autres signaux d'entrées, on déduit que la machine présente des non-linéarités, et que le modèle trouvé par la méthode des moments n'est valable qu'à proximité du point de linéarisation.

## II.4.5.2 Méthodes numériques

**II.4.5.2.1 Principe** Une deuxième approche qu'on utilise dans l'identification est la méthode du modèle. La méthode se résume en quatre étapes :

- Choix de l'entrée à appliquer au procédé : SPBA, bruit Blanc ...etc.
- Définir la structure du modèle : ARX, ARMAX ...etc.
- Estimation des paramètres en minimisant un critère.
- Validation du modèle.

**Structure du modèle** Plusieurs structures sont proposées, ARX, ARMA, ARMAX, ...etc. Dans notre cas on a utilisé la structure ARMAX II.20 :

$$A(q^{-1})y(t) = q^{-d}B(q^{-1})u(t) + C(q^{-1})e(t)$$

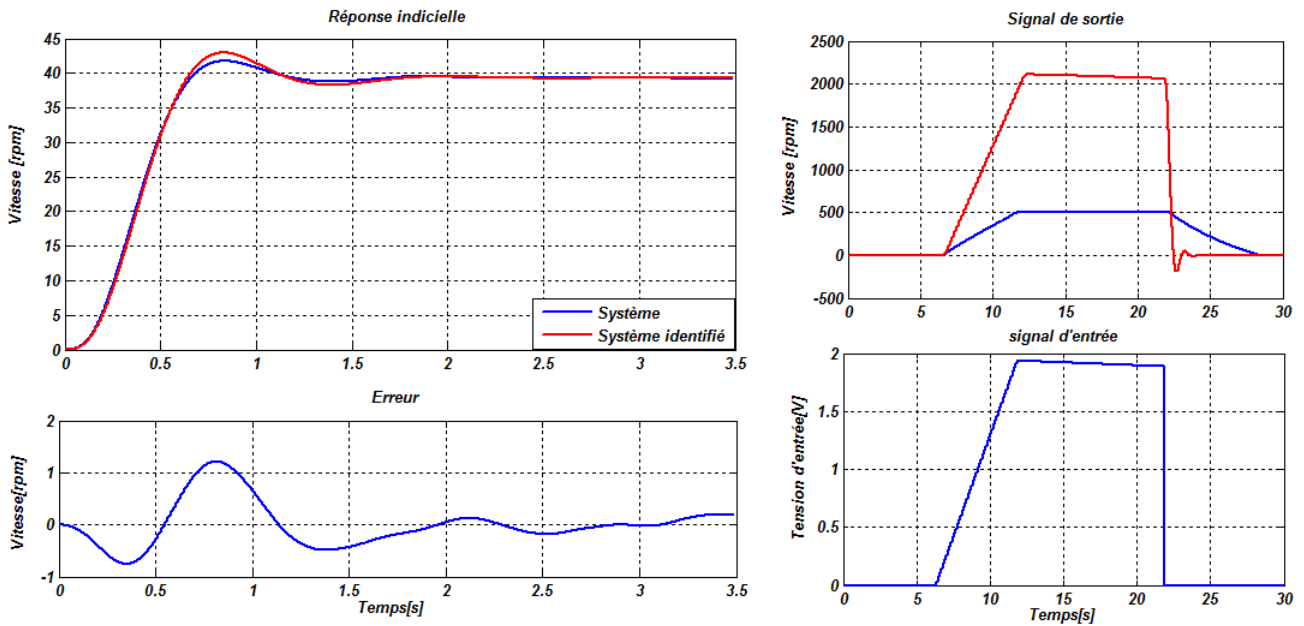


FIGURE II.19 – Résultats de la méthode des moments.

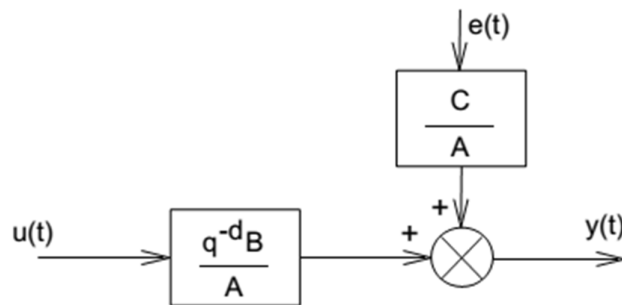


FIGURE II.20 – Structure ARMAX.

**Estimation des paramètres** Il existe beaucoup de méthodes d’identifications paramétriques, et on les trouve regroupées dans deux catégories :

- Les méthodes non-récurrentes : moindres carrés simples, adaptées pour une identification hors-ligne.
- Les méthodes récurrentes : moindres carrés récurrents, moindres carrés généralisés, qui permettent une identification en temps réel (en ligne).

Le diagramme ci-dessous résume le principe de l’estimation paramétrique du modèle.

Les modèles décrits en dessus, sont linéaires par rapport aux paramètres, dans ce cas l’équation de prédictor s’écrit :

$$\hat{y}(t+h) = F(\underline{\varphi}(t), \underline{\theta}) = \Phi(\underline{\varphi}(t))\underline{\theta} = \underline{\Phi}(t)^T \underline{\theta}$$

$\underline{\theta}$  : vecteur de paramètres,

$\Phi$  : matrice d’information.

Donc on possède une relation explicite du gradient du critère en fonction de paramètres. Dans

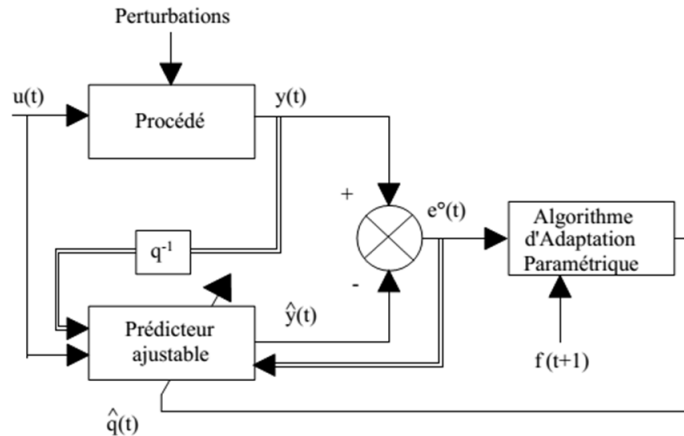


FIGURE II.21 – Principe des méthodes d'indentifications récursives [29].

ce cas on peut utiliser l'algorithme des moindres carrés :

$$\hat{\theta}_{opt} = (\Phi_I^T \Phi_I)^{-1} \Phi_I^T y_s$$

Dans le cas où on n'a pas de relation linéaire du modèle par rapport aux paramètres, l'estimation paramétrique se fait par les méthodes itératives d'optimisation non linéaires

**II.4.5.2.2 Mise en œuvre** On choisit un modèle de structure ARMAX, d'ordre  $Na = 4, Nb = 4, Nc = 4$  avec un retard  $d = 1$ , Le modèle trouvé est :

$$\begin{aligned} A(z) &= 1 - 3.846z^{-1} + 5.54z^{-2} - 3.542z^{-3} + 0.8479z^{-4} \\ B(z) &= 4.58e^{-9}z^{-1} + 8.519e^{-9}z^{-2} - 3.296e^{-9}z^{-3} + 6.754e^{-10}z^{-4} \\ C(z) &= 1 + 3.055z^{-1} + 3.186z^{-2} - 1.208z^{-3} + 0.07641z^{-4} \end{aligned}$$

On remarque que le modèle a bien fait de capter la dynamique, mais il est loin de reproduire la réponse fidèlement. Pour avoir un modèle plus fiable, et plus performant, on peut utiliser les méthodes de modélisation non linéaires.

## II.4.6 Identification non linéaires

Dans la partie précédente nous avons considéré le système comme un système linéaire, et nous avons utilisé les méthodes d'indentifications linéaires pour essayer de trouver un modèle qui reprend le mieux le comportement du système réel. Toutefois et puisque notre système n'est pas complètement linéaire, on n'a pas pu trouver un tel modèle. Dans cette situation alors, on a recours aux méthodes d'indentifications non linéaires.

L'étude d'un système dynamique non linéaire, quel que soit sa nature (industrielle, environnementale, financière, etc.) et quel que soit l'objectif visé (commande, optimisation du fonctionnement, prédiction, analyse du comportement, etc.), nécessite la mise en place d'une représentation capable de reproduire son comportement. Plusieurs approches sont proposées pour la représentation des systèmes dynamiques non linéaires : méthode de linéarisation du système, représentation de Hammerstein et de Wiener, etc. Plus récemment, d'autres techniques ont vu le jour notamment celles basées sur les Réseaux de Neurones Artificiels (RNA) et les multimodèles [31].

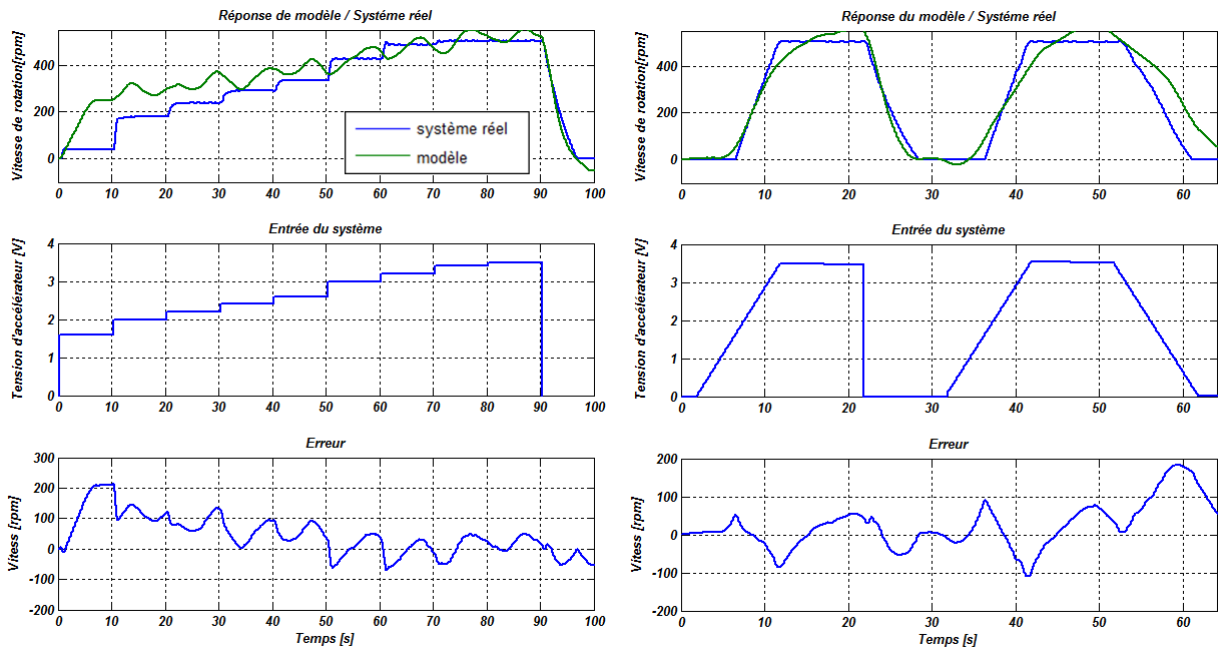


FIGURE II.22 – Résultats des méthodes numériques.

**Identification des systèmes dynamiques non linéaires par un MLP :** En général, un système dynamique est décrit par des équations différentielles s'il est à temps continu ou par des équations aux différences s'il est à temps discret. Dans la pratique, il est rare qu'un système complexe puisse être entièrement décrit par un modèle de connaissance. On a souvent recours aux modèles entrées-sorties de type « boîtes noires », pour lesquels aucune connaissance sur le système n'est nécessaire, mais des mesures sur les variables régissant le fonctionnement du système sont indispensables et en quantité suffisante. Le problème de l'identification devient alors un problème de régression non linéaire, (d'autres méthodes sont proposées dans [34]).

**Représentation des systèmes dynamiques NL par un réseau MLP :** Les systèmes dynamiques non linéaires peuvent être représentés par des réseaux de neurones de type MLP. La structure du réseau dépend de la classe du modèle défini par son vecteur de régression. Le modèle le plus utilisé est le modèle NARX (non linear ARX), la figure II.23 montre le schéma d'identification pour un réseau MLP de type NARX.

**II.4.6.0.3 Mise en œuvre** Comme on l'a déjà cité précédemment, les MLP sont connues, pour leurs capacités d'approximateurs universels, et en rajoutant une mémoire (retard) on peut prédire le comportement des systèmes dynamiques.

Après plusieurs tests on a opté pour la structure illustrée dans la figure II.24, qui est constituée d'une couche cachée de 15 neurones avec comme fonction d'activation  $f_h$  la fonction Sigmoidé, et une couche de sortie avec une fonction d'activation linéaire  $f_o$ .

Le système linéaire correspondant est de structure ARMAX avec  $N_a = 2, N_b = 2$  et  $d = 1$ , tel que  $N_a, N_b$ , l'ordre des polynômes  $A(q^{-1}), B(q^{-1})$  respectivement et  $d$  est un retard.

Pour ce réseau de neurones, on a pris comme données d'entraînements le signal en escalier (à gauche figure II.25), et comme données de validations, le signal en rampe (à droite figure II.25),

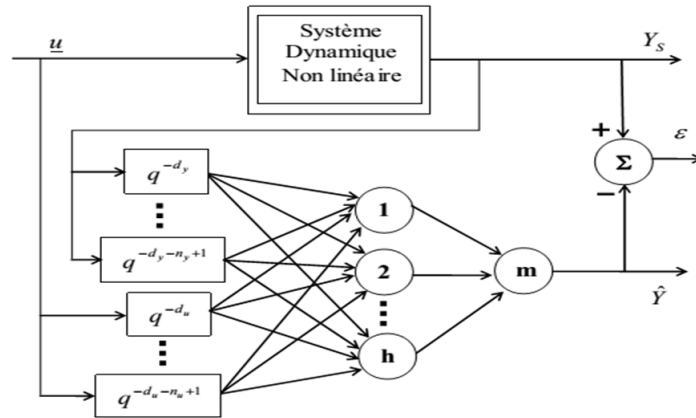


FIGURE II.23 – Exemple d’implantation d’un modèle NARX par un réseau MLP.

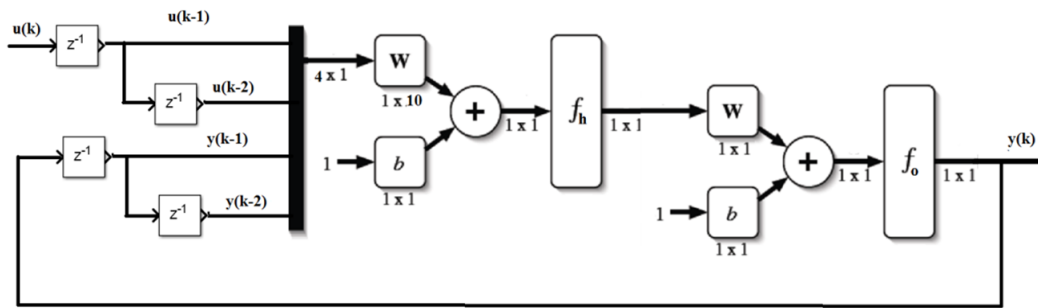


FIGURE II.24 – Réseau de neurone utilisé.

les résultats sont montrés dans la même figure.

On remarque à gauche, que le réseau imite bien le système, car il a été entraîné sur cette entrée. La courbe à droite, montre la réponse du réseau vis-à-vis des données de validation, on remarque que le réseau donne de bonne prédiction jusqu’à l’instant  $t = 55s$ , où la courbe de prédiction diverge, car le réseau n’a pas été entraîné sur les pentes descendantes, donc il a donné une mauvaise prédiction. Cela est l’un des inconvénients du réseau de neurone artificiel. Pour remédier à ce problème, les données d’entraînement doivent comprendre le maximum des scénarios possibles d’utilisation de ce réseau.

### II.4.6.1 Modèle de Hammerstein and Wiener

**II.4.6.1.1 Principe** Cette méthode est prometteuse, grâce à sa simplicité d’utilisation et ses performances pour l’identification des systèmes non linéaires.

Les modèles de Hammerstein et de Wiener (figures II.26 et II.27) sont constituées de blocs distincts de modèles dynamiques linéaires et de modèles statiques non linéaires, interconnectés en série et/ou en parallèle.

Ce modèle est utilisé pour l’identification des systèmes non linéaires, où la non linéarité du système et sa dynamique sont traitées séparément. Les non linéarités peuvent être de type connus comme, les saturations, les zones mortes, les frottements statiques, ou bien d’une façon



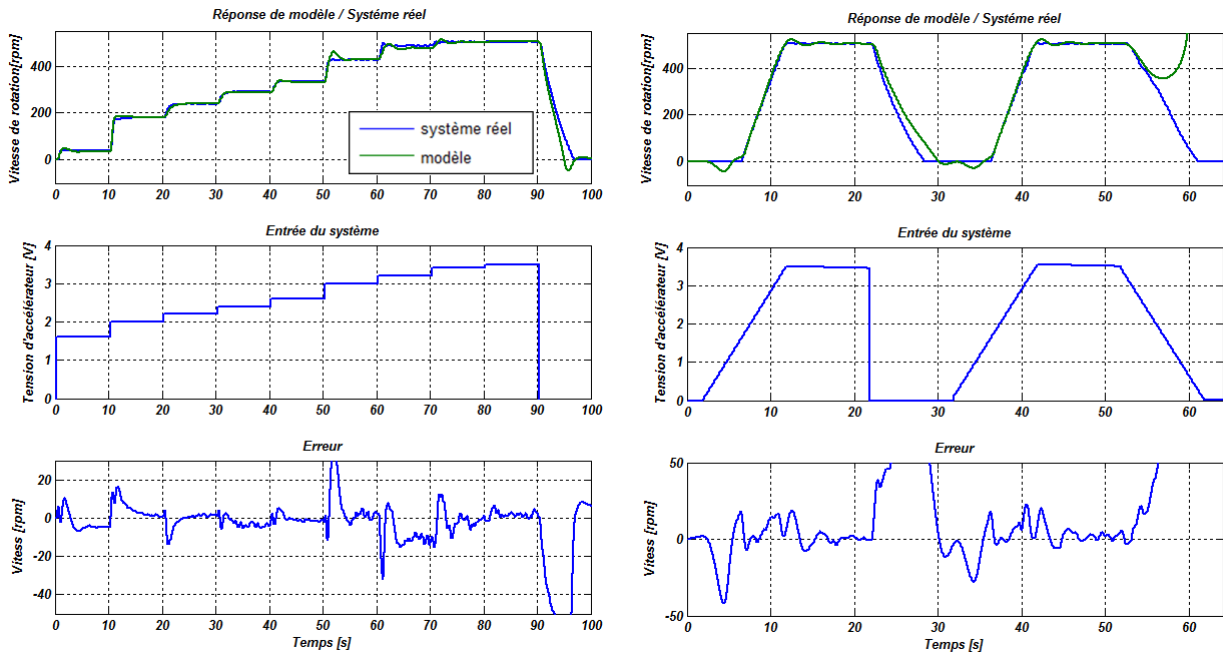


FIGURE II.25 – Résultats des réseaux de neurones.

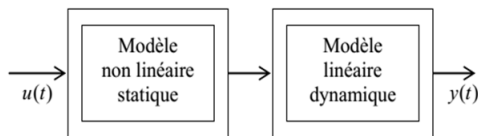


FIGURE II.26 – Modèle de Hammerstein

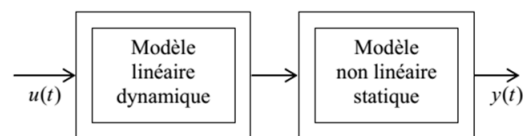


FIGURE II.27 – Modèle de Wiener

générale, représentés par des polynômes, fonction linéaire continue par morceaux (piecewise linear), ou par des réseaux de neurones artificiels statiques.

La dynamique du système peut être représenté par un modèle polynomial (ARX, ARMAX, ...etc).

Le modèle le plus utilisé est le modèle de Hammerstein-Weiner (figure II.28), qui prend en compte des non linéarités à l'entrée et à la sortie.

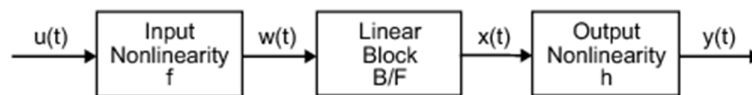


FIGURE II.28 – Modèle de Hammerstein-Weiner.

L'identification d'un tel système utilise les méthodes d'optimisation globale, en prenant comme vecteur de paramètres, les paramètres des trois blocs, et on les ajuste à chaque itération, jusqu'à avoir la réponse désirée.

**II.4.6.1.2 Mise en œuvre :** Pour l'identification de notre système, et après plusieurs tests, on aboutit au modèle à trois blocs définis comme suit :

- La dynamique du système est décrite par un modèle ARX :  $y = \frac{B}{F} \times u(t - d)$ , avec B et F des polynômes d'ordre 2 et  $d = 1$  qui est le retard.
- Les non linéarités d'entrée et de sortie sont des fonctions linéaires continues par morceaux (piecewise linear), de 7 segments.

Les simulations pour deux entrées, une utilisée pour l'identification et la deuxième pour la validation, sont montrées dans la figure II.29.

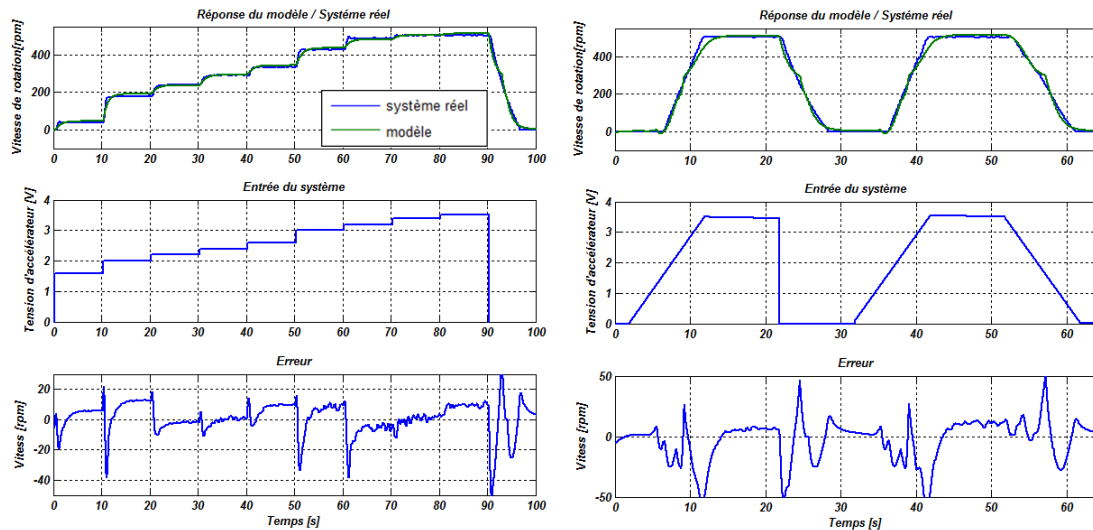


FIGURE II.29 – Résultats de la méthode de Hammerstein-Weiner.

On remarque que le modèle reproduit fidèlement la réponse du système réel, même pour les pentes descendantes où tous les autres modèles appliqués ont échoué de la reproduire. Cependant, des modèles plus précis et plus performants peuvent être élaborés, mais ce modèle est suffisant pour notre application.

## II.5 Simulation de la chaîne de traction électrique

Le modèle complet d'une traction électrique est présenté dans la figure II.30. Il comporte tous les éléments décrits précédemment, à savoir le moteur BLDC avec son électronique de commande, la batterie plus la dynamique du véhicule comme charge. Pour tester les performances du système électrique, on simule le fonctionnement pour un cycle de vitesse, et on remarque que le véhicule suit bien la référence. (Figure II.31) Par contre pour ce qui est de la batterie, on simule une situation parfaite où le courant de charge de la batterie n'est pas limité, ce qui n'est pas le cas dans la réalité. En pratique le courant de charge de la batterie est faible par rapport au courant de décharge.

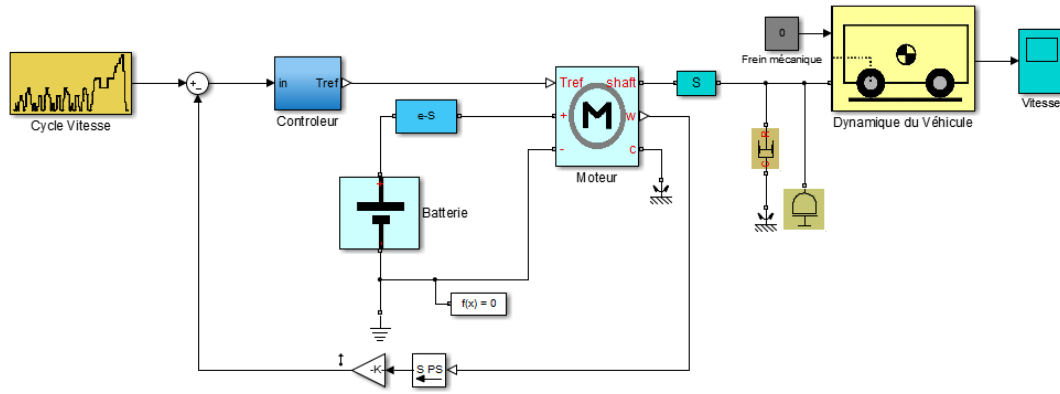


FIGURE II.30 – Modèle de la traction électrique.

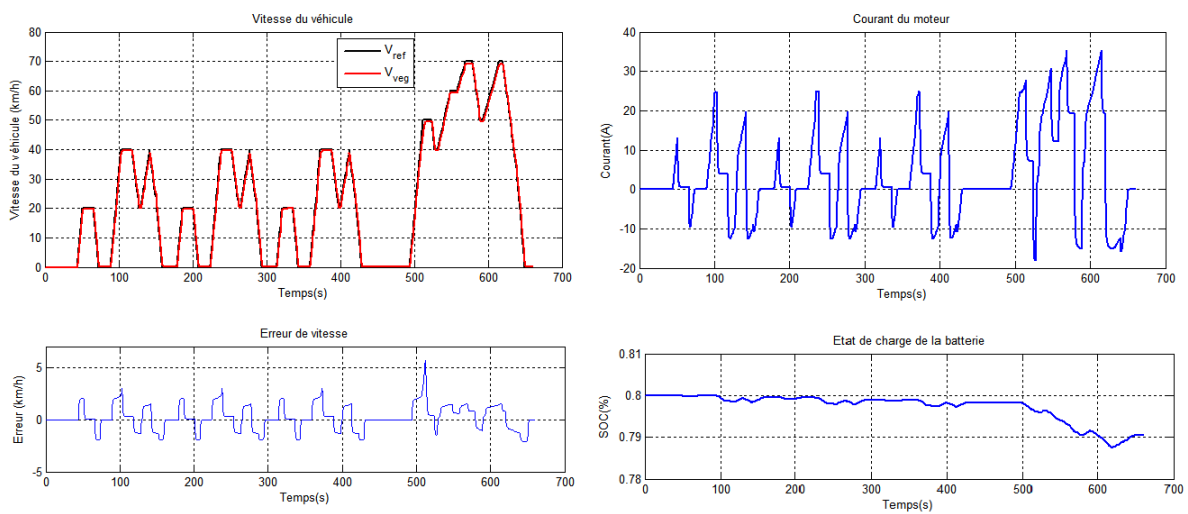


FIGURE II.31 – Graphes de simulation.

## II.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différents aspects liés à la représentation des systèmes dynamiques linéaires et non linéaires. Les modèles non linéaires les plus utilisés dans l'identification, les réseaux de neurones artificiels et le modèle de Hammerstein-Weiner ont également été présentés, ainsi que les méthodes d'identifications des systèmes linéaires les plus utilisés. Par la suite, nous avons appliqué ces méthodes pour identifier un système de motorisation électrique construit autour d'un moteur BLDC destiné à équiper un quad hybride.

# Chapitre III

## Les véhicules électriques hybrides

Face à la limitation de la motorisation électrique, l'échec des véhicules thermiques conventionnels en termes d'exigences environnementales et l'immaturité d'autres technologies<sup>1</sup>, les constructeurs ont besoin d'un système performant qui réponds aux contraintes du moyen et long terme.

L'hybridation de la technologie thermique avec une motorisation électrique constitue une bonne combinaison qui regroupe à la fois performances et développement durable.

Les moteurs à combustion interne ne produisent pas de couple sous certaines vitesses appelées vitesses de décrochages (Stall Speed), par ailleurs le moteur électrique peut produire des couples très forts même à vitesse nulle, et il peut garder un couple presque constant dans les basses vitesses (figure III.1).

Dans les voitures hybrides le moteur électrique est utilisé pour les phases de démarrage et de

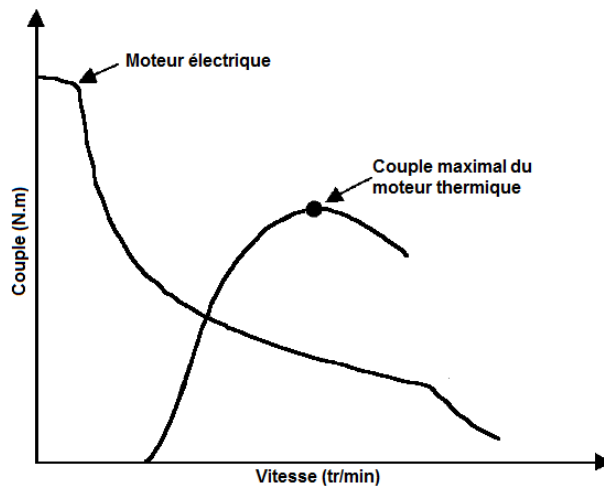


FIGURE III.1 – Caractéristiques de couples des moteurs électrique et thermique [16].

petite vitesse, comme lors d'une circulation urbaine, et présente un appoint de puissance pour les demandes élevées, étant donné que le moteur thermique souffre d'un rendement réduit dans ces deux régions.

Cette hybridation a aussi son apport quant au côté écologique, des modèles sont déjà sur le

---

1. Pile à combustible, bio-carburant...

marché et ils ont marqué plusieurs points en termes d'émission de polluants et de consommation du carburant, dont la Toyota Prius est la plus connue.

On présente dans ce chapitre une description des véhicules électriques hybrides avec leurs architectures et modes de fonctionnement. Un état de l'art sur la problématique de gestion d'énergie entre les différentes sources et aussi présenté où quelques méthodes sont appliquées et simulées à la fin.

### III.1 Définition

Un véhicule hybride est un véhicule pour lequel l'énergie nécessaire pour se mouvoir est transmise aux roues par au moins deux dispositifs de conversion d'énergie différents, tirant leurs énergies d'au moins deux dispositifs de stockage d'énergie différents [35].

Dans le cas d'un véhicule électrique hybride les deux dispositifs de conversion sont typiquement, un moteur thermique et un moteur électrique, tirant leurs énergies d'un réservoir à carburant et d'un pack de batteries respectivement.

### III.2 Les modes de fonctionnement d'un véhicule électrique hybride

Selon la manière que ces dispositifs sont gérés, on peut définir plusieurs modes de fonctionnement utilisant une seule source d'énergie ou les deux. De plus, comme dans le cas du véhicule électrique, le véhicule hybride dispose de la faculté de récupérer dans sa batterie une partie de l'énergie de décélération<sup>2</sup>.

**Le mode thermique pur :** Le moteur thermique assure seul la traction du véhicule, donc le véhicule hybride se comporte comme un véhicule conventionnel. Ce mode peut être utilisé pour des raisons de rendement, par exemple, lors d'un trajet sur autoroute, pour lequel le moteur thermique est utilisé à un bon rendement, ou bien parce que la batterie est déchargée.

**Le mode électrique pur :** Le moteur électrique fournit l'intégralité de l'énergie nécessaire à la propulsion du véhicule. Ce mode est utilisé généralement dans les zones urbaines, grâce à l'absence du bruit et l'émission des polluants. La durée durant laquelle ce mode pourra être actif dépend de la capacité de la batterie.

**Le mode hybride :** Les deux moteurs fonctionnent simultanément pour assurer la propulsion du véhicule. Le moteur thermique peut assurer à la fois la traction du véhicule et la recharge de la batterie lorsqu'il fournit plus de puissance que celle demandée aux roues.

**Freinage récupératif :** Le freinage récupératif consiste à utiliser une partie de l'énergie de décélération du véhicule pour la stocker dans les batteries. Dans cette situation le moteur électrique fonctionne comme un générateur et se charge de récupérer cette énergie cinétique sous forme d'énergie électrique et l'utiliser pour recharger les batteries.

**Le Start and Stop :** Ce mode permet de couper le moteur thermique pendant un arrêt du véhicule (dans des embouteillages ou devant un feu rouge) et de le redémarrer rapidement

---

2. On trouve dans [35] une description détaillée.

et sans bruit, lorsque le conducteur enfonce la pédale d'accélération. Ce redémarrage est assuré par une machine électrique qui doit être suffisamment puissante [27].

### III.3 Taux d'hybridation

Suivant l'utilisation souhaitée du véhicule, les constructeurs peuvent varier l'importance de la propulsion hybride par rapport à la propulsion thermique. Pour un véhicule électrique hybride le taux d'hybridation est égal au rapport de la puissance électrique sur la puissance totale disponible à bord, et se calcule selon la formule suivante :

$$TH = \frac{Pe}{Pe + Pth} (\%) \quad (\text{III.1})$$

Ainsi plusieurs définitions existent [36] :

**Micro-hybrid :** Ces véhicules ont un faible taux d'hybridation, et sont propulsés uniquement par le moteur thermique, et utilisent le moteur électrique uniquement au travers du système Stop&Start. Ces véhicules permettent d'éviter la consommation de carburant quand le véhicule est au repos.

**Mild-Hybrid :** Les véhicules Mild-hybrid ont un niveau d'hybridation moyen. Le système électrique n'agit pour ces véhicules que comme un complément du moteur thermique. La propulsion en mode électrique seul ne pourra alors pas être effectuée. Ces véhicules sont équipés de moteurs électriques d'appoint n'ayant pas une puissance très importante. Le fait que l'apport de la propulsion électrique soit limité permet d'éviter de s'encombrer avec des systèmes de stockage d'énergie électrique (principalement des batteries) trop volumineuses et lourdes.

**Full-Hybrid :** Dans les véhicules Full-hybrid le moteur électrique peut assurer la propulsion seul, par exemple dans le cas d'un roulage urbain ou embouteillages. Ce type d'hybridation permet la diminution de l'utilisation du carburant, et donc l'émission de polluants. Mais il exige de disposer d'un moteur électrique de forte puissance ainsi qu'un pack de batteries assez encombrant.

### III.4 Les principales architectures

L'architecture d'un véhicule hybride est la façon avec laquelle les deux sources d'énergies (moteur thermique et moteur électrique dans notre cas) sont reliées aux roues. Il existe plusieurs architectures [1], toutefois, on présente ici ceux communément utilisés.

#### III.4.1 L'architecture Hybride-Série

Dans cette architecture seul le moteur électrique est directement connecté aux roues, et est alimenté soit par les batteries, soit par le moteur thermique via un générateur (Figure III.2). Les batteries sont rechargées soit par le moteur électrique lors d'un freinage récupératif, ou bien par la génératrice entraînée par le moteur thermique via un convertisseur. Le principal avantage de cette architecture réside dans le fait que le moteur thermique ne soit pas directement connecté aux roues, ce qui lui permet de travailler dans sa plage de fonctionnement optimale, ceci va

donc permettre de réduire la consommation du carburant et l'émission des polluants.

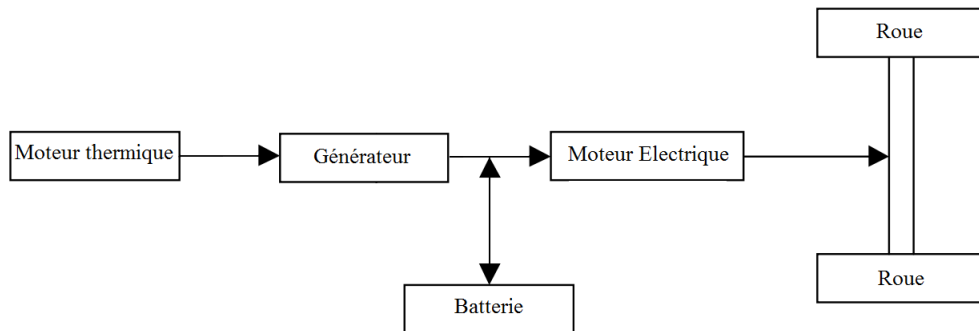


FIGURE III.2 – Architecture Série

Toutefois, malgré les avantages de l'architecture série et sa simplicité, elle présente aussi des inconvénients :

- Trois dispositifs de conversion d'énergie sont utilisés (moteur thermique, moteur électrique et un générateur).
- L'énergie mécanique produite par le moteur thermique est transformée en énergie électrique via la génératrice, puis à nouveau transformée en énergie mécanique par le moteur électrique, ce qui pénalise le rendement global du système.
- Etant donné que le moteur électrique doit fournir toute la puissance aux roues il doit donc être de forte puissance (donc encombrant).
- Mode tout thermique impossible puisque le moteur thermique n'est pas connecté aux roues.
- Mode boost impossible.

### III.4.2 L'architecture Hybride-Parallèle

Dans l'architecture parallèle les deux moteurs, thermique et électrique, sont connectés aux roues (Figure III.3), dans ce cas la puissance maximale est fournie par les deux moteurs, alors les moteurs thermique et électrique sont de petites tailles. Les deux moteurs peuvent fonctionner simultanément ou indépendamment. Lorsque la demande de puissance est faible, le moteur thermique entraîne le moteur électrique qui fonctionne alors comme générateur rechargeant les batteries. Lorsque la demande de puissance est plus forte, le moteur thermique entraîne la transmission et se retrouve secondé par le moteur électrique alimenté par les batteries. Le moteur électrique peut aussi être utilisé comme générateur pour charger la batterie par le freinage récupératif. L'inconvénient majeur de cette architecture est sa complexité, puisque plusieurs composants sont liés aux roues ce qui rend la gestion et le contrôle plus délicat.

### III.4.3 L'architecture Hybride-Mixte

L'architecture hybride-mixte est l'association de l'hybride série et de l'hybride parallèle. En effet, elle intègre un moteur thermique, une génératrice, un moteur électrique et un train planétaire pour réaliser l'addition de vitesse (Figure III.4).

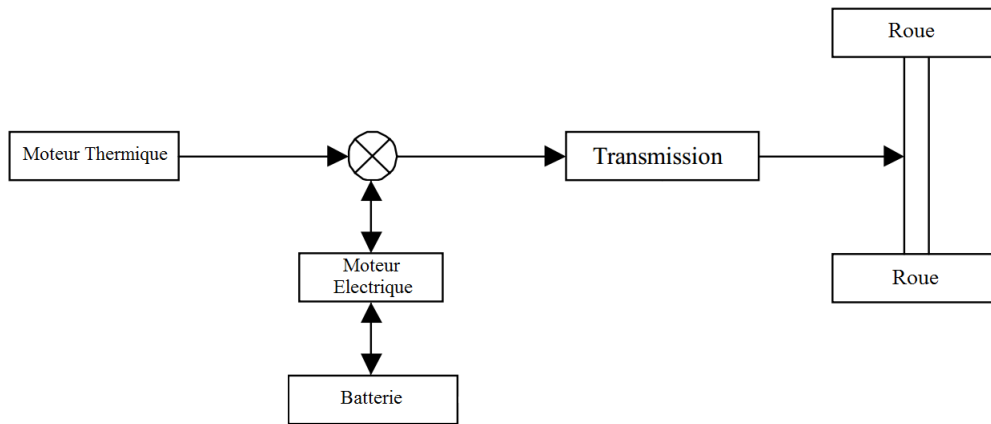


FIGURE III.3 – Architecture Parallèle

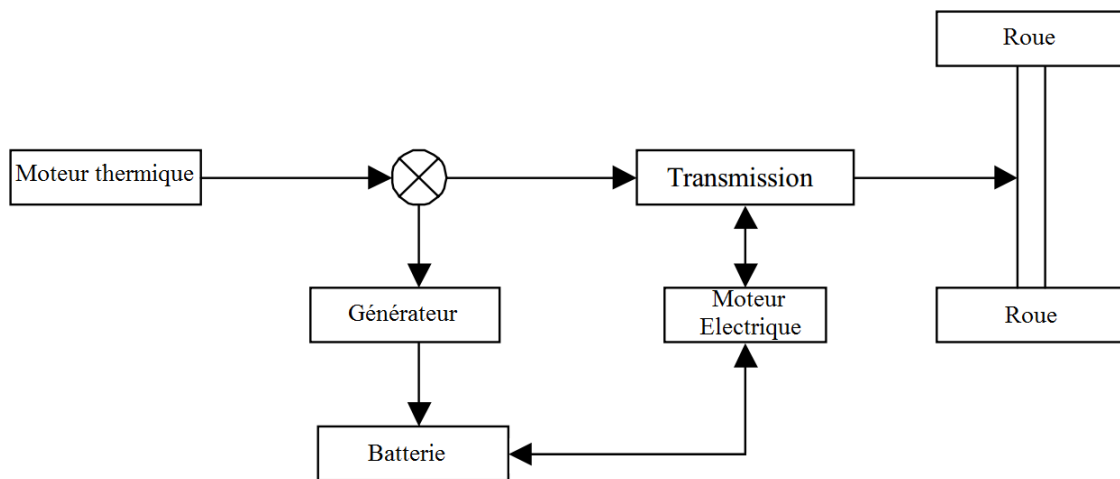


FIGURE III.4 – Architecture Mixte

### III.5 Problématique de gestion d'énergie dans un véhicule hybride

Le conducteur traduit sa demande en puissance par l'enfoncement de la pédale d'accélérateur, et dans le cas d'un véhicule conventionnel c'est le moteur thermique qui se charge de répondre à cette demande, et de transférer la puissance nécessaire aux roues.

Pour un véhicule hybride la puissance demandée par le conducteur peut être répartie entre le moteur thermique et le moteur électrique, puisque les deux moteurs sont susceptibles de fournir l'énergie nécessaire à la traction, ce qui amène donc un degré de liberté en plus.

L'intérêt principal d'un véhicule hybride provient de sa capacité à pouvoir consommer moins de carburant, comparé à un véhicule équivalent équipé seulement d'un moteur thermique. Il faut alors trouver des stratégies qui permettent de répartir cette demande d'énergie entre les deux moteurs de manière à optimiser le fonctionnement de la chaîne de traction.

Ces stratégies sont regroupées sous le terme : « *lois de gestion d'énergie* ».

Les lois de gestion d'énergie définissent la meilleure répartition de l'énergie entre toutes



les sources, afin de satisfaire la demande faite par le conducteur, d'optimiser la consommation d'énergie et de respecter les normes de pollution [37].

Elles doivent donc choisir quel mode de fonctionnement adopter en prenant en considération [36] :

- La puissance devant être transmise aux roues.
- La puissance maximale pouvant être fournies par chacune des deux propulsions.
- Les cartographies de rendement du moteur thermique, du moteur électrique et de la batterie.
- L'état de charge de la batterie.

Ce problème de gestion efficace des sources d'énergies peut être abordé de deux manières différentes, soit sur un cycle normalisé, on parle alors de la gestion offline, ou bien en temps réel aussi appelé on ligne.

### III.5.1 La gestion d'énergie offline

Dans le cas de la gestion off ligne on essaye d'établir une gestion optimale d'énergie sur un parcours complètement connu au préalable.

On cherche alors à comparer les performances du véhicule en lui faisant parcourir un cycle de conduite normalisé, avec d'autres véhicules ayant parcouru le même cycle.

Plusieurs cycles existent [38], mais le cycle de référence est le cycle européen NEDC [1], il est constitué de quatre séquences répétées constituant la partie urbaine et d'une partie extra urbaine (Figure III.5).

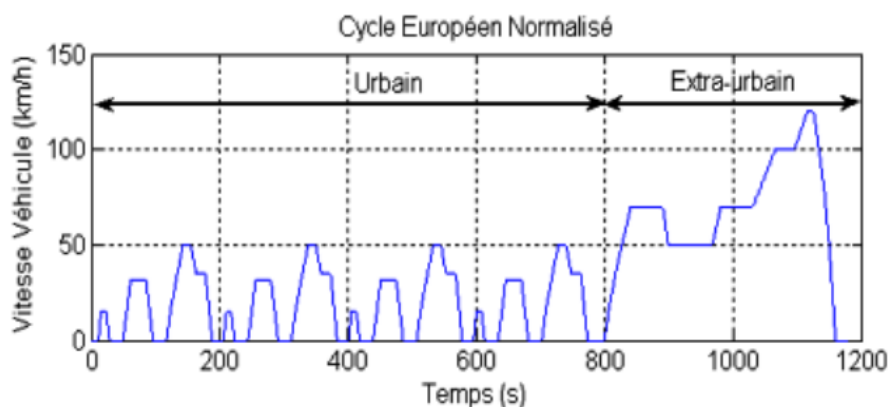


FIGURE III.5 – Cycle NEDC

Il existe plusieurs méthodes pour résoudre ce type de problème basé sur la théorie de control optimal, parmi lesquelles [38] [1] :

- Les méthodes numériques : La programmation dynamique, méthode de tir simple, méthode de tir multiple.
- Les méthodes analytiques : Utilisant le calcul des variations et le principe de maximum de Pontryagin.

Bien que ces approches ne soient appliquées qu'en simulation, leurs résultats sont très importants, en effet elles permettent d'avoir :

- Une expertise sur les commandes idéales à appliquer au groupe motopropulseur.

- Une borne de consommation minimale servant de référence pour l'évaluation des stratégies temps réel.

### III.5.2 La gestion d'énergie temps réel

Les lois de gestion temps réel ne nécessitent pas des informations sur le futur. Ces stratégies ne prennent en considération que les informations disponibles à l'instant  $t$  (Vitesse du véhicule, puissance, état de la batterie ...)

Plusieurs méthodes ont été proposées dans la littérature [38] :

**Les méthodes à base de règles :** Ce type de stratégie de contrôle consiste à déterminer les règles définissant le point de fonctionnement de chacune des deux parties de propulsion en fonction des conditions de vitesse et d'accélération imposées par le véhicule, on distingue deux types de règles :

- Règles déterministes.
- Règles floues.

**Les méthodes d'optimisation instantanée :** Ces méthodes sont basées sur une analyse fine des comportements des flux énergiques, et consiste à déterminer à chaque instant le point de fonctionnement qui minimise la consommation instantanée du carburant et garde la charge de la batterie dans un état admissible, les méthodes les plus répandues sont :

- La méthode LMS (Loss Minimisation Strategy) [38].
- La méthode ECMS (Equivalent Consumption Minimisation Strategy) [35].

**Les méthodes d'optimisation globale en temps réel :** Consistent à exploiter l'expertise fournie par les algorithmes de gestion off ligne pour synthétiser des lois de commande [39]. Les réseaux de neurones ont été utilisés dans ce cadre dans [35] pour déterminer d'une manière systématique une loi de gestion à partir des résultats d'optimisation globale.

## III.6 Application des lois de gestion d'énergie

Dans cette partie on va appliquer un certain nombre de méthodes de gestion d'énergie sur un modèle de véhicule hybride. Le modèle est l'association de la traction thermique présentée dans le chapitre 1 et la traction électrique présentée dans le chapitre 2. L'association nous donne une architecture de type parallèle comme présenté dans la figure III.6.

### III.6.1 Stratégie à base de règles déterministes

#### III.6.1.1 Principe de la méthode

Cette méthode est grandement utilisée grâce à sa simplicité. L'idée derrière l'algorithme est de favoriser la propulsion électrique pour les demandes de puissance faible, et utiliser le mode hybride lors de fortes demandes, soit pour répondre à la puissance, dans ce cas les deux moteurs participent à la traction soit pour recharger la batterie, dans ce cas le moteur thermique donne un surplus de puissance pour pouvoir assurer à lui seul, la traction et la recharge des batteries. L'algorithme prend aussi en considération les limites sur les différents composants (puissance maximale des deux moteurs) et tend à garder l'état de charge dans une fourchette acceptable. On distingue ainsi cinq modes de fonctionnement du véhicule :

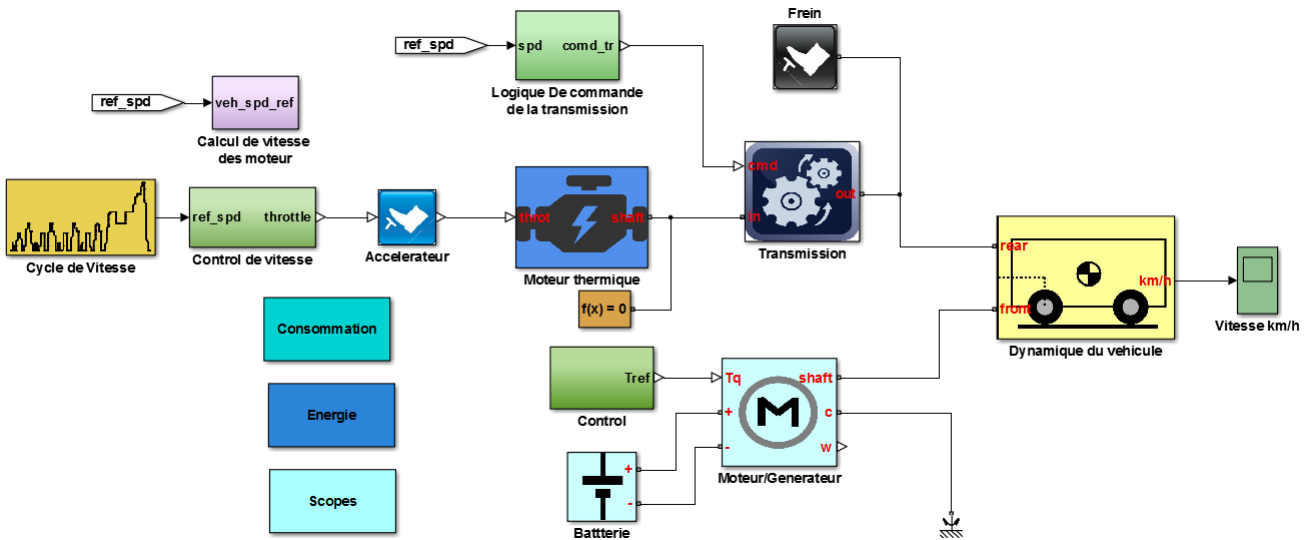


FIGURE III.6 – Modèle du véhicule hybride

- Mode « Arrêt » :** Dans ce cas la puissance nécessaire à la traction demandée est nulle, donc les deux sources ne fournissent pas d'énergie et le véhicule est à l'arrêt.
- Mode « Electrique » :** La puissance demandée est non-nulle est inférieure à la puissance maximale pouvant être tiré du moteur électrique. Dans ce cas, suivant l'état de charge de la batterie, le moteur électrique peut assurer à lui seul la traction.
- Mode « Freinage » :** Dans ce cas la puissance demandée est négative, le véhicule est en mode freinage récupératif si la puissance n'excède pas les limites de la puissance pouvant être absorbée par l'élément de stockage. Si c'est le cas, alors le reste du frein est assuré mécaniquement.
- Mode « Hybride : Boost » :** Pour des demandes assez élevées de puissance et pour des états de charges admissibles de l'élément de stockage, les deux moteurs peuvent participer au même temps à la traction. La puissance fournit est donc la somme des deux puissances.
- Mode « Hybride : recharge de batterie » :** Dans ce cas l'état de charge de la batterie est faible alors le moteur thermique assure la traction et donne un surplus de puissance pour recharger les batteries.

L'idée générale de l'algorithme est de jouer sur un paramètre, que nous notons  $\alpha$ , qui exprimera le taux de contribution du moteur électrique à la traction,  $\alpha = 1$  mode tout électrique,  $\alpha = 0$  mode thermique pur.

### III.6.1.2 Résultats

Commençant par un état de charge de la batterie égale à 60% nous avons obtenu une variation globale de l'état de charge de -0.26% et une consommation finale de 5.566L/100km donc un gain de 31.39% par rapport au mode thermique. La figure III.7 montre la répartition des puissances et des couples entre les deux sources ainsi que le rapport  $\alpha$  et l'état de charge de la batterie.

On remarque selon la courbe du couple que le moteur thermique aide le moteur électrique dans

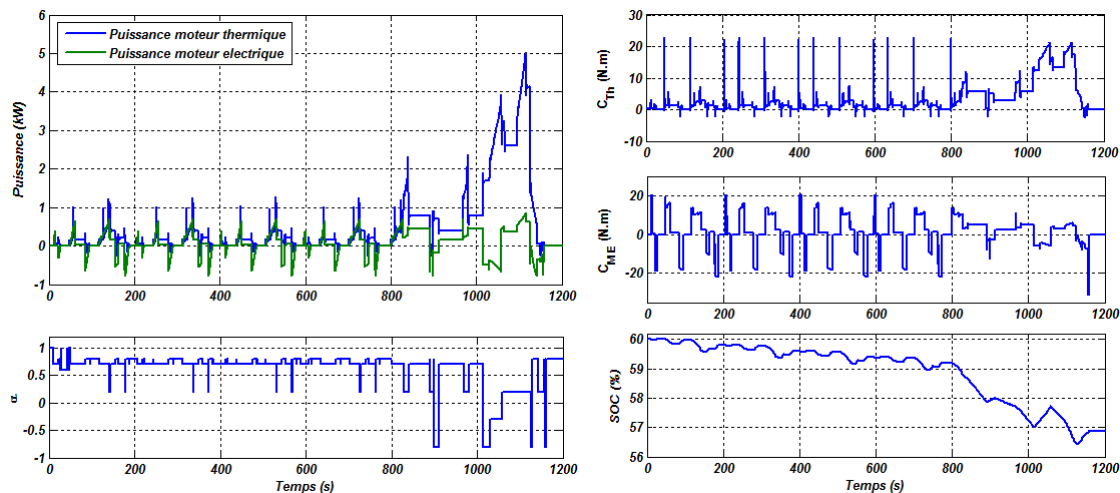


FIGURE III.7 – (a) Puissance + coefficient  $\alpha$ . (b) Couples + état de charge.

la partie urbain (de 0 à 800 secs) quand la puissance demandée ne peut pas être totalement fournie par l'électrique. Pour la partie extra urbaine c'est le contraire. La puissance demandée est plus importantes donc c'est le moteur thermique qui assure la traction et donne aussi un surplus de puissance pour recharger la batterie (de 1000 à 1060 secs environ) et pour des demandes plus élevées (de 1060 à 1130 secs) les deux moteurs participent à la traction.

## III.6.2 La gestion d'énergie par logique floue

### III.6.2.1 Introduction

La logique floue est une extension de la logique booléenne, basé sur la théorie des ensembles flous de Lotfi Zadeh [40] qui est une généralisation de la théorie des ensembles classiques. En associant aux variables des coefficients d'appartenances à des ensembles, dits ensembles flous, l'état d'une variable peut avoir d'autres valeurs qu'uniquement 0 ou 1, quantifiant ainsi l'incertitude et prenant en compte l'imprécision sur les mesures [41].

La logique floue fournit une méthode pertinente et facilement réalisable dans des applications temps réel et permet de systématiser ce qui est du domaine de l'empirisme et difficile à maîtriser en transcrivant les connaissances des concepteurs ou des opérateurs. C'est le paradigme du calcul avec des mots (Computing With Words « CWW ») proposé par Zadeh qui décrit une méthode dans laquelle les objets de calcul sont des mots et des propositions tirées du langage naturelle [42].

L'idée de la logique floue est qu'au lieu de modéliser un système physique, qui est généralement très complexe, non linéaire et fortement variable, il est souvent intéressant de modéliser le comportement d'un opérateur humain face au système, et qu'au lieu par des valeurs numériques précises, le fonctionnement doit être décrit par des qualificatifs globaux traduisant l'état approximatif des variables [43].

### III.6.2.2 Principe de la méthode

La première étape dans l'analyse par logique floue est la fuzzification, qui consiste à associer à chaque variable d'entrée un degré d'appartenance aux ensembles flous qui lui sont associées. On réalise ainsi le passage des grandeurs physiques en variables linguistiques qui peuvent être traitées par les inférences. Le mécanisme d'inférence est basé sur un ensemble défini de règles de type : Si..., Alors... permettent de passer des degrés d'appartenances des grandeurs d'entrées aux conséquences de sortie [44]. Ces conséquences peuvent être de type floue, dans ce cas un bloc de déffuzification est nécessaire pour passer d'une variable floue à une grandeur numérique. Mais la méthode la plus utilisé est celle de Sugéno, qui est aussi appelé semi-floue, et qui associe aux conséquences des règles des valeurs discrètes, exemple : Si x est A et y est B alors u = C. Pour notre étude c'est ce dernier qui sera adopté. En résumé un système flou de type Sugeno procède de la manière suivante :

- A chaque entrée les degrés d'appartenances aux ensembles flous sont calculés et notés  $\mu_1$  ...  $\mu_n$  (n : nombre d'entrée)
- Les degrés d'activation des règles sont calculés :  
Si x est A et y est B alors  $u_1 = c_1 \rightarrow \alpha_1 = \min(\mu_x(A), \mu_y(B))$   
.  
.  
.  
Si x est C et y est Z alors  $u_j = c_j \rightarrow \alpha_j = \min(\mu_x(C), \mu_y(Z))$
- La sortie est calculée suivant la formule :

$$u = \frac{\sum_{i=1}^j \alpha_i c_i}{\sum_{i=1}^j \mu_i}, j \text{ étant le nombre de règles.}$$

### III.6.2.3 Mise en œuvre

La méthode analyse à chaque instant la puissance demandée et l'état de charge de la batterie et détermine la répartition entre le moteur électrique et le moteur thermique. Les entrées du système flou sont alors l'état de charge de la batterie et la puissance demandée, tandis que  $\alpha$  constituera la seule sortie.

**Fuzzification :** L'univers de discours de chaque variable est divisé en plusieurs sous-ensembles. Pour l'état de charge de la batterie 3 sous-ensembles ont été retenus à savoir, « Faible », « Moyen » et « Élevé » (Figure III.8). Pour la puissance demandée 6 sous-ensembles ont été utilisés pour représenter sa variation, « Négative Grande », « Négative », « Zéro », « Positive », « Positive Moyenne » et « Positive Grande » (Figure III.9).

**Table de règles :** On essaye, autant que l'état de charge le permet, de favoriser la propulsion électrique pour les faibles demandes de puissance. Pour des puissances plus élevées c'est soit le mode thermique qui est activé soit le mode hybride. La recharge de la batterie se fait lors des demandes négatives, par le biais du freinage récupératif, ou bien par le moteur thermique qui donnera dans ce cas des surplus de puissance.

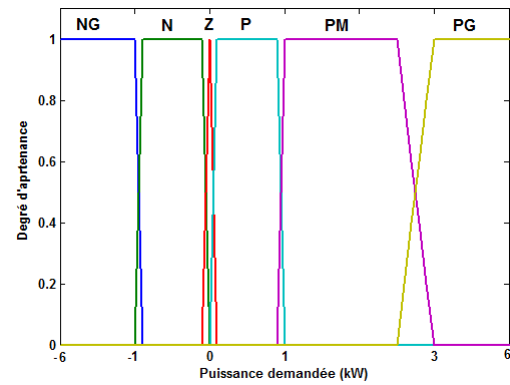
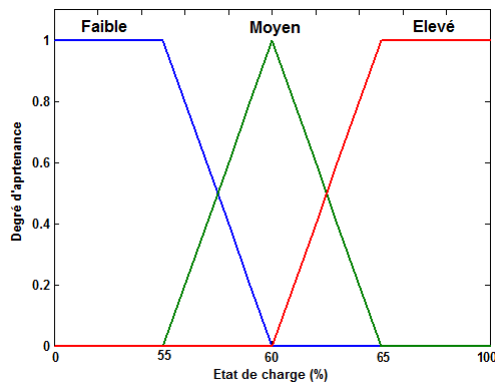


FIGURE III.8 – Fonctions d’appartenances de la variable  $SOC$

FIGURE III.9 – Fonctions d’appartenances de la variable  $P_{dem}$

$SOC \backslash P_{dem}$	NG	N	Z	P	PM	PG
F	H	E	E	H	H	T
M	T	H	E	E	H	T
E	T	T	E	E	H	T

TABLE III.1 – Table de règle.

### III.6.2.4 Résultats

En gardant les mêmes conditions initiales, à savoir un état de charge de la batterie égale à 60%. On remarque qu’on a des cycles de recharge plus fréquent qu’avec l’approche précédente. Ceci peut être vu dans le graphe du coefficient  $\alpha$  qui tend à être négatif plus fréquemment. Donc quand le moteur thermique fonctionne il est dans une plage de rendement plus optimale. La méthode garde aussi l’état de charge dans une fourchette plus étroite, en effet la variation globale est de  $-0.056\%$  bien meilleur que la précédente. En fin de cycle, nous avons obtenu une consommation de  $5.661L/100km$  soit un gain de  $30.22\%$  par rapport au mode conventionnel.

## III.6.3 Optimisation du système flou par un algorithme génétique

### III.6.3.1 Introduction

Dans la conception d’un système flou, les paramètres (fonctions d’appartenances, base des règles) peuvent être choisies en se basant sur l’expertise que le groupe de concepteurs possède sur le système. Mais trouver les grandeurs optimales n’est pas une mince affaire et augmente exponentiellement avec la complexité du système. Dans la majorité des cas, le réglage se fait par une fastidieuse approche d’essais/erreurs.

Dans le but de la simplification de ce stade de conception, plusieurs propositions peuvent être trouvées dans la littérature, qui reposent principalement sur des techniques d’intelligence artificielle [45]. Parmi ces méthodes, on trouve les Algorithmes Génétiques (Abrégé GA pour “Gentic Algorithm”) où leurs applications pour le réglage des contrôleurs flous a été le sujet de plusieurs travaux<sup>3</sup>.

3. Quelques références sur le sujet peuvent être trouvées dans [44].

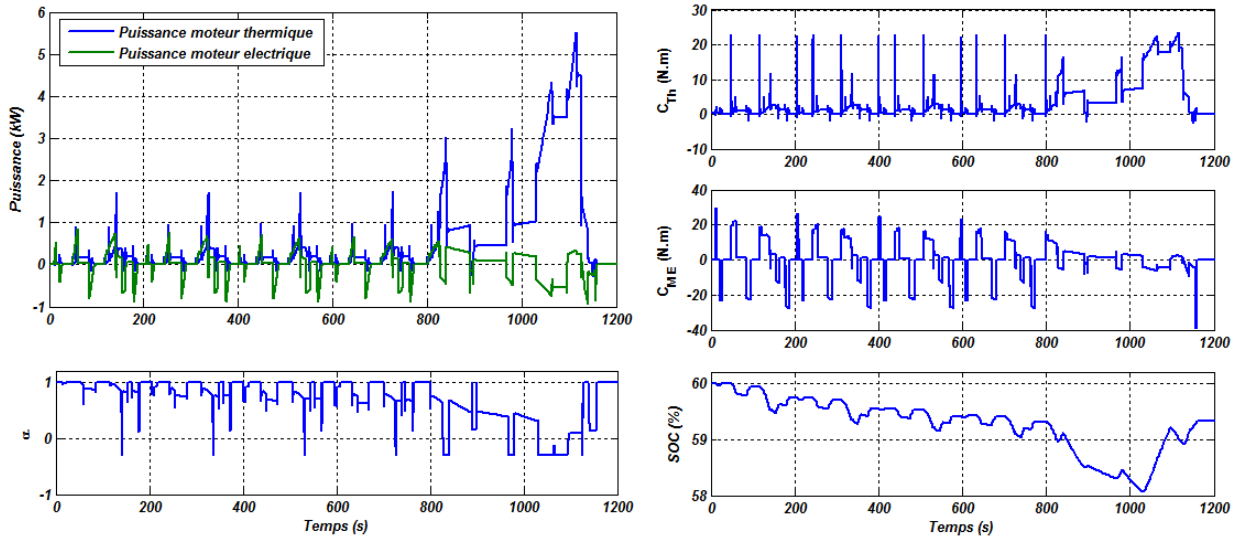


FIGURE III.10 – (a) Puissance + coefficient  $\alpha$ . (b) Couples + état de charge.

Les algorithmes génétiques, initiés dans les années 1970 par John Holland, sont des algorithmes d’optimisations numériques basées sur des techniques dérivées de la génétique et de l’évolution naturelle.

Un algorithme génétique reproduit le modèle d’évolution dans le but de trouver des solutions pour un problème donné. Il utilise des populations formées d’individus, qui sont une représentation des paramètres à optimiser, et tend à diriger la population vers l’optimum globale en se servant des trois opérateurs génétiques : Sélection, Croisement et Mutation.

### III.6.3.2 Principe de la méthode

Un algorithme génétique pour un problème particulier doit avoir les cinq composants suivants [46] :

1. *Un principe de codage des éléments de population* : C’est une représentation génétique des solutions possibles au problème. Elle associe à chacun des points de l’espace d’état une structure de donnée où chaque paramètre est assimilé à un gène. Elle est donnée sous forme d’un vecteur de gènes appelé chromosome ou individu. La représentation peut être de type binaire lorsque les gènes ne prennent que les valeurs 0 ou 1, ou bien entière/réelle quand les gènes sont définies dans l’espace des entiers/réels.



FIGURE III.11 – Principe de codage.

2. *Des paramètres de dimensionnement* : Taille de la population, nombre total de générations, critère d'arrêt, probabilités d'application des opérateurs.
3. *Un mécanisme de génération de la population initiale* : Ce mécanisme produit une population d'individus non homogène qui servira de base pour les générations futures.
4. *Des opérateurs génétiques* : Ils permettent d'altérer et diversifier la population au cours des générations afin de mieux explorer l'espace des solutions.
5. *Une fonction d'évaluation* : C'est la fonction objectif à optimiser appelé « Fitness Function », elle joue le rôle de l'environnement et évalue les individus suivant leurs valeurs.

La figure III.12 présente un organigramme d'un algorithme génétique de base.

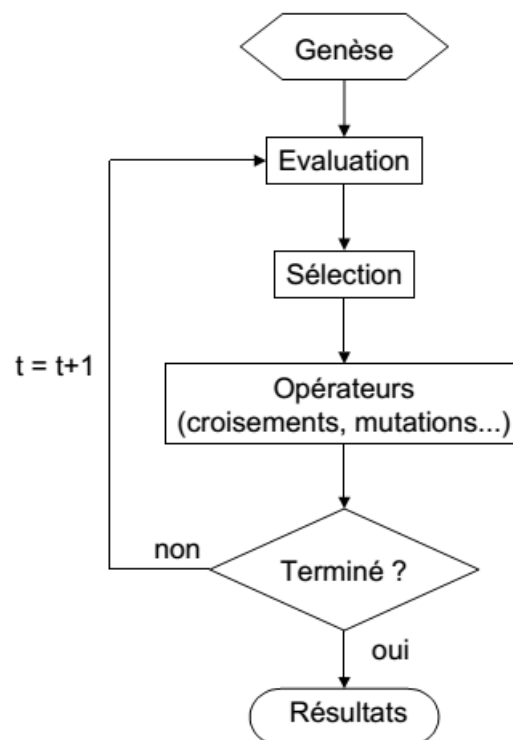


FIGURE III.12 – Principe générale des algorithmes génétiques.

### III.6.3.3 Mise en œuvre

L'application des algorithmes génétiques pour optimiser un système flou peut se faire soit pour trouver le jeu de règles et maintenir les fonctions d'appartenances fixe, soit en changeant les fonctions d'appartenances et garder le jeu de règles fixe, soit changer les deux à la fois [47]. Dans notre cas on se servira de l'algorithme génétique implémenter sous Matlab pour trouver les paramètres des fonctions d'appartenances en gardant le jeu de règles fixe.

Le déroulement général de l'optimisation du système flou par l'algorithme génétique est illustré dans la figure III.13. A chaque pas de l'algorithme génétique, le système d'inférence flou est construit à partir des paramètres de chaque individu. Le système flou ainsi élaboré est ensuite évalué le long du cycle et sa fonction objectif est calculée. Les opérateurs génétiques sont par



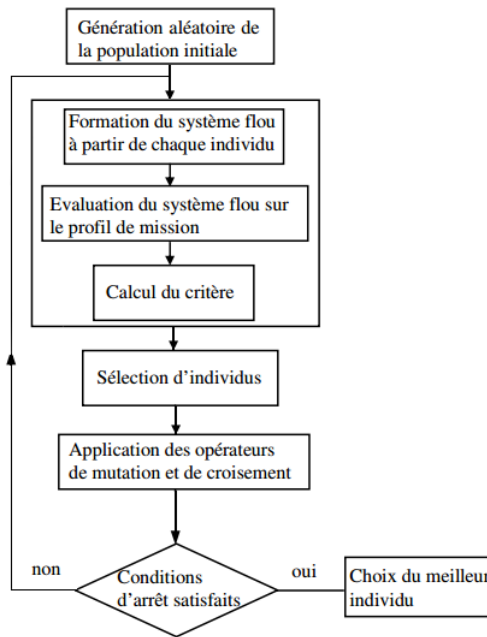


FIGURE III.13 – Organigramme de fonctionnement de l'algorithme génétique.

la suite appliquer sur les individus de la population actuelle pour créer la nouvelle génération. L'algorithme peut être arrêté lorsque la population n'évolue plus ou plus suffisamment rapidement ou bien si le nombre de générations que l'on souhaite exécuter, fixé à priori, est atteint.

**III.6.3.3.1 Codage :** Comme déjà dit précédemment le codage des individus est la représentation génétique des paramètres. Dans notre cas les paramètres sont les grandeurs des fonctions d'appartenances. En gardant le même nombre et type de fonction d'appartenances déjà évoqué dans la section précédente, 3 paramètres sont nécessaire pour coder les fonctions d'appartenances de l'état de charge, et 6 pour la puissance demandée, comme illustré dans la figure III.14. Il est bon de mentionner que la fonction d'appartenance "Zéro" de la puissance demandée a été considérée invariante. En effet, l'intervalle de variation de la fonction est très étroit et tend à ralentir la convergence de l'algorithme.

Un individu sera alors représenté comme un chromosome contenant 9 gènes de type réel III.15.

**III.6.3.3.2 Fonction objectif :** La fonction objectif caractérise le critère à minimiser. Dans notre cas nous cherchons à minimiser la consommation du carburant tout en ayant une variation globale de l'état de charge de la batterie admissible. En effet, si le critère prend uniquement la minimisation du carburant en considération, l'algorithme finira par donner une solution qui épuise la batterie. Donc pour garder l'état de charge dans une fourchette admissible nous avons pris la fonction objectif suivante :

$$F = cons + k|Dx|$$

où : *cons* est la consommation finale, *Dx* est la variation globale de l'état de charge, et *k* est un paramètre de pondération, plus *k* est faible, plus on favorise la minimisation de la consommation face à *Dx* et vice versa.

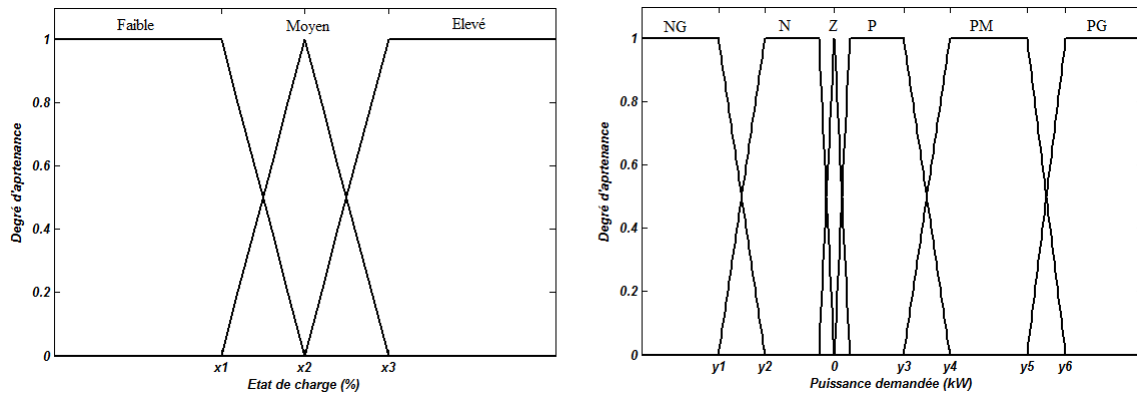


FIGURE III.14 – Paramètres des fonctions d'appartenance.

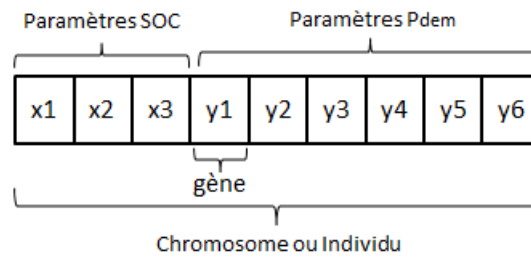


FIGURE III.15 – Représentation d'un individu.

En outre, pour éviter les solutions non faisables nous utilisons une fonction de pénalité qui pénalise les solutions qui violent les contraintes.

En effet, l'algorithme génétique nous permet de fixer des bornes inférieures et supérieures sur chacun des gènes de l'individu. Ces bornes vont jouer le rôle des contraintes. Donc chaque individu qui ne respectera pas ces contraintes se voit attribuer une fitness importante plus un terme de pénalité, on réduit ainsi ces chances d'être choisis par le processus de sélection. Cela permet d'accélérer la convergence de l'algorithme en ne choisissant que les valeurs faisables. Les équations sont données par :

$$\begin{cases} 0 < x_i < 100, & x_i < x_{i+1} & i = 1, \dots, 3 \\ -6 < y_i < 6, & y_i < y_{i+1} & i = 1, \dots, 6 \end{cases}$$

### III.6.3.4 Résultats

Tout d'abord nous devons fixer les paramètres de l'algorithme et signaler les fonctions choisies et les probabilités d'application des différents opérateurs génétiques.

On a fixé un nombre maximal de génération égale à 40 où chaque population contient 90 individus. Pour l'opérateur de croisement, nous avons choisi la méthode de croisement uniforme avec une probabilité de 80%. Et en ce qui concerne la méthode de mutation c'est la méthode de mutation uniforme ([46]) qui a été utilisée avec un taux d'application égale à 0.001. Aussi, pour protéger la rémanence de bonnes solutions et d'assurer leurs survie tout au long de la recherche, nous avons utilisé un opérateur d'élitisme qui choisit les 18 (20% de la population)

meilleurs individus de la population pour passer directement à la nouvelle génération. Ainsi, nous avons obtenu les fonctions d'appartenances illustrées dans les figures III.16 III.17. L'évaluation de cet individu le long du cycle a donné une consommation finale de  $5.65L/km$

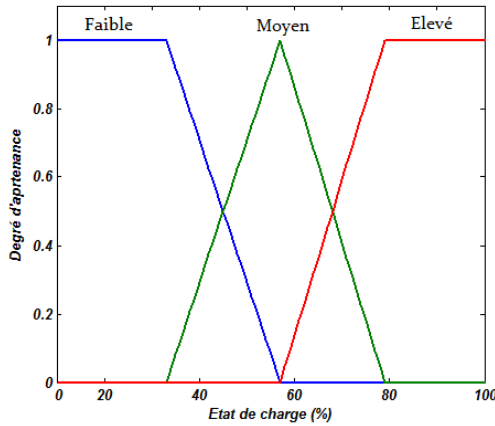


FIGURE III.16 – Fonctions d'appartenances de la variable  $SOC$

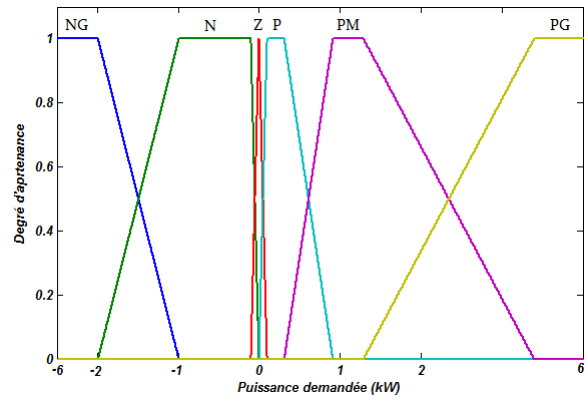


FIGURE III.17 – Fonctions d'appartenances de la variable  $P_{dem}$

avec une variation globale de l'état de charge de  $-0.03\%$ .

On remarque aussi à partir des graphes de simulation (figure III.18) que les résultats sont assez proches de ceux obtenus sans optimisation. Toutefois, outre l'amélioration apportée, il est aussi important de noter que la fastidieuse approche d'essais/erreurs a été évitée. .

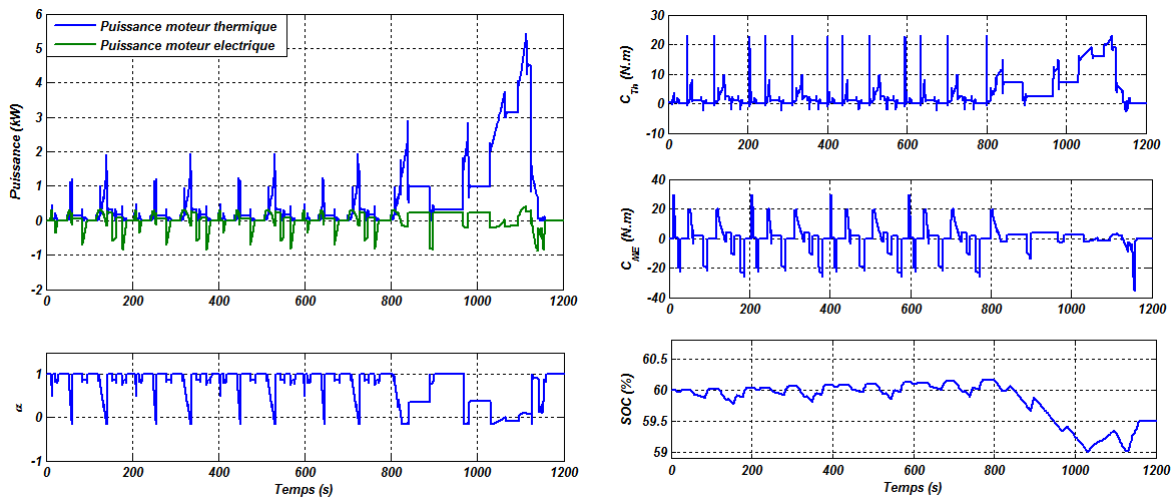


FIGURE III.18 – Application de la méthode floue-génétique.

### III.6.4 Approche par logique floue type-2

#### III.6.4.1 Introduction

La logique floue présentée dans le chapitre précédent est aussi connu sous le nom de Logique floue type-1. Malgré un nom qui porte la connotation d'incertitude, plusieurs exemples ont

montré qu'il existe des limites à la capacité de la logique floue type-1 à modéliser et minimiser l'effet des incertitudes [48] [49]. C'est parce que la logique floue type-1 est certaine dans le sens où l'appartenance d'une variable à un ensemble flou est une seule valeur. L'incertitude dans la logique floue type-1 vient d'au moins de 3 sources [50] [51] :

1. *Incertainitudes sur les mots utilisés pour décrire les variables linguistiques* : les mots peuvent signifier différentes choses pour différentes personnes.
2. *Incertainitudes sur les conséquences des règles* : L'expertise diffère d'un groupe à un autre.
3. *Incertainitudes sur les données utilisées* : les données peuvent être bruitées.

Les ensembles flous type-1 ne sont pas capables de prendre en compte ces incertitudes car les fonctions ont des degrés d'appartenances fixes.

C'est pour cette raison que Lotfi Zadeh a introduit le concept de la logique floue type-2 [52] comme extension de la notion d'ensemble flou simple. Les ensembles flous types-2 ont des fonctions d'appartenance qui sont eux-mêmes flous. Les ensembles flous intervalle type-2 (noté IT2FS pour « Interval Type-2 Fuzzy Sets »), un cas particulier de type-2 générale [53], sont actuellement les plus largement utilisés grâce à leur temps de calcul réduit [48].

La figure III.19 montre un exemple d'un ensemble flou IT2 noté  $\tilde{X}$ . On observe bien que l'appartenance à cet ensemble n'est plus une valeur, mais plutôt un intervalle. La fonction est délimité du haut et du bas de deux fonctions floue type-1 noté respectivement  $\bar{X}$  (Upper Membership Fncion « UMF ») et  $\underline{X}$  (Lower Membership Function « LMF »). La surface entre ces deux fonctions est appelé l'empreinte d'incertitude (Footprint Of Uncertainty « FOU »).

Les ensembles flous type-2 sont particulièrement utiles quand il est difficile de déterminer avec exactitude la fonction d'appartenance, ou quand on veut modéliser les opinions de plusieurs experts [48].

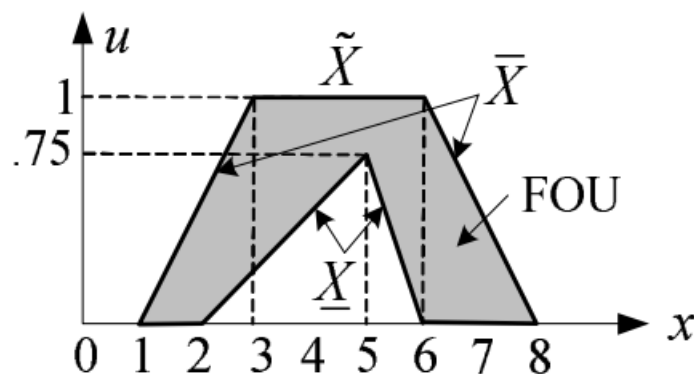


FIGURE III.19 – Exemple d'un ensemble flou IT2 [48].

### III.6.4.2 Principe de la méthode

La figure III.20 représente le schéma global de fonctionnement d'un système flou type-2. On trouve les mêmes blocs déjà présenté en type-1 or que cette fois au moins une des fonctions d'appartenance est de type-2, alors un bloc de réduction de type est nécessaire avant de passer à la déffuzification.

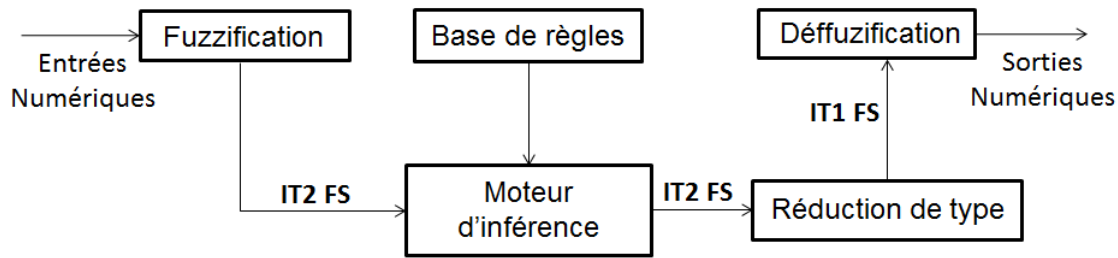


FIGURE III.20 – Fonctionnement d'un système flou type-2.

Les règles sont énoncées de la même façon : If  $x$  is  $\tilde{X}^n$  then  $y$  is  $Y^n$

Où  $\tilde{X}$  est un ensemble flou type-2 et la conséquence  $Y^n = [\underline{y}^n, \overline{y}^n]$  est un intervalle, mais dans la plupart des cas  $\underline{y}^n = \overline{y}^n$ , donc  $Y^n$  se réduit à une seule valeur [48].

La méthode procède comme suit, étant donnée une entrée  $x = (x_1, x_2, \dots, x_I)$  :

1. *Fuzzification* : calcul de l'appartenance de  $x_i$  dans chaque  $\tilde{X}^n$  associé. Les  $\tilde{X}^n$  étant des type-2, la fuzzification donne donc des intervalles de types :  $[u_{\underline{X}_i^n}(x_i), u_{\overline{X}_i^n}(x_i)]$
2. *Activation des règles* : Calcul des intervalles d'activation des règles

$$F^n(x) = [\min(u_{\underline{X}_1^n}(x_1), \dots, u_{\underline{X}_I^n}(x_I)), \min(u_{\overline{X}_1^n}(x_1), \dots, u_{\overline{X}_I^n}(x_I))] = [f^n, \overline{f}^n]$$

3. *Reduction de type* : Les conséquences des règles sont combinées avec les intervalles d'activation pour calculer le centre de gravité<sup>4</sup>.

$$Y_{cos} = \frac{\sum_{n=1}^N f^n y^n}{\sum_{n=1}^N f^n} = [y_l, y_r]$$

Le calcul est assez complexe et prend un temps prohibitif [53], mais  $y_l$  et  $y_r$  peuvent être calculé en utilisant un algorithme de réduction de type. Plusieurs algorithmes existent [55] qui sont dans la plus part des cas des améliorations de l'algorithme de Karnik-Mendel [54].

4. *Déffuzification* : La sortie déffuzifiée est calculée comme étant la moyenne entre  $y_l$  et  $y_r$

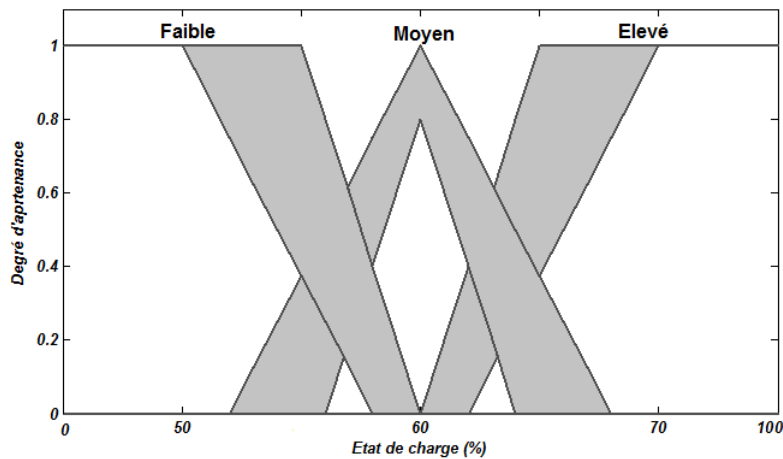
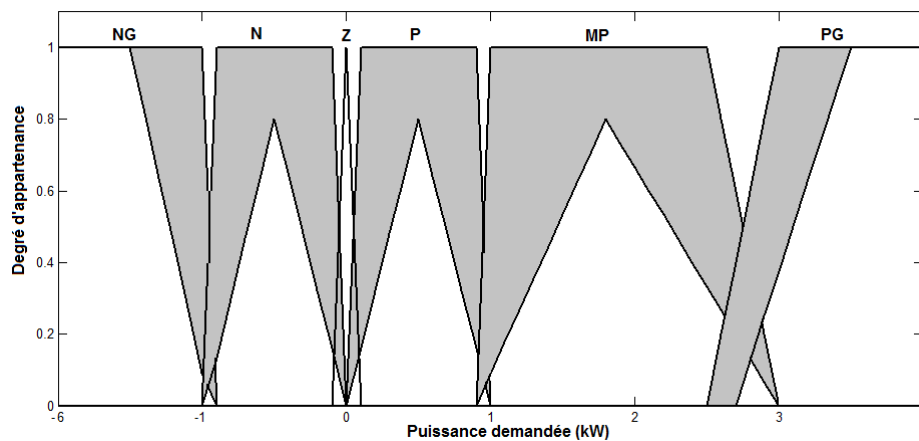
$$y = \frac{y_l + y_r}{2}$$

### III.6.4.3 Mise en œuvre

La méthode suit le même raisonnement que celui déjà présenté avec le type-1. Elle donne la répartition de puissance entre les deux sources d'énergies en se basant sur l'état de charge de la batterie et la puissance demandée par le véhicule. L'univers de discours de chaque variable est aussi scindé de la même manière, à savoir, 3 sous-ensembles pour l'état de la charge de la batterie III.21, et 6 pour la puissance demandée III.22. La différence est que les fonctions d'appartenances sont dans ce cas des types-2.

On garde aussi la même base de règles que celle utiliser avec l'approche floue type-1. La matrice des règles est rappelée dans le tableau III.2.

4. Le calcul du centre gravité est détaillé dans [54] et un exemple démonstratif est donné dans [53].

FIGURE III.21 – Fonctions d'appartenance de la variable  $SOC$ .FIGURE III.22 – Fonctions d'appartenance de la variable  $P$ .

Pour ce qui est de l'algorithme de réduction de type, nous avons utilisé l'algorithme EISAC (*Enhanced Iterative Algorithm with Stop Condition*) décrit dans [55] qui est une amélioration de l'algorithme ISAC [56].

#### III.6.4.4 Résultats

La figure III.23 présente les graphes de simulation. La méthode donne un résultat proche de celui eu avec la logique floue type-1. Nous avons toutefois noté une consommation un peu plus réduite à la fin de cycle de  $5.64 L/100km$  et une variation globale de l'état de charge de  $-0.069\%$ .

SOC \ $P_{dem}$	NG	N	Z	P	PM	PG
	F	H	E	E	H	T
M	T	H	E	E	H	T
E	T	T	E	E	H	T

TABLE III.2 – Table de règle.

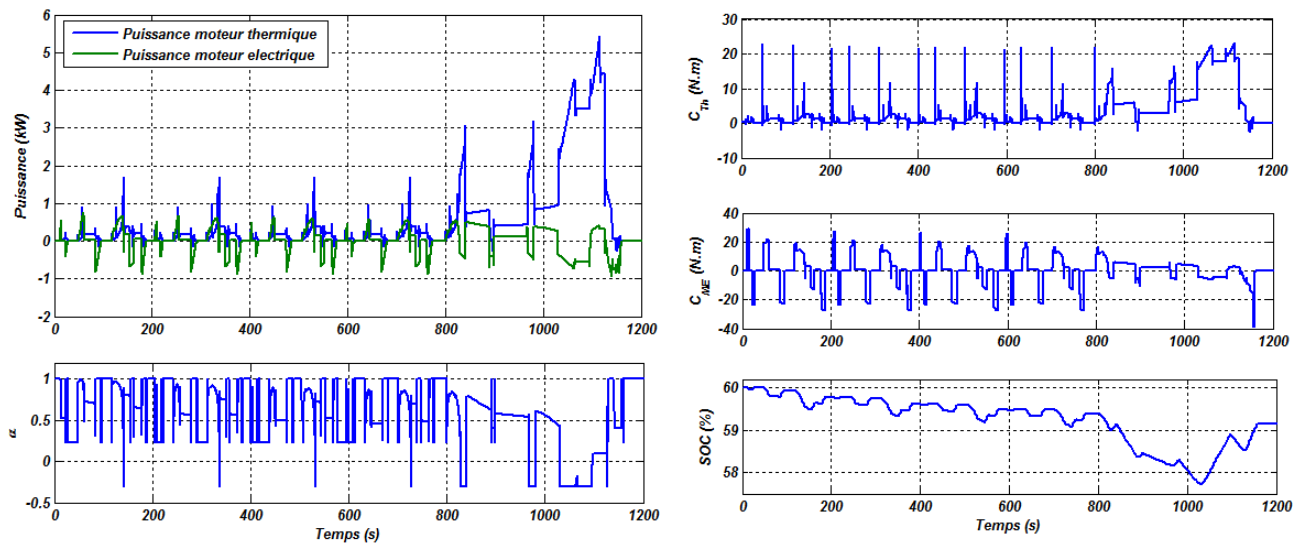


FIGURE III.23 – (a) Puissance + coefficient  $\alpha$ .

(b) Couples + état de charge.

### III.7 Conclusion

Ce chapitre a été consacré à la présentation des véhicules électriques hybrides, de part leurs définitions, leurs architectures, leurs modes de fonctionnement et la problématique liée à la gestion d'énergie, où un certain nombre de ces méthodes a été appliqué sur un modèle construit sur MATLAB qui reflète l'architecture possédée au labo.

# Chapitre IV

## Réalisation expérimentale

L'objectif principal de ce travail est de réaliser un véhicule hybride qui servira comme un outil expérimental d'évaluation et de teste concernant l'étude de ces derniers.

A l'heure actuelle la conception dans le domaine de l'engineering se fait par la méthodologie appelé le « Model-Based Design », qui est une méthode mathématique et visuelle utilisée pour aborder des problèmes complexes avant de passer à la réalisation.

La méthode consiste à construire des modèles qui reflètent le plus que possible le système réel et les utiliser conjointement avec des outils de simulation, pour le dimensionnement et le teste des performances. Dans le Model-Based design le développement est caractérisé par quatre principales étapes :

**Modélisation du système :** La modélisation peut être établie analytiquement en se basant sur les lois de la physique (First Principle Modeling) ou bien expérimentalement en utilisant les méthodes d'identifications de l'automatique (Data Driven Modeling).

**Validation du modèle :** Dans cette étape des signaux testes sont recueillis du système réel et utilisés sur le modèle déjà établi afin de vérifier son comportement.

**Conception du régulateur :** Cette étape consiste à synthétiser un contrôleur pour répondre à un cahier des charges donné.

**Implémentation et réalisation pratique :** Le régulateur développé dans l'étape précédente et qui répond au cahier des charges sera maintenu et implémenté sur le système réel.

Cette partie portera sur la réalisation pratique d'un quad hybride à partir de son homologue conventionnel muni d'une motorisation thermique à essence, et d'une roue motrice ayant un moteur électrique à courant continue intégré.

La mise en œuvre expérimentale consiste à transformer la structure du véhicule pour loger la roue motrice électrique, pour obtenir un véhicule ayant une source de propulsion et une source de traction :

- Une source thermique s'appliquant sur les deux roues arrière (Propulsion).
- Une source électrique située en avant du quad hybride (Traction).

Cette hybridation s'accompagne par la mise en place d'un dispositif de stockage de l'énergie électrique (batteries), pour l'alimentation du moteur électrique via un système de conversion et d'adaptation de la puissance électrique transférée (convertisseur).

Dans ce chapitre on présentera la démarche suivie pour la conception et la réalisation du véhicule hybride, avec une description des différents constituants et modes de fonctionnement du véhicule.



## IV.1 Position du problème

On possède un véhicule conventionnel à qui on veut rajouter une motorisation électrique. Le véhicule conventionnel est pour notre cas un quad. Le terme quad désigne les véhicules relevant de la catégorie des quadricycles à moteur ou bien des véhicules à quatre roues. Une image descriptive est présentée à la figure (fig IV.1) suivante.



FIGURE IV.1 – Quad thermique.

### IV.1.1 Dimensionnement de la chaîne de traction thermique

La chaîne de traction thermique est constituée essentiellement du moteur et de sa transmission comme il est montré dans la figure IV.2. Le moteur thermique est un moteur à essence,

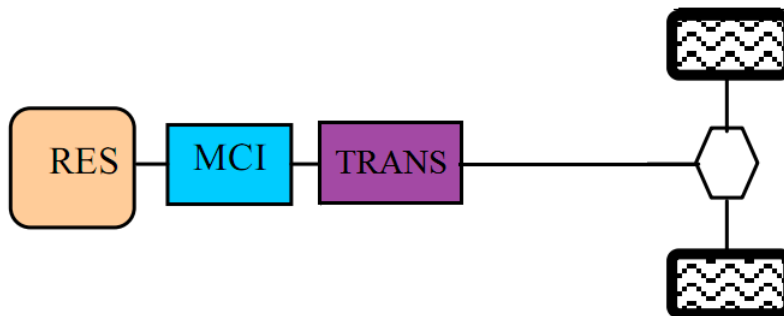


FIGURE IV.2 – Architecture thermique.

avec une transmission automatique muni de son démarreur. Les caractéristiques sont données dans le tableau IV.1.

Le moteur thermique propulse le véhicule via une chaîne qui relie l'arbre des roues arrière avec l'arbre du moteur, les grandeurs de la chaîne de traction sont définies dans la figure IV.3.

La vitesse de l'arbre de transmission est donnée par le rapport du diamètre des poulies :

$$i = \frac{N_m}{N_a} = \frac{D_a}{D_m} = \frac{Z_a}{Z_m} = \frac{37}{14} = 2.64$$

Type du moteur	Mono-cylindre, 4-Temps, 2-Valve
Puissance (kW/rpm)	7 / 8000
Couple Max (N.m /rpm)	6.9/6500
Déplacement de cylindre (cc)	108
Ratio de Compression	9 :1
Démarrreur	Electrique
Transmission	Automatique
Modèle de Carburateur	PZ20

TABLE IV.1 – Paramètres moteur thermique.

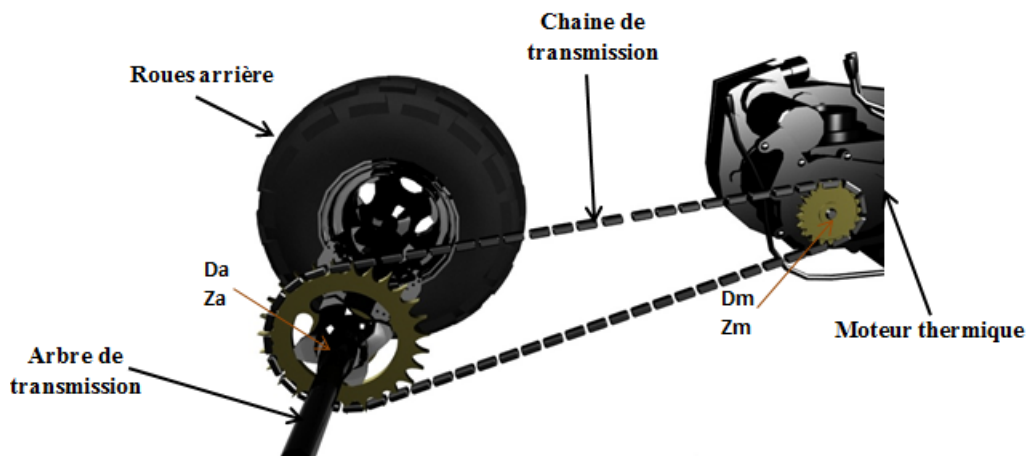


FIGURE IV.3 – La chaîne de traction thermique.

$$N_a = \frac{N_m}{i} = \frac{3000}{2.64} = 1136.36 \text{tr}/\text{min}$$

La vitesse de rotation des roues est égale à celle de l'arbre moteur :

$$N_a = N_r = 1136.36 \text{tr}/\text{min}$$

La vitesse angulaire de rotation des roues est donnée par :

$$\Omega_r = \frac{2\pi}{60} \times N_r = 1136.36 \times \frac{\pi}{30} = 118.93 \text{rad}/\text{s}$$

La vitesse linéaire du véhicule vaut alors :

$$|V| = \frac{D_r}{2} \times \Omega_r = 0.2 \times 118.93 = 23.78 \text{m}/\text{s}$$

La conversion en kilomètres par heure donne :

$$V = |V| \times \frac{3600}{1000} = 23.78 \times 3.6 = 85.63 \text{km}/\text{h}$$

avec :

$N_m$	La vitesse en $tr/min$ du moteur.
$D_m$	Le diamètre de la poulie du moteur.
$Z_m$	Nombre des dents de la poulie du moteur.
$N_a$	La vitesse en $tr/min$ de l'arbre de transmission.
$D_a$	Le diamètre de la poulie de l'arbre de transmission.
$Z_a$	Nombres des dents de la poulie de l'arbre de transmission.
$N_r$	Vitesse en $tr/min$ des roues.
$D_r$	Le diamètre de la roue.

TABLE IV.2 – Grandeurs de la chaîne de traction thermique.

## IV.1.2 Dimensionnement de la chaîne de traction électrique

### IV.1.2.1 La machine électrique

Le moteur électrique est un moteur de type brushless intégré dans la roue, ce type de moteur est appelé « moteur roue » (In-Wheel motor), où l'arbre de la roue est solidaire au stator du moteur, le rotor lui, est externe et il est lié à la partie tournante de la roue. La figure IV.4 montre la constitution d'un moteur roue et la figure IV.5 montre le moteur roue possédé au labo. Les caractéristiques du moteur sont présentées dans le tableau IV.3.

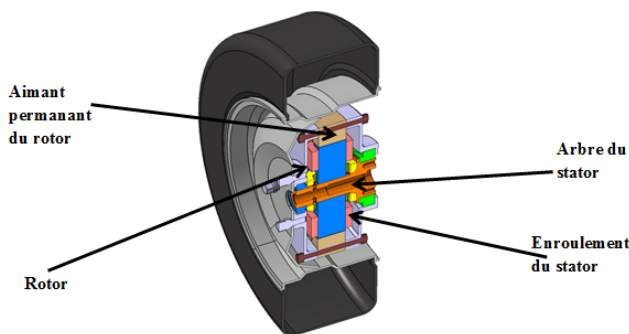


FIGURE IV.4 – Roue moteur.



FIGURE IV.5 – Moteur du labo.

Type du moteur	Brushless DC.
Tension	48V
Puissance	1000W
Taille de la roue	20 700c
Poids	5.7kg
Vitesse max	500tr/min

TABLE IV.3 – Caractéristiques du moteur.

Marque	Zhenlong.
Numéro de Type	6-DZM-20
Type	Batterie d'acide de plomb
Tension nominale	12V
Capacité nominale	30Ah
Taille	181 * 76 * 170mm

TABLE IV.4 – Caractéristiques de la batterie.

### IV.1.2.2 Alimentation du moteur électrique

La propulsion électrique du quad a besoin d'une alimentation en énergie pour pouvoir conduire le véhicule en mode électrique. Cette énergie sera stockée dans des batteries dont le type et les caractéristiques seront détaillés dans le tableau ci-dessous( IV.4). Ces batteries seront raccordées en parallèle d'une manière à garantir le bon fonctionnement des moteurs roues(figures IV.6 IV.7).



FIGURE IV.6 – Batterie.

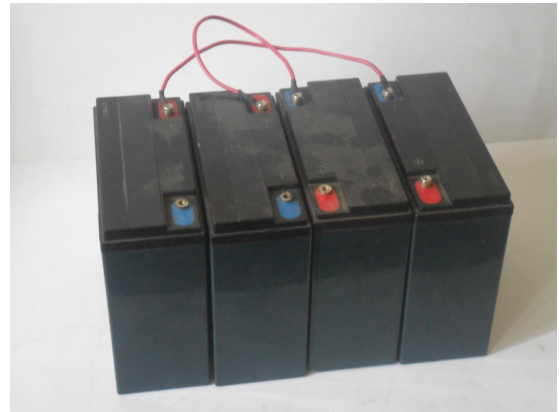


FIGURE IV.7 – Pack de batteries.

### IV.1.2.3 Convertisseur

Nous possédons deux convertisseurs. Le premier est un abaisseur de tension qui permet de convertir la tension d'entrée de 48V à une tension plus faible de 12V pour alimenter les auxiliaires.

Le deuxième est le convertisseur principal qui assure l'alimentation du moteur à partir des batterie suivant la position de l'accélérateur ( IV.8).



FIGURE IV.8 – Les deux convertisseurs.



### IV.1.3 Modification de la structure du véhicule

Pour pouvoir loger la roue motrice et construire le véhicule hybride, on a modifié la structure métallique en lui rajoutant une fourche qui portera la roue électrique, et on a fait souder la fourche au squelette du véhicule. La figure suivante montre le véhicule avant et après la modification.



FIGURE IV.9 – Quad.



FIGURE IV.10 – Trike.

En regroupant tous les éléments du véhicule hybride, on obtient l'architecture montrée à la figure IV.11. La structure nous impose une architecture de type parallèle IV.12, sauf qu'il n'y a pas un lien mécanique directe entre les deux sources de traction. Le lien se fait par le sol sur lequel le véhicule roule.



FIGURE IV.11 – Le Quad Hybride.

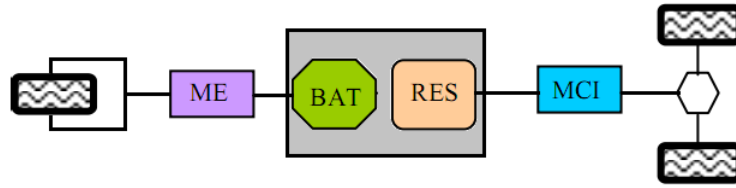


FIGURE IV.12 – L'architecture du quad hybride.

Le véhicule présente plusieurs modes de fonctionnement qui sont montrés à la figure IV.13 :

**Mode thermique pure :** Dans ce mode le véhicule est propulsé entièrement par le moteur thermique, le moteur électrique étant désactivé. Si on note le couple demandé aux roues  $C_{dem}$ , le couple fourni par les roue arrière  $C_r$  et le couple développé par la roue électrique  $C_e$ , on a :  $C_r = C_{dem}$  et  $C_e = 0$ .

**Mode électrique pure :** C'est le mode électrique, appelé le mode zéro émission, car le moteur thermique est inactif, donc le véhicule devient un véhicule électrique qui tire toute son énergie des batteries. La durée d'utilisation de ce mode dépend de l'autonomie des batteries. Ce mode inclut aussi, le freinage récupératif ou le freinage dynamique, où le véhicule récupère de l'énergie dans les phases de freinage. On a  $C_r = 0$ ,  $C_e = C_{dem}$ .

**Mode freinage récupératif :** À la phase de freinage, la roue électrique est utilisée pour récupérer l'énergie mécanique du véhicule via le moteur électrique et la stocker dans la batterie. On note,  $C_f$  le couple utilisé par la roue électrique pour recharger les batteries donc  $C_e = -C_f$ ,  $C_r = 0$ .

**Mode Boost :** Dans ce mode les deux moteurs fonctionnent en même temps, et fournissent la puissance nécessaire pour faire avancer le véhicule. Néanmoins puisque il n'y a pas de lien mécanique directe entre les deux sources de propulsion, une régulation de la roue électrique est obligatoire pour éviter que l'une des roues arrière ou avant glisse. Dans ce cas  $C_e = \alpha C_{dem}$ ,  $C_r = (1 - \alpha)C_{dem}$ . Le coefficient  $\alpha$  doit être choisit d'une façon à avoir le fonctionnement le plus optimale.

**Mode thermique avec régénération :** Le moteur thermique est utilisé pour propulser le véhicule. Une partie de la puissance est utilisée par la roue électrique pour charger la batterie, dans ce mode la machine électrique est utilisée en génératrice. Notons  $C_b$  le couple résistant pour charger la batterie. Ce qui donne alors :  $C_r = C_{dem} + C_b$ ,  $C_e = -C_b$

## IV.2 Conclusion

Dance ce chapitre on a présenté la procédure adoptée pour réaliser le véhicule hybride, et présenté aussi une description des constituants du véhicule et les différents modes de fonctionnements.

Mode Thermique pure	$C_r = C_{dem}$ $C_e = 0$	
Mode Electrique pure	$C_e = C_{dem}$ $C_r = 0$	
Mode Freinage récupératif	$C_e = -C_f$ $C_r = 0$	
Mode Boost	$C_e = \alpha \times C_{dem}$ $C_r = C_{dem} - C_e$	
Mode Thermique + régénération	$C_r = C_{dem} + C_b$ $C_e = -C_b$	

FIGURE IV.13 – Les différents modes de fonctionnement.

# Conclusion générale et perspectives

Le travail présenté dans cette étude avait pour but la réalisation d'un quad hybride à partir de son homologue conventionnel et la modélisation des différents composants.

A cet égard, des modèles pour les différents systèmes de traction ont été élaborés. Dans un premier temps un modèle dynamique du moteur thermique basé sur les lois de la thermodynamique a été construit dans le but d'analyser la consommation en carburant du véhicule.

Dans le même contexte, le système de traction électrique a été identifié en utilisant plusieurs approches allant des méthodes de bases qui considèrent le système comme un système linéaire autour d'un point de fonctionnement. Mais ces méthodes restent valables autour de ce point de fonctionnement et ne prennent pas en considération les éventuels non linéarités du système. C'est dans ce cas où des méthodes d'identifications non linéaires utilisant des approches plus modernes ont été appliqués, comme celles utilisant les réseaux de neurones ou bien le modèle de Hammerstein-Weiner qui a donné des résultats satisfaisants.

Les deux modèles ont été combinés pour former un système hybride contenant une source thermique et une source électrique. Cette combinaison s'accompagne par une gestion de répartition de puissance entre les deux sources d'énergies où les méthodes à base des règles étaient les plus adaptées pour notre situation vu la complexité du modèle. Une première approche était d'utiliser les méthodes déterministes basées sur l'état de la charge de la batterie et la puissance demandée. Ces méthodes présentent les plus simplistes, mais présentent des insuffisances quant au choix des conditions de transition entre les modes de fonctionnement. Dans ce cas, les méthodes à base de règles floues s'avèrent les mieux adaptées. Cette approche nécessite une expertise sur le système à commander, qui peut prendre un temps considérable pour acquérir. L'application des algorithmes génétiques a permis d'optimiser les paramètres du système flou et d'éviter le problème d'acquisition d'expertise.

Pour l'application pratique et la validation des méthodes de gestion d'énergie, un prototype a été réalisé. Le prototype final est un Quad hybride à trois roues qui est le résultat de la modification d'un quad conventionnel, où les deux roues avant ont été remplacées par une roue motrice électrique. Un système de stockage d'énergie a aussi été mis en place pour alimenter le moteur électrique.

Le projet n'est qu'à ces débuts, plusieurs perspectives sont envisagées :

1. La mise en place d'un banc d'essai et installation des capteurs nécessaires pour le moteur thermique afin de pouvoir mener les études sur ce dernier :
  - La modélisation de la chaîne de traction thermique.
  - L'obtention de la cartographie de la consommation du carburant.
  - L'application des différentes méthodes de contrôle.
2. La conception d'une nouvelle carte de commande pour le moteur BRUSHLESS vu l'im-



possibilité d'exploiter le présent convertisseur.

3. Des travaux sont aussi à prévoir pour la gestion des batteries : Application des différentes méthodes d'estimation de l'état de charge.
4. L'application et validation des différentes lois de gestion d'énergie sur le Quad Hybride.
5. Le Quad Hybride est d'une architecture de type parallèle avec un moteur roue, il ne permet pas la recharge des batteries à l'arrêt. On envisage de remplacer le démarreur du moteur par un générateur capable de recharger les batteries.
6. Etudier de façon théorique les propriétés de robustesses des stratégies de commande par rapport à différents types d'incertitudes : de modélisations, paramétriques, conditions de roulage...
7. Une étude peut aussi être envisagée vis-à-vis du rejet des différents polluants. Pour ce faire des capteurs spécifiques doivent être installés.

# Bibliographie

- [1] Grégory ROUSSEAU. *Véhicule hybride et commande optimale*. Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure des mines de Paris, 2008.
- [2] Nzisabira JONATHAN. *Intégration de l'ecoefcience dans la conception préliminaire des véhicules propres : une approche basée sur l'optimisation multidisciplinaire*. Thèse de doctorat, Université de Liège, 2005.
- [3] John HEYWOOD. *Internal combustion engine fundamentals*. McGraw-Hill series in mechanical engineering, 1988.
- [4] Tom GILLES. *Automotive Engines : Diagnosis, Repair and Rebuilding*. DELMAR, Cengage learning, 2011.
- [5] Marshall BRAIN. *How car engines work*. [www.howstuffworks.com](http://www.howstuffworks.com), Avril 2000.
- [6] Hubert MEMETEAU. *Technologie fonctionnelle de l'automobile, Tome 1 : Le moteur et ses auxiliares*. DUNOD, 2006.
- [7] Gordon BLAIR. *Design and simulation of two-stroke engines*. Society of Automotive engineering, Inc, 1996.
- [8] Karim NICE. *How Rotary Engines Work*. [www.howstuffworks.com](http://www.howstuffworks.com), Mars 2001.
- [9] Djamel KHIAR. *Modélisation et commande d'un moteur thermique à allumage commandé*. Thèse de doctorat, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambresis, 2007.
- [10] Marshall BRAIN. *How Diesel Engines Work*. [www.howstuffworks.com](http://www.howstuffworks.com), Avril 2000.
- [11] David CROLLA. *Automotive Engineering : Powertrain, Chassis system, and vehicle body*. Elsevier, Inc, 2009.
- [12] Loic FERRIERE. *La technologie du turbo*. [www.planeterenault.com](http://www.planeterenault.com), 2004.
- [13] Rabih OMRAN. *Modélisation du moteur diesel, en vue de sa commande dynamique par réseaux de neurones pour minimiser les émissions*. Thèse de doctorat, L'Ecole Centrale de Lyon, 2007.
- [14] Chris LONGHURST. *The transmission bible*. [www.carbibles.com](http://www.carbibles.com), 201.
- [15] STOTSKY ALEXANDER. *Automotive Engines : Control, Estimation, Statistical Detection*. Springer, 2009.
- [16] Iqbal HUSSEIN. *Electric and Hybrid vehicles, Design Fundamentals*. CRC PRESS, 2005.
- [17] Mourad DJEMAI et Mawloud TELLAA. *Commande de la vitesse et de la position d'un moteur à courant continu sans balais pour les applications en robotique*. Mémoire de fin d'étude, Ecole Nationale Polytechnique, 207.
- [18] Chang Liang XIA. *Permanent Magnet Brushless*. WILEY, 2012.

- [19] Stéphane VERWILGHEN. *Tout savoir sur les véhicules électriques*, 2010.
- [20] David LINDEN et Thomas B.REDDY. *Handbook of batteries*, third edition. McGraw Hill, 2001.
- [21] Wen-Yeau CHANG. *The State of Charge Estimating Methods for Battery : A Review*. ISRN Applied Mathematics, vol. 2013, Article ID 953792, 7 pages, 2013.
- [22] Kong-Soon NG. *An Enhanced Coulomb Counting Method for Estimating State-of-Charge and State-of-Health of Lead-Acid Batteries*. IEEE Telecommunications Energy Conference. INTELEC. 31st International, pp. 1-5, 2009.
- [23] Chin-Sien MOO. *State-of-Charge Estimation with Open-Circuit Voltage for Lead-Acid Batteries*. IEEE Telecommunications Power Conversion Conference - Nagoya, pp. 758-762, 2007.
- [24] Jay FARELLL. *Battery State-Of-Charge Estimation*. Proceedings of the American Control Conference, vol 2, pp. 1644-1649, June 2001.
- [25] I.ANAND et B.L.MATHUR. *State of Charge Estimation of Lead Acid Batteries Using Neural Networks*. IEEE International Conference on Circuits, Power and Computing Technologies. pp 596 - 599, 2013.
- [26] John CHIASSON et Baskar VAIRAMONHAN. *Estimating the State of Charge of a Battery*, 2002.
- [27] Saida KERMANI. *Gestion énergétique des véhicules hybrides : de la simulation à la commande temps réel*. Thèse de doctorat, Université de Valenciennes et du Hainaut Cambrésis, 2009.
- [28] Robyn JACKKEY. *A Simple, Effective Lead-Acid Battery Modeling Process for Electrical System Component Selection*. The MathWorks Inc, 2007.
- [29] Yann MORERE. *Identification par Réseaux de Neurones*. Mémoire de D.E.A, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambresis, 1996.
- [30] HAGAN MARTIN et DEMUTH HOWARD. *Neural Networks for Control*. Proceedings of the American Control Conference, 1999.
- [31] Lamine THIAW. *Identification des systèmes dynamiques non-linéaires par réseaux de neurones et multimodèles*. Thèse de doctorat, Université Paris XII, 2008.
- [32] G.P LIU. *Nonlinear Identification and Control : A Neural Network Approach*. Springer, 2001.
- [33] Julien SCORDIA. *Approche systématique de l'optimisation du dimensionnement et de l'élaboration de lois de gestion d'énergie de véhicules hybrides*. Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré Nancy1, 2004.
- [34] Remi DUBOUIL. *Etude par simulation des transferts thermiques dans un groupe motopulseur hybride électrique automobile*. Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Nantes, 2012.
- [35] Alexandra DUBRAY. *Adaptation des lois de gestion d'énergie des véhicules hybrides suivant le profil de mission suivi*. Thèse de doctorat, Institut Polytechnique de Grenoble, 2002.
- [36] Nour-eddine HADDADI et Mohamed Adlane MAGHENEM. *Gestion de l'énergie et optimisation du fonctionnement d'un véhicule électrique hybride*. Mémoire de fin d'étude, Ecole Nationale Polytechnique, 2013.

- [37] Jérôme BERNARD. *Véhicules hybrides à pile à combustible : dimensionnement et stratégies de commande*. Thèse de doctorat, Université de Valenciennes et du Hainaut Cambrésis, 2007.
- [38] Lotfi ZADEH. *Fuzzy sets*. Information and Control, vol 8, pp 338-353, June 1965.
- [39] Franck DERNONCOURT. *La Logique Floue : le raisonnement humain au coeur du système décisionnel*. Mémoire de NFE211, Février 2011.
- [40] Lotfi ZADEH. *Fuzzy logic = Computing With Words*. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, vol 4, No 2, Mai 1996.
- [41] François CHEVRIE et GUELY FRANÇOIS. *La Logique Floue*. Cahier technique N 191, Février 2011.
- [42] Walid HANKACHE. *Gestion Optimisée de l'Energie Electrique d'un Groupe Electrogène Hybride à Pile à Combustible*. Thèse de doctorat, Université de Toulouse, 2008.
- [43] Gerardo ACOSTA et Elias TODOROVICH. *Genetic Algorithms and fuzzy control : a practical synergism for industrial applications*. Computers in Industry, vol. 52, pp. 183-195, Avril 2003.
- [44] Zbigniew MICHALEWICZ. *Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs*. Springer-Verlag Heidelberg, New York, 1996.
- [45] Stanislaw ZAK. *Systems and Control*. Oxford University Press, 2003.
- [46] Dongrui WU. *A Brief Tutorial on Interval Type-2 Fuzzy Sets and Systems*.
- [47] Dongrui WU et Jerry MENDEL. *Perceptual Computing : Aiding people in making subjective judgments*. Hoboken, NJ : Wiley-IEEE Press, 2010.
- [48] Jerry MENDEL et Robert BOB JOHN. *Type-2 Fuzzy Sets Made Simple*. IEEE Trans. on fuzzy systems, vol. 10, no. 2, pp. 117-127, Avril 2002.
- [49] Jerry MENDEL et Qilian LIANG. *Type-2 Fuzzy Logic Systems : Theory and Design*. IEEE Trans. on fuzzy systems, vol. 8, no. 5, pp. 535-550, Octobre 2000.
- [50] Lotfi ZADEH. *The Concept of a Linguistic Variable and its Application to Approximate Reasoning*. Information Sciences, vol. 8, pp. 199-249, 1975.
- [51] Javier Solano MARTINEZ. *Modélisation et supervision des flux énergétiques à bord d'un véhicule hybride lourd : approche par logique floue type-2*. Thèse de doctorat, Université de Franche-Comté, 2012.
- [52] Nilesh KARNIK et Jerry MENDEL. *Centroid of a type-2 fuzzy set*. Information Sciences, vol. 132, pp. 195-220, 2001.
- [53] Dongrui WU et Maowen NIE. *Comparaison and Practical Implementation of Type-Reduction Algorithms for Type-2 Fuzzy Sets and Systems*. IEEE Conf. on fuzzy systems, Taipei, Taiwan, June 2011.
- [54] K.DURAN, H.BERNAL et M.MELGAREJO. *Improved iterative algorithm for computing the generalized centroid of an interval type-2 fuzzy set*. in Proc. Annual Meeting of the North American Fuzzy Information Processing Society, pp. 1-5, New York, May 2008.