

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



Ecole National Polytechnique

Département d'Automatique



## Projet de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme de Master en Automatique

Thème :

# COMMANDE DES VÉHICULE ÉLECTRIQUE HYBRIDE.

Réalisé par :

Nour-eddine HADDADI  
Mohamed Adlane MAGHENEM

Proposé et dirigé par :

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

**JUIN 2013**

## Résumé:

Cette étude se divise en deux parties indépendantes: la première partie traite la modélisation et la simulation d'un véhicule électrique hybride ayant comme source d'énergie principale un moteur thermique et une machine électrique comme source secondaire, le couplage des deux sources indique une architecture de type « parallèle simple arbre », la simulation du prototype vise à minimiser sa consommation en appliquant un ensemble de stratégies dites «stratégies de gestion de l'énergie » permettant d'optimiser la répartition de la puissance entre les deux sources. La deuxième partie portera une perspective de réalisation pratique d'un quad hybride dans laquelle la caractérisation des éléments nécessaires à la réalisation ainsi que l'architecture globale du prototype sont détaillées.

## Mots clés :

Véhicule électrique hybrides, Simulation, Modélisation, Stratégie de gestion de l'énergie, Quad.

## ملخص :

تنقسم هذه الدراسة إلى جزئين مستقلين عن بعضهما البعض: يعنى الجزء الأول بدراسة نمذجة و محاكاة سيارة كهربائية هجينة, حيث يتمثل المصدر الأساسي للطاقة في محرك حراري, أما المصدر لثاني فهو عبارة عن محرك كهربائي, طريقة ترابط المصدرين تنبئ عن هندسة من النوع توازي أحادي الجذع. الهدف المنشود من محاكاة النموذج هو التقليل من كمية الوقود المستهلك خلال شوط معين, و ذلك بتطبيق جملة من الخطط و التي تعرف بخطط تسيير الطاقة, والتي تفرض توزيعا طاويا متقنا بين المصدرين الشيء الذي يسمح بتوفير أكبر كمية ممكنة من الوقود.

أما الجزء الثاني فيحمل اقتراح إنجاز سيارة من نوع كواد هجي, إذ يتضمّن الجزء تشخيصا تاما لكافة العناصر الداخلة في تشكيل النموذج التجريبي إضافة إلى الهندسة الإجمالية لتركيب عناصره.

## كلمات مفتاحية :

السيارة الكهربائية الهجينة، المحاكاة، النمذجة، استراتيجية تسيير الطاقة، كواد.

## Summary:

This study is divided into two independent parts: The first part deals with the modeling and simulation of a hybrid electric vehicle having as main source of energy, a thermal motor and an electric machine as a secondary source, the coupling of the two sources indicates the « parallel simple tree » architecture, the prototype simulation aims to minimize its consumption by applying what we call "Energy Management Strategies " to manage the distribution of power between the two sources. The second part will cover a practical realization perspective of a hybrid quad, in which the necessary elements characterization is achieved and the overall architecture of the prototype is described.

**Key Words:** Hybrid electric vehicle, Simulation, Modeling, Energy Management Strategy, Quad.

## Dédicace :

*Nous dédions se travail à :*  
*nos familles,*  
*nos amis,*  
*et à la famille de l'école nationale polytechnique.*

## Remerciement :

Nous tenons à remercier Monsieur MS.BOUCHRIT et Monsieur K. BENMANSOUR, encadreurs de ce travail, pour leurs aides et leurs encouragements ainsi que leurs précieux conseils. Qu'ils trouvent ici l'expression de notre profonde gratitude.

Nous remercions aussi tous les Enseignants du Laboratoire de Commande des Processus pour leur disponibilité, leurs conseils et leurs efforts.

# Sommaire

La liste des symboles	6
Les abréviations	6
Introduction générale	8
<b>I Les stratégies de gestion <i>temps réel</i></b>	<b>10</b>
I.1 Etat de l'art . . . . .	10
I.1.1 Les méthodes à base de règles . . . . .	10
I.1.2 Les méthodes d'optimisation instantanée . . . . .	11
I.1.3 Les méthodes d'optimisation globale en temps réels . . . . .	11
I.2 Application des stratégies <i>on ligne</i> : . . . . .	12
I.2.1 Stratégie thermostat : . . . . .	12
I.2.2 Stratégie à base de règles déterministes : . . . . .	13
I.2.3 Approche par logique floue . . . . .	14
I.2.4 Stratégie (LMS) . . . . .	20
I.3 Conclusion : . . . . .	26
<b>II Etude préliminaire d'une réalisation expérimentale</b>	<b>27</b>
II.1 Le quad conventionnel . . . . .	27
II.1.1 Eléments d'un quad conventionnel . . . . .	27
II.1.2 Dimensionnement de la chaine de traction . . . . .	30
II.2 La chaine de traction électrique . . . . .	31
II.2.1 Approvisionnement en énergie . . . . .	31
II.2.2 Le moteur électrique . . . . .	32
II.2.3 La structure globale de Commande . . . . .	33
<b>Conclusion générale et perspectives</b>	<b>37</b>
<b>Références bibliographiques</b>	<b>38</b>

# La liste des symboles

**a et b** : Coefficients de résistance au roulement.

$C_e$  : Couple électrique en  $Nm$ .

$C_{emax}$  : Couple électrique maximum en  $Nm$ .

$C_{emin}$  : Couple électrique minimum en  $Nm$ .

$C_{eopti}$  : Couple électrique optimal en  $Nm$ .

$C_r$  : Couple aux roues en  $Nm$ .

$C_{res}$  : Couple résistant en  $Nm$ .

$C_{th}$  : Couple thermique en  $Nm$ .

$C_{thmax}$  : Couple thermique maximum en  $Nm$ .

$C_{thmin}$  : Couple thermique minimum (résistant) en  $Nm$ .

$C_{thopti}$  : Couple thermique optimal (résistant) en  $Nm$ .

$C_x$  : coefficient de traînée.

$D(W_{th}, C_{th})$  : Débit de carburant nécessaire pour produire le couple  $C_{th}$  au régime moteur  $W_{th}$  en  $g/s$ .

$Dx_{desire}$  : Variation désirée de l'état de charge en  $Ah$ .

$Dx_{global}$  : Variation globale de l'état charge en  $Ah$ .

$E_b$  : Tension à vide de la batterie en  $V$ .

$EMB$  : Etat de l'embrayage :  $\{0,1\} = \{\text{ouvert}, \text{fermé}\}$ .

$F_{aero}$  : Force résistante aérodynamique en  $N$ .

$F_{frein}$  : Force du frein mécanique en  $N$ .

$F_{grav}$  : Force résistante de la gravité en  $N$ .

$F_{res}$  : Somme des forces résistantes en  $N$ .

$F_{roul}$  : Force résistante gravité en  $N$ .

$F_{trac}$  : Forces de traction du véhicule en  $N$ .

$g$  : Accélération de la gravité en  $m/s^2$ .

$H$  : L'Hamiltonien.

$I_b$  : Courant batterie en  $A$ .

$i, j$  : Numero d'échantillon.

$J_{roue}$  : Inertie à la roue en  $kg/m^2$ .

$J_{th}$  : Inertie du moteur thermique en  $kg/m^2$ .

$k$  : Numéro du rapport de boîte.  
 $m_{GMP}$  : masse inertielle de tous les éléments en rotation du groupe motopropulseur y compris les roues en  $kg$ .  
 $m_v$  : Masse du véhicule sans tenir compte des inerties des parties tournantes en  $kg$ .  
 $m_{vt}$  : Masse totale y compris les inerties des parties tournantes en  $kg$ .  
 $N_{bv}$  : Nombre de rapports disponibles.  
 $P_{AUX}$  : Puissance des auxiliaires électriques en  $W$ .  
 $P_b$  : Puissance batterie (pertes résistives et faradiques comprises) en  $W$ .  
 $P_e(C_e, W_e)$  : Puissance perdue dans l'ensemble (machine électrique+convertisseur) en  $w$ .  
 $R$  : Rayon du pneu en  $m$ .  
 $R_b$  : Résistance interne en  $ohm$ .  
 $R(k)$  : rapport de réduction du  $k$  ième numéro de rapport.  
 $S_f$  : surface frontale du véhicule en  $m^2$ .  
 $SOC$  : Etat de charge(State Of Charge) en  $\%$ .  
 $T_e$  : Periode d'échantillonnage en  $s$ .  
 $t_f$  : Durée du profil de vitesse en  $s$ .  
 $U_b$  : Tension de la batterie en  $V$ .  
 $u(i)$  : Vecteur commande à  $t = i.T_e$ .  
 $U(w)$  : l'ensemble des commandes admissibles.  
 $V_r$  : Vitesse véhicule en  $m/s$ .  
 $W_e$  : Régime électrique en  $rad/s$ .  
 $W_{emax}$  : Régime électrique maximum en  $rad/s$ .  
 $W_{emin}$  : Régime électrique minimum en  $rad/s$ .  
 $w(i)$  : Conditions de roulage du véhicule.  
 $W_r$  : Régime de la roue en  $rad/s$ .  
 $W_{th}$  : Régime thermique en  $rad/s$ .  
 $W_{thmax}$  : Régime thermique maximum en  $rad/s$ .  
 $W_{thmin}$  : Régime thermique minimum (ralenti) en  $rad/s$ .  
 $X_{maxi}$  : Etat de charge maximal en  $Ah$ .  
 $X_{mini}$  : Etat de charge minimal en  $Ah$ .  
 $\theta$  : Etat du moteur thermique :  $\{0,1\}=\{\text{éteint,allumé}\}$ .  
 $\eta_{bv}(k)$  : rendement du  $k$  ième numéro de rapport.  
 $\rho$  : rapport de réduction du réducteur.  
 $\eta_{red}$  : Rendement du réducteur.  
 $\rho_{air}$  : masse volumique de l'air en  $kg/m^3$ .  
 $\lambda$  : Facteur de Lagrange.  
 $\alpha$  : Pente de la route en rad.

# Les Abréviations

**AUX** : Auxiliaires électriques.

**BAT** : Batterie.

**BV** : Boite de vitesse.

**EMB** : Embrayage.

**GMP** : Groupe Moto-Propulseur.

**MCI** : Moteur à combustion interne.

**ME** : Machine électrique.

**VE** : Véhicule électrique.

**VEH** : Véhicule hybride.

# Introduction générale

Dans le cadre de l'obtention du diplôme de master et dans la continuité du travail effectué dans le cadre de l'ingénieur, ce document contiendra deux nouveaux chapitres, le premier portera sur la description ainsi que l'évaluation d'un certain nombre de stratégies de type temps réel. En effet, ces techniques de gestion s'appliqueront sur le modèle de commande d'un prototype réel dont les caractéristiques sont reprises de la littérature, dans le but d'évaluer le minimum de consommation possible pour chaque approche.

Quant au deuxième, il portera une perspective de réalisation d'un quad hybride à partir de son homologue conventionnel, muni d'un moteur thermique, et de deux roues ayant chacune un moteur électrique intégré. Une caractérisation des éléments nécessaires à la réalisation de la chaîne hybride sera détaillée dans ce chapitre, ainsi que l'architecture globale du prototype annoncé.

# Chapitre I

## Les stratégies de gestion *temps réel*

### I.1 Etat de l'art

Les stratégies temps réel abordent un problème sous optimale, en d'autre terme elles se basent sur une optimisation instantanée du critère. Les travaux dans ce sens incarnent les trois axes cités ci-dessous :

#### I.1.1 Les méthodes à base de règles

##### I.1.1.1 Les méthodes à base de règles déterministes [1]

Ce type de stratégie de contrôle est basé sur la fixation de règles prédéfinies et les implémenter dans le calculateur du véhicule hybride, qui vont permettre de définir le point de fonctionnement de chacune des deux parties de la propulsion en fonction des conditions de vitesse et d'accélération imposées par le véhicule, tout en gardant en considération les limitations imposées par les éléments du groupe motopropulseur (limitations sur les couples, l'état de charge de la batterie ...).

Le plus souvent, ces modes de propulsions (règles de fonctionnement) visent à optimiser le fonctionnement du moteur à combustion interne. Celui-ci est à la fois le principal producteur d'énergie dans le véhicule, ainsi que l'élément ayant non seulement le plus faible rendement global, et dont la variation est la plus influencée par le point de fonctionnement de se dernier (rendement maximal autour de 40% et pouvant descendre jusqu'à quelques% lors d'un fonctionnement à faible puissance)[2].

##### I.1.1.2 Les méthodes à base de règles floues [3]

Les lois décrites précédemment deviennent relativement complexes et font intervenir de nombreuses entrées (l'état de charge, le couple et la puissance aux roues...) et de nombreux modes de fonctionnement. La gestion de ces entrées se fait par un bon nombre de teste et de boucles imbriquées ce qui rend la technique assez complexe et la manière de passer d'un mode à l'autre assez brusque (transition tout ou rien). Part contre l'utilisation des règles floues permet une meilleure lisibilité de la méthode de gestion et améliore le confort de conduite par des changements de mode de fonctionnement plus souples[2],[4].

## I.1.2 Les méthodes d'optimisation instantanée

Les stratégies de commande dites d'optimisation locale ou instantanée s'appuyant sur une analyse fine des comportements des flux énergétiques. Ces méthodes consistent à choisir à chaque instant le point de fonctionnement du groupe motopropulseur qui minimise la consommation instantanée en carburant et assure le maintien de l'état de charge dans une fourchette admissible, les deux approches les plus populaires sont [5] :

### I.1.2.1 La méthode LMS (Loss Minimization Strategy)

L'objectif est de choisir la répartition de puissance qui minimise la somme des pertes dans la chaîne de traction hybride (moteur thermique, convertisseurs, machine électrique, organes de transmissions.) pour une valeur de couple et de vitesse aux roues, et pour chaque rapport de boîte possible. Cependant, dans ces conditions l'état de charge n'est pas contrôlé. Il est donc nécessaire d'introduire une fonction de sensibilité qui va déplacer ce point de fonctionnement en faveur d'un état de charge admissible de la batterie [6].

### I.1.2.2 La méthode ECMS (Equivalent Consumption Minimization Strategy)

La méthode ECMS est une stratégie de commande instantanée fréquemment utilisée [7] dans laquelle la batterie est considérée comme un réservoir auxiliaire de carburant réversible. Si nous considérons le cas des VEHS non rechargeables, la décharge de la batterie à un instant donné sera compensée par une recharge ayant lieu plus tard, provenant :

- de la récupération au freinage.
- de la recharge directe par le moteur thermique (flux série).

De ce fait l'objectif de la méthode est de trouver la répartition de puissance entre les deux organes qui minimise et la consommation instantanée en carburant et la consommation de carburant équivalente à la recharge de la batterie aux instants ultérieurs.

Comme dans la stratégie de minimisation instantanée des pertes, il est nécessaire de prendre en compte une fonction de sensibilité permettant de favoriser le maintien de l'état de charge de la batterie. Sans quoi l'état de charge batterie ne ferait que diminuer [6].

## I.1.3 Les méthodes d'optimisation globale en temps réels [7]

Ces techniques exploitent les algorithmes hors ligne de deux manières différentes : La première manière consiste à tirer profit des résultats issues des essais sur des parcours différents afin de métriser l'ordre de grandeur et l'influence de certaines variables sur la solution finale [5],[8]. La deuxième façon est de faire fonctionner ces algorithmes en temps réel avec un profil futur construit soit à partir des systèmes de navigation (GPS) ou bien une base de données plus une commande prédictive (approches stochastiques, réseaux de neurones...). Il existe d'autres approches plus ou moins connues qui sont d'ailleurs bien étalées dans [7], [8].

## I.2 Application des stratégies *on ligne* :

### I.2.1 Stratégie thermostat : [5], [9]

#### I.2.1.1 Principe

C'est une stratégie à base de règles qui consiste à gérer les arrêts-démarrages du moteur thermique en fonction de l'état de charge de la batterie, si celle-ci atteint sa limite basse ( $X_{mini}$ ), le moteur thermique est allumé (ON) et fonctionne sur sa plage de rendement maximal. Une partie de sa puissance fournie assure la traction du véhicule, et le supplément d'énergie est utilisé pour recharger la batterie. Si à l'inverse le stockeur atteint sa limite haute d'état de charge ( $X_{maxi}$ ), on éteint le moteur thermique (OFF) et on utilise la batterie pour assurer la traction du véhicule en mode *électrique pur* jusqu'à ce que l'état de charge atteigne sa limite minimale.

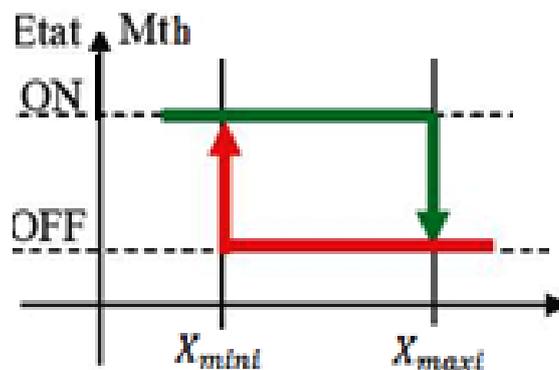


FIGURE I.1 – Schéma de principe de la méthode thermostat

Certains auteurs appellent cet algorithme : *la stratégie thermostat*. Ce type de stratégie est destiné à des véhicules hybrides disposant des machines électriques de forte puissance et de batteries de grandes capacités [7].

En outre, cette stratégie reste assez simpliste de par deux raisons on cite [2] :

1. elle ne peut pas satisfaire la demande en puissance du véhicule pour toute condition de fonctionnement.
2. aucune notion de minimisation de combustible n'est prise en compte par cette stratégie.

#### I.2.1.2 Résultat et simulation

Etant donnée un état de charge initial  $X_1 = 60\%$ , et une variation admissible entre  $X_{mini} = 55\%$  et  $X_{maxi} = 65\%$ , nous avons obtenu une variation d'état de charge globale  $Dx_{global}$  de 1.18% et une consommation finale de 6.84 l/100km. La figure suivante montre la répartition des couples entre les deux organes de traction ainsi que l'évolution de l'état de charge. On voit bien qu'au début la traction s'est faite en mode électrique pur, jusqu'à ce que la batterie ait atteint sa limite de charge minimale, le mode hybride avec régénération prend le relai afin d'assurer la traction et la recharge de la batterie.

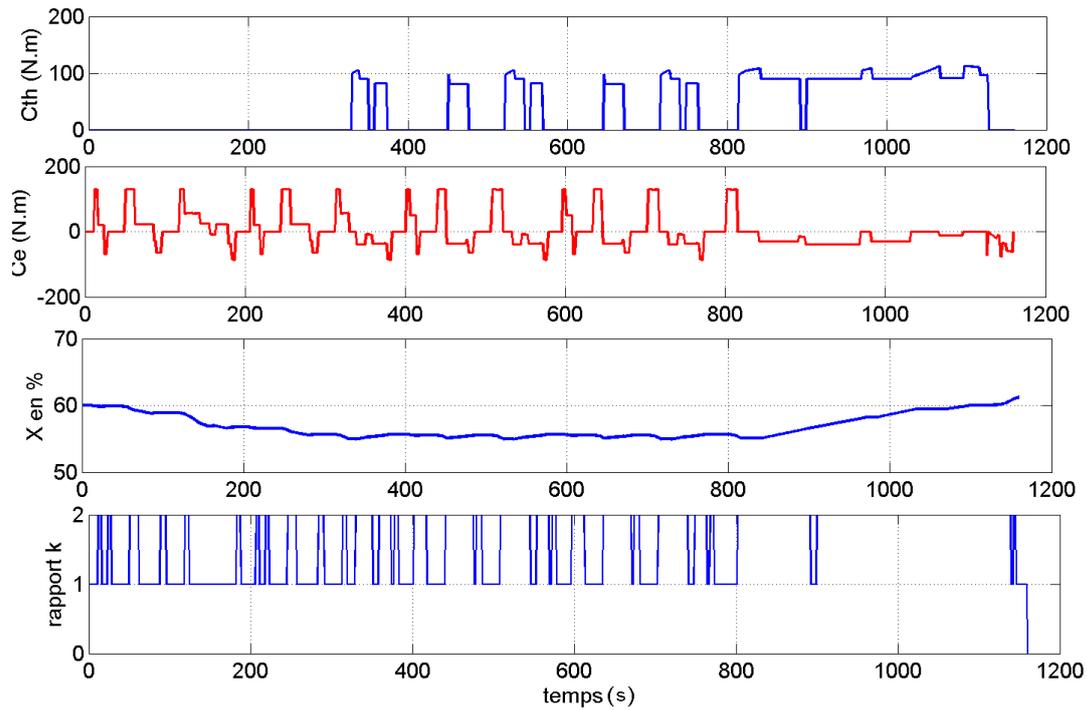


FIGURE I.2 – Evolution des couples+état de charge par l'approche thermostat

## I.2.2 Stratégie à base de règles déterministes :

### I.2.2.1 Principe

L'idée générale derrière l'utilisation de cette technique est de garantir un fonctionnement du moteur thermique aux voisinages des points à rendement maximal ainsi que de maintenir l'état de charge à l'intérieur d'une fourchette admissible.

Pour se faire on considère que l'état de charge de la batterie appartient à l'un des trois ensembles suivants caractérisant les modes de fonctionnement possibles :

1. *Batterie déchargée* : si  $X(i) < X_{mini}$
2. *Batterie mi-chargée* : si  $X_{mini} < X(i) < X_{maxi}$
3. *Batterie surchargée* : si  $X(i) > X_{maxi}$

En suite pour chaque mode on définit une base de règle adaptée permettant d'optimiser le fonctionnement du moteur thermique. Comme exemple illustratif, l'organigramme suivant représente la base de règle concernant le mode *batterie déchargée*. En effet, dans le cas où la batterie est déchargée, on teste le couple demandé aux roues, si ce dernier est positif (demande d'accélération), alors on fait fonctionner le Mth à des puissances élevées (optimales) et on utilise le surplus pour recharger la batterie. Par contre s'il est négatif (demande de freinage), il assure soit à lui seul la recharge de la batterie (cas des fortes décélérations), soit en complétant la recharge par la source thermique (cas des faibles décélérations).

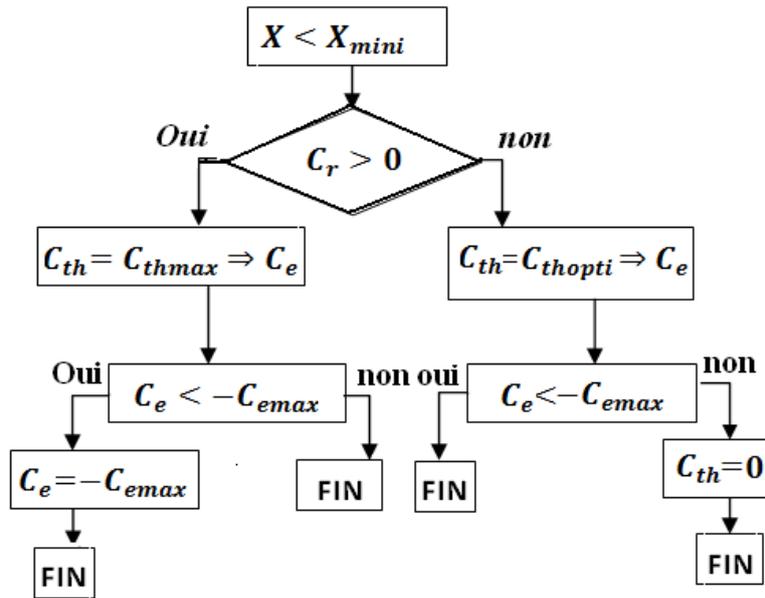


FIGURE I.3 – Organigramme du mode batterie déchargée

### I.2.2.2 Résultat et simulation

Les résultats des règles déterministes ne sont pas loins de ceux issus de la stratégie thermostat, en effet, pour les mêmes conditions nous avons obtenu cette fois une variation globale de l'état de charge  $Dx_{global} = -0.3\%$  et une consommation finale de 6.7 l/100km.

Les résultats de simulation de cette approche sont présentés dans la figure ci-dessous : On constate qu'au voisinage de l'instant  $t = 1000s$  une oscillation haute fréquence apparait, ce phénomène est dû à une commutation entre deux modes imposants des fonctionnements différents voire complémentaires. Pour remédier à ce type de problèmes deux solutions sont envisageable :

1. une première consiste à augmenter le nombre de mode de fonction, jusqu'à ce qu'ils puissent imposer des modes fonctionnements proches.
2. une deuxième façon fait appelle à la logique floue, qui sera abordée dans la partie qui suit.

## I.2.3 Approche par logique floue

### I.2.3.1 Introduction

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

La logique floue offre un modèle mathématique très adéquat pour la résolution des problèmes où l'on fait appel à des expressions du langage naturel. Sa caractéristique fondamentale est

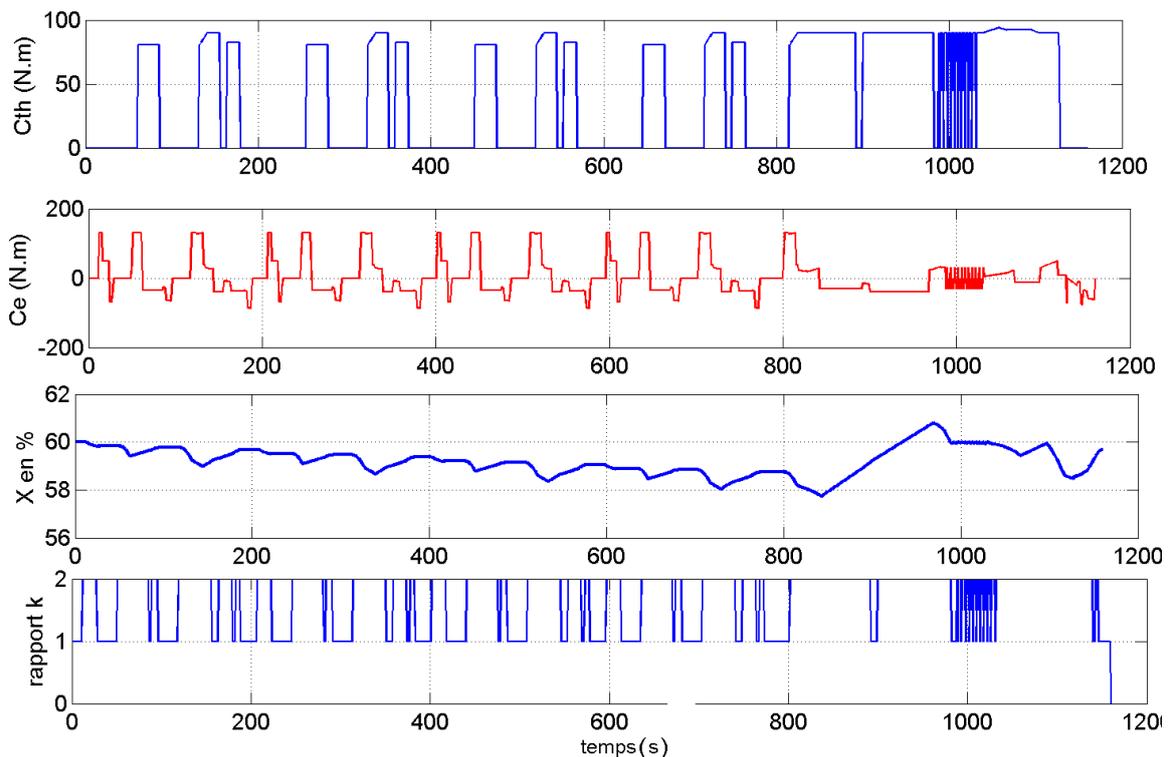


FIGURE I.4 – simulation des règles déterministes

l'utilisation des variables linguistiques au lieu des variables numériques dans des situations conditionnelles floues. Par ceci, elle se veut un pas vers un rapprochement entre la précision de la logique classique et la subtile imprécision du monde réel.

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

Afin de permettre un traitement numérique, il est indispensable que les variables linguistiques soient soumises à une définition à l'aide des fonctions d'appartenance. La fonction d'appartenance prend des valeurs comprises entre 0 et 1 de manière graduelle : le caractère graduel des sous-ensembles flous correspond à l'idée que plus on se rapproche de la caractérisation typique d'une classe, plus l'appartenance à cette classe est forte [10].

La logique floue semble particulièrement adaptée à la gestion d'énergie dans un véhicule hybride dont le modèle est si complexe et fortement variable, c'est la raison pour laquelle l'expertise doit intervenir. En effet, la logique floue possède la robustesse nécessaire pour contrecarrer les variations paramétriques.

Les objectifs visés sont :

1. Satisfaire la demande en puissance du conducteur.
2. Réduire la consommation en carburant.
3. Maintenir l'état de charge de la batterie entre 55% et 65%.

### I.2.3.2 Le contrôleur flou [10]

On peut citer quelques types de contrôleurs flous : Mamdani, Larsen, Sugéno...

Un correcteur *Sugéno* a été choisi pour une simple raison : il est le plus répandu dans le domaine des véhicules hybrides, [11]. Pour *Sugéno* les conséquences des règles sont des valeurs discrètes et pour calculer une sortie du correcteur, il procède suivant trois étapes [11] :

**La fuzzification** : consiste à associer à chaque valeur d'entrée un degré d'appartenance correspondant. Le degré d'appartenance de l'antécédent est calculé de la façon suivante :

Si  $x_1$  est A et  $x_2$  est B alors :

$$\mu_{A \cap B} = \min(\mu_A(x_1), \mu_B(x_2))$$

Si  $x_1$  est A ou  $x_2$  est B alors :

$$\mu_{A \cup B} = \max(\mu_A(x_1), \mu_B(x_2))$$

Si  $x_1$  n'est pas A alors :

$$\mu_{\bar{A}} = 1 - \mu_A(x_1)$$

**L'inférence** : la conséquence du mode  $c_i$  est modifiée en la multipliant par le degré d'appartenance au sous  $i$  i.e.  $(\mu_i \cdot c_i)$ .

**L'accumulation** : Le degré d'appartenance est calculé suivant la formule suivante :

$$u = \frac{\sum_{i=1}^n \mu_i \cdot c_i}{\sum_{i=1}^n \mu_i}$$

$n$  : nombre de règles.

### I.2.3.3 L'approche floue-vitesse : [4]

Le mode de traction du véhicule hybride dépend de l'environnement dans lequel ce dernier évolue ainsi que de l'état de charge de la batterie.

Ce qui justifie le choix pour la gestion par analyse de la vitesse du véhicule ( $V_r$ ) et de l'état de charge de la batterie ( $SOC$ ).

L'idée est de favoriser le mode électrique en ville pour réduire les émissions des polluants, et le mode thermique sur autoroute où le moteur thermique pourra servir à la recharge de la batterie. Cependant le mode tout électrique ou même hybride va dépendre de l'état de charge de la batterie qui doit être suffisant pour satisfaire la demande en puissance, et ces différentes situations peuvent être traduites aux travers d'inférences floues.

**I.2.3.3.1 Fuzzification** La variable  $V_r$  est décomposée en quatre sous ensembles : **B** Bouchon, **V** Ville, **R** Route, **AR** AutoRoute, et nous décomposons l'état de charge  $SOC$  en trois sous ensembles : **F** Faible, **N** Nominal, **H** Haute.

Rappelons que les rapports de boîtes, sont fixés de la même manière que la méthode précédente.

Quant la batterie, elle garde les mêmes sous-ensembles que ceux de l'approche précédente.

Les fonctions d'appartenance de la vitesse du véhicule et de l'état de charge de la batterie sont représentées aux travers des figures suivantes :

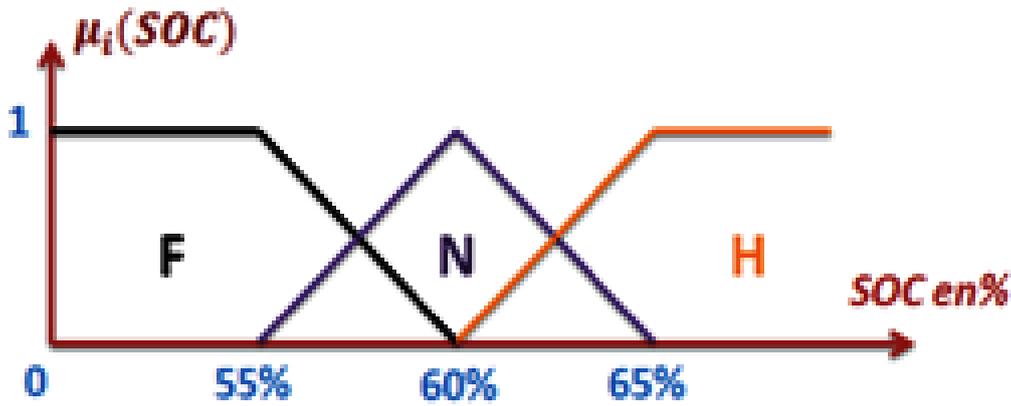


FIGURE I.5 – Fonction d'appartenance de SOC aux sous ensembles flous

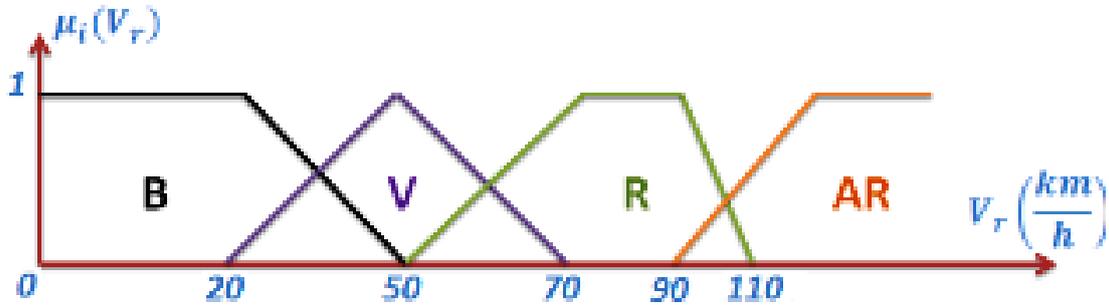


FIGURE I.6 – Fonction d'appartenance de Vr aux sous ensembles flous

**I.2.3.3.2 Table de règles** En fonction de l'état de charge de la batterie et de la vitesse du véhicule, on peut définir des bases de règles qui traduisent l'intérêt d'utilisation des trois modes de fonctionnement : **E** Electrique, **T** Thermique ou bien **H** Hybride. ainsi le Tableau suivant les illustre :

$SOC \backslash V_r$	B	V	R	AR
F	H	H	T	T
N	E	H	T	T
H	E	E	H	T

TABLE I.1 – Table d'inférence de l'approche floue-vitesse

**I.2.3.3.3 Résultats et simulation** Avec cette approche, on a des couples thermiques faibles au début donc un mauvais rendement puis ils s'élèvent. Ceci est dû au principe de la méthode, du fait qu'elle s'intéresse uniquement à la vitesse sans tenir compte du couple demandé.

Le rapport de boîte varie moins rapidement que celui des approches précédentes mais il reste tout de même assez par rapport à un fonctionnement réaliste.

En effet, on a obtenu une décharge de 0.19% bien meilleur que la précédente, avec une consommation de 6.283 L/100Km soit un gain de 21.46% par rapport au mode conventionnel.

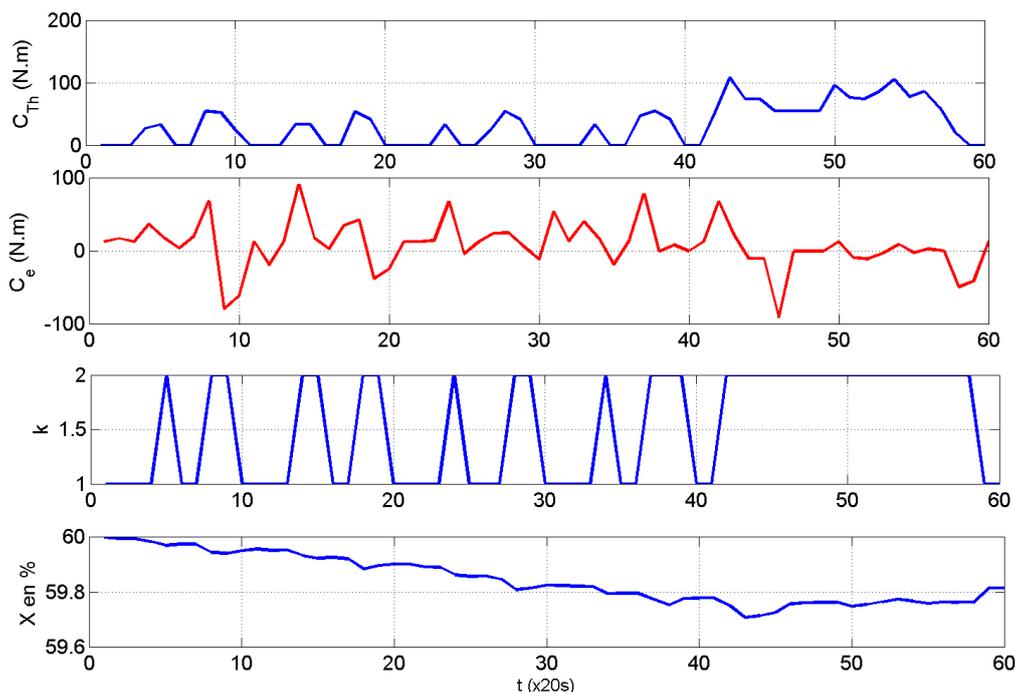


FIGURE I.7 – Résultat de l’approche floue-vitesse

### I.2.3.4 L’approche floue-couple

Le régulateur flou choisi possède deux entrées : le couple demandé aux roues  $C_r$ , l’état de charge de la batterie  $SOC$  et le rapport de boîte  $R(k)$ . Il fournit en sortie le couple du moteur thermique  $C_{Th}$  ainsi que le couple du moteur électrique  $C_e$ .

Dans la suite, une description des fonctions d’appartenance des deux entrées sera présentée.

**I.2.3.4.1 L’état de charge** La fonction d’appartenance de l’état de charge est représentée par la figure suivante :

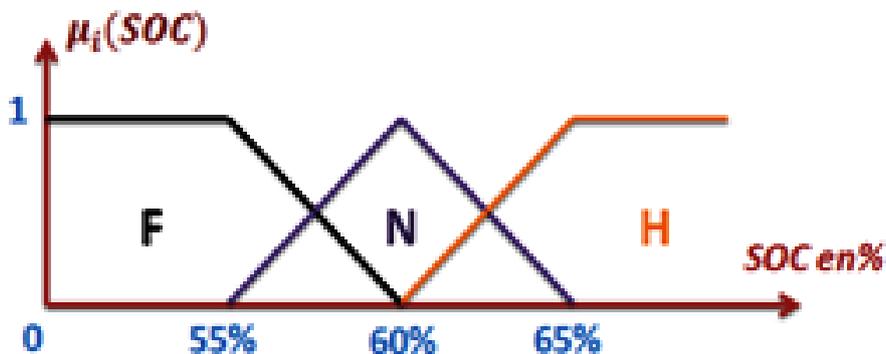


FIGURE I.8 – Fonction d’appartenance de SOC aux sous ensembles flous

Trois variables linguistiques ont été choisies pour décrire l’état de charge selon le cas **F** caractérisant un état de charge faible, **N** un état de charge nominale et **H** un état de charge élevé.

**I.2.3.4.2 Le couple demandé aux roues** La fonction d'appartenance du couple demandé aux roues est illustrée par la figure suivante :

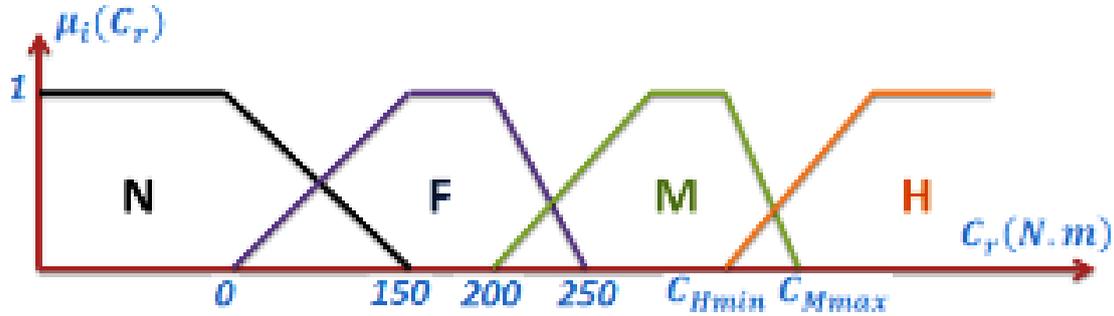


FIGURE I.9 – Fonction d'appartenance de  $C_r$  aux sous ensembles flous

Avec : **N** caractérisant des couples négatifs, **F** des couples faibles, **M** des couples moyens et **H** des couples élevés.

$$C_{Hmin} = 0.9 * C_{thmax} * R(k) * \eta_{BV}^{sign(C_r)}$$

$$C_{Mmax} = C_{thmax} * R(k) * \eta_{BV}^{sign(C_r)}$$

En ce qui concerne le rapport de boite, se dernier est choisi de manière à satisfaire la contrainte suivante :

$$0rad/s < w_{th} < 260rad/s$$

Cette contrainte fut établie empiriquement, tenant compte de la puissance du moteur thermique [5].

**I.2.3.4.3 La base de règle** Une fois les entrées du système de décision choisies, et leurs fonctions d'appartenance aux différents sous-ensembles définis, il faut passer à la base de règles qui a pour but de structurer la connaissance que l'on a sur le contrôle du processus Hannoun.2005.

Notre but est de réduire la consommation de carburant et ceci est possible si le moteur thermique fonctionne dans la plage de son meilleur rendement donc l'idée c'est d'essayer de placer ce couple sur ça courbe optimale. Malheureusement les contraintes sur l'état de charge de la batterie et sur le couple du moteur électrique ne laisseront jamais le couple du moteur thermique toujours sur la courbe optimale, mais on essayera de s'en rapprocher le plus possible.

$SOC \backslash C_r$	N	F	M	H
F	E	H	H	T
N	E	E	H	T
H	F	E	E	H

TABLE I.2 – Table d'inférence de l'approche floue-couple

Avec **E** caractérisant le mode Electrique pur, **H** le mode Hybride, **T** le mode Thermique pur et **F** le mode Freinage mécanique. Notons que le mode hybride sous entend soit le mode *boost*, soit le mode *régénération*.

**I.2.3.4.4 résultat et simulation** Avec cette méthode, on a des couples thermiques élevés donc un bon rendement, des rapports de boîte à faible fréquence de variation, donc : *réalistes*, cela est dû au fait que ces rapports de boîte sont déterminés d'une manière empirique et non pas par l'optimisation.

La variation globale de l'état de charge est de -0.4% avec une consommation de 5.078 L/100Km c'est-à-dire un gain de 36.52% par rapport au mode conventionnel.

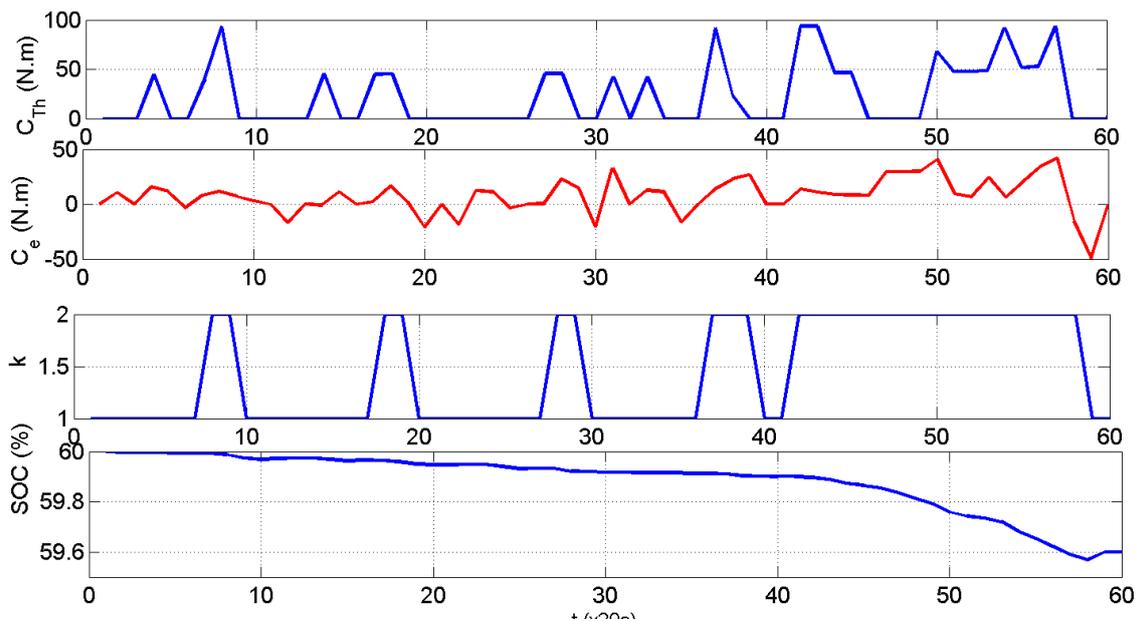


FIGURE I.10 – Résultat de l'approche flou-couple

## I.2.4 Stratégie de Minimisation des pertes (LMS) :[5]

Les pertes dans les différents composants du groupe motopropulseur peuvent être estimées, soit à l'aide de modèles de connaissances, soit par des mesures sur bancs d'essais (cartographies). La stratégie de commande « *Loss Minimization Strategy (LMS)* » propose d'utiliser ces informations pour choisir, la répartition de puissance entre les deux moteurs qui minimise les pertes dans le groupe motopropulseur.

### I.2.4.1 Principe

À chaque instant, seule une partie de l'énergie prélevée dans la batterie et dans l'essence consommée sert effectivement à la propulsion du véhicule. L'autre partie est constituée par les pertes du moteur thermique, du moteur électrique, de la batterie, du réducteur, et de la boîte de vitesses. Cette stratégie de commande est basée sur une minimisation instantanée de ces pertes dans le groupe motopropulseur.

1. *Puissance perdue dans la boîte de vitesse* :  $L_{bv} = C_r \cdot W_r \cdot \left| 1 - \frac{1}{\eta_{bv}^{sign(C_r)}} \right|$

2. Puissance perdue dans le réducteur :  $L_r = C_e \cdot W_e \cdot \left| 1 - \frac{1}{\eta_{red}^{sign(C_e)}} \right|$

3. Puissance perdue dans le moteur thermique :

Sachant que :

$$C_{spec}(W_{th}, C_{th}) = \frac{Q(C_{th}, W_{th})}{C_{th} \cdot W_{th}} = \frac{1}{rend_{th} \cdot E}$$

Alors on définit les pertes dans le moteur thermique de la manière suivante :

$$L_{th}(W_{th}, C_{th}) = \frac{Q(C_{th}, W_{th})}{C_{specmin}} - C_{th} \cdot W_{th} \text{ avec : } C_{specmin} = \frac{1}{rend_{thmax} \cdot E}$$

4. Puissance perdue dans l'ensemble (moteur électrique+batterie) :

$$L_e(C_e, W_e) = P_e(C_e, W_e) + R_b \cdot I_b^2 = P_{bat}(C_e, W_e) - C_e \cdot W_e$$

D'où les pertes totales dans le GMP sont :  $L_{tot} = L_{bv} + L_r + L_e + L_{th}$

### I.2.4.2 Gestion de l'état de charge

La gestion de l'état de charge est une étape très importante dans le but est de le contenir à l'intérieur d'une fourchette imposée par la contrainte sur l'état de charge, sans quoi une décharge excessive de la batterie aura lieu, cela se justifiera par le fait que la plus grande partie des pertes concerne le moteur thermique, des lors, pour pouvoir minimiser les pertes totales du GMP, il doit falloir compter un peu plus sur la ME, que sur le Mth.

La figure suivante présente l'évolution de l'état de charge pour cette application sans tenir compte de l'évolution de l'état de charge de la batterie :

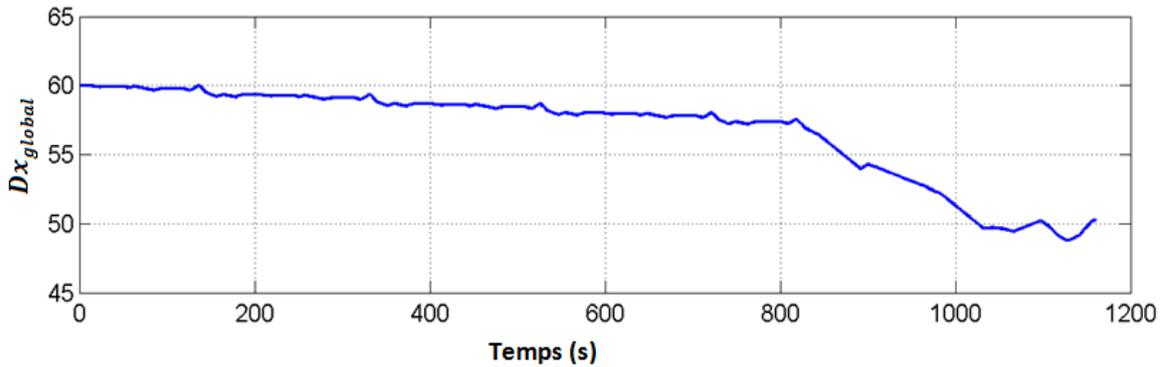


FIGURE I.11 – Evolution de l'état de charge pour une LMS grossière

Cette méthode nous garantit une consommation très réduite égale à 4.05 l/100km, mais au détriment d'une décharge importante en fin de cycle de -4.15% de la charge maximale que peut contenir la batterie.

**I.2.4.2.1 Gestion par changement de critère** Le principe est simple, il suffit de changer le critère à minimiser dès qu'il ait un débordement dans l'état de charge selon l'algorithme suivant :

Si  $X \in [X_{mini}, X_{maxi}]$  alors :

$$J = L_{tot}$$

Si  $X > X_{maxi}$  alors :

$$J = -P_{bat}$$

Si  $X < X_{mini}$  alors :

$$J = P_{bat}$$

**Résultat et simulation** Rappelons que :  $X_{mini} = 55\%$  et que  $X_{maxi} = 65\%$  et  $X_1 = 60\%$ .

La consommation totale du cycle est de 5.18 l/100km accompagnée d'une décharge de la batterie de -3.4%. On remarque que lorsque l'état de charge est contenu dans la fourchette admissible l'évolution est similaire au cas précédant, seulement dès que le niveau de charge franchie sa limite de fonctionnement minimale un changement de critère tend à le ramène à l'intérieur de la zone admissible.

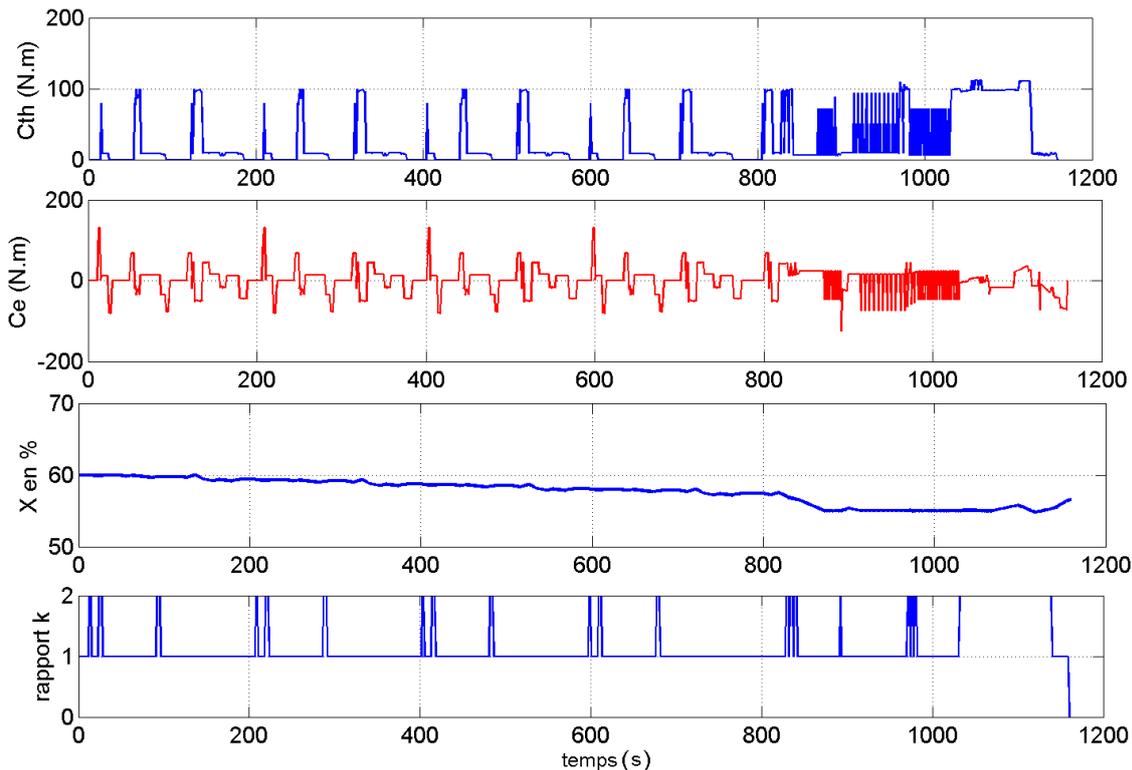


FIGURE I.12 – Simulation de l'approche (LMS+changement de critère)

Cette commutation brusque entre deux critères imposants des fonctionnements différents conduit souvent à des oscillations hautes fréquences de la commande (ce qui est d'ailleurs observé au voisinage de l'instant d'échantillonnage  $t = 1000s$ ). En effet, ces variations peuvent être filtrées par des filtres d'ordre 1 [5].

### I.2.4.2.2 Gestion par changement de critère + fonction de sensibilité

La fonction de sensibilité est donnée par la formule suivante :  $S = \frac{L_{tot} - L_{tot}^*}{P_{bat} - P_{bat}^*}$ , En d'autre terme étant donné le critère  $J = L_{tot}$ , après optimisation de se dernier nous obtenons  $L_{tot}^* = \min J$ , et se pendant la puissance correspondante fournie par la batterie serait :  $P_{bat}^*$ . Seulement, dans le cas où il y aura débordement de l'état de la batterie il y aura changement de critère avec  $J = \pm P_{bat}$ , qui ne va plus considérer les éventuelles pertes, à ce moment on cherche à limiter sa sensibilité aux pertes notée  $S$ , par une sensibilité limite notée :  $S_{lim}$  selon l'algorithme suivant :

Si :  $X \in [X_{mini}, X_{maxi}]$  alors :

$$J = L_{tot}$$

Si :  $(X > X_{maxi})$  alors :

$$J = -P_{bat} \text{ avec : } S < S_{lim}$$

Si :  $(X < X_{mini})$  alors :

$$J = P_{bat} \text{ avec : } S > -S_{lim}$$

La détermination de  $S_{lim}$  se fait soit par essai erreur ou par une dichotomie sur la variation de l'état de charge global (notons que l'optimisation de  $S_{lim}$  ne peut se faire en temps réel néanmoins on garantira toujours le contrôle de l'état de charge).

**Résultat et simulation** Dans ce cas, et pour des conditions initiales identiques les résultats de consommation se sont améliorées, avec une variation de charge globale presque identique, en d'autres termes pour une sensibilité limite  $S_{lim} = 0.6$ , une décharge de -3.5% a été réalisée avec une consommation finale du cycle de 4.68 l/100km.

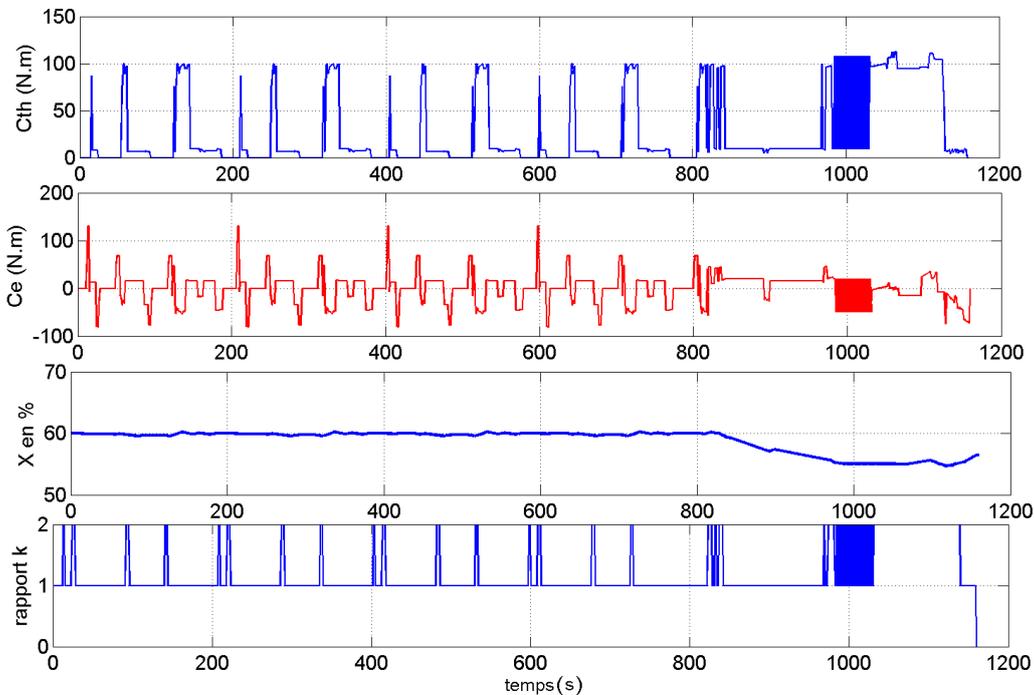


FIGURE I.13 – Simulation de l'approche LMS+fonction de sensibilité

### I.2.4.2.3 Gestion par changement de critère + fonction de sensibilité pondérée

Cette fois on n'a pas besoin de définir une sensibilité limite ( $S_{lim}$ ) il suffit de pondérer la sensibilité ( $S$ ) dans le nouveau critère  $J$  selon l'algorithme suivant :

Si :  $X \in [X_{mini}, X_{maxi}]$  alors :

$$J = L_{tot}$$

Si :  $X > X_{maxi}$  alors :

$$J = -P_{bat} + \lambda.S$$

Si :  $X < X_{mini}$  alors :

$$J = P_{bat} - \lambda.S$$

Même remarque concernant la détermination de  $\lambda$  que pour  $S_{lim}$ .

**Résultat et simulation** Les résultats de cette approche sont similaires à celle utilisant une fonction de sensibilité et une sensibilité limite, avec une pondération  $\lambda_0 = 1/9$  , la consommation globale du cycle est de 4.92 l/100km avec une décharge Globale de -3.5%.

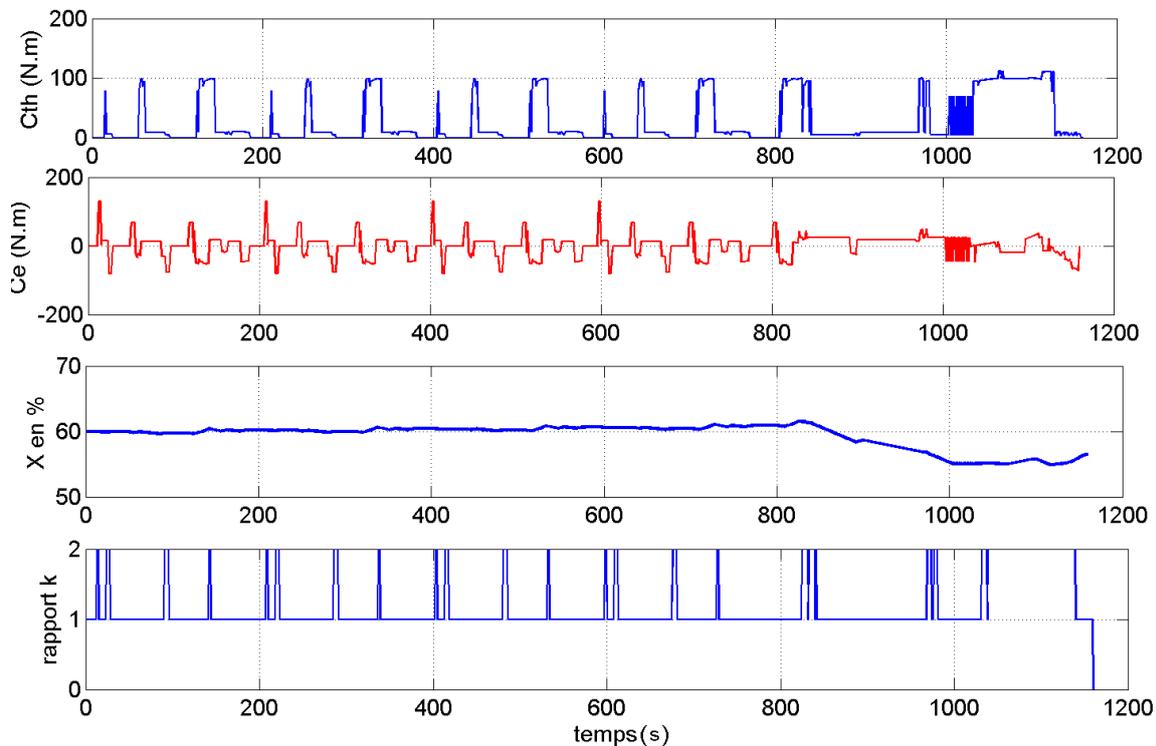


FIGURE I.14 – Simulation de l'approche LMS+fonction de sensibilité pondérée

**I.2.4.2.4 Gestion par logique floue** Dans cette démarche, on décide d’agir progressivement sur l’état de charge bien avant qu’il atteigne ses limites admissibles, grâce à un ajustement progressif du critère en utilisant la logique floue.

Pour ce faire on considère la variable floue  $Dx_l$  tel que :

$Dx_l = \min((X - X_{mini}), (X_{maxi} - X))$  (L’écart minimal entre l’état  $X$  et les deux bornes). Qui appartient aux deux sous ensembles flous décrits par la figure suivante :

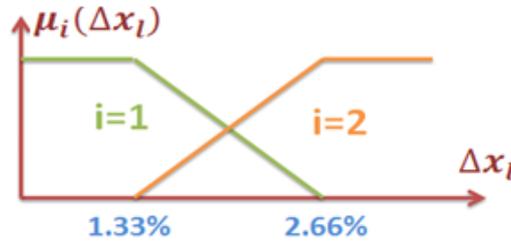


FIGURE I.15 – Degré d’appartenance aux sous ensembles flous

Par consequence, Si :  $Dx_l = \min((X - X_{mini}), (X_{maxi} - X)) = (X - X_{mini})$  alors :

$$J = \mu_1(Dx_l) \cdot \lambda_1 \cdot (P_{bat} - \lambda_0 \cdot S) + \mu_2(Dx_l) \cdot L_{tot}$$

Si :  $Dx_l = \min((X - X_{mini}), (X_{maxi} - X)) = (X_{maxi} - X)$  alors :

$$J = \mu_1(Dx_l) \cdot \lambda_1 \cdot (-P_{bat} + \lambda_0 \cdot S) + \mu_2(Dx_l) \cdot L_{tot}$$

Avec  $\lambda_1$  constituent une pondération du critère redressant l’état de charge de la batterie.

**Résultat et simulation**

Ce qui a donné une décharge moins importante  $Dx_{global} = -1.2\%$  , avec une consommation très proche de celle des techniques précédentes et égale à 5 l/100km.

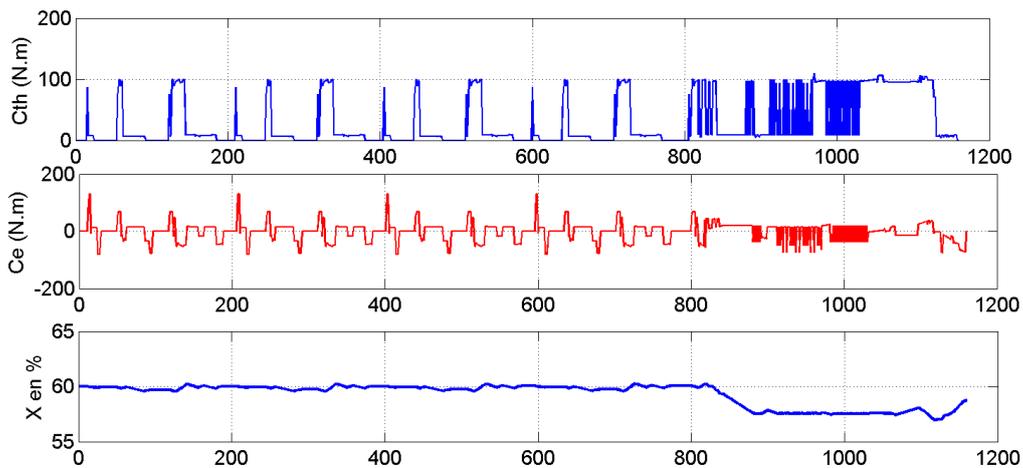


FIGURE I.16 – Simulation de l’approche LMS+logique floue

### I.3 Conclusion :

Après avoir décrit les différents axes sur lesquels se base la gestion de l'énergie en temps réel, une bonne partie de ces stratégies se trouve appliquée dans ce chapitre, allant de l'approche *thermostat* qui se présente comme la plus simpliste et la plus contestée, et passant par les techniques de gestion à base de règles déterministes dont la complexité est apparente et les performances aussi mauvaises que ceux issues de la méthode *thermostat*. C'est à ce moment que les techniques à base de règles floues ont fait leur apparition comme des solutions apportant à la fois des performances nettement meilleurs par rapport aux précédentes, une simplicité de mise en œuvre mais surtout un contexte réaliste de la commande des différents organes du GMP.

Une toute dernière approche concerne cette fois la minimisation instantanée des pertes au niveau de la chaîne de traction hybride(LMS), le problème de cette méthode réside dans la gestion de l'état de charge afin de le maintenir à l'intérieur de son domaine admissible. À cette fin trois astuces sont proposées dans ce chapitre et qui ont mené à des résultats très satisfaisants.

# Chapitre II

## Etude préliminaire d'une réalisation expérimentale

Cette partie portera la perspective d'une réalisation pratique d'un quad hybride à partir de son homologue conventionnel muni d'une motorisation thermique à essence, et de deux roues motrices ayant pour chacune un moteur électrique à courant continu intégré.

La mise en œuvre expérimentale consiste à remplacer les deux roues avant du quad thermique par les roues motrices pour obtenir un véhicule ayant deux sources de propulsion :

- Une source thermique s'appliquant sur les deux roues arrière.
- Une source électrique cituée au niveau des deux roues motrices placées en avant du quad hybride.

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

En effet, et pour des raisons multiples cette réalisation n'aura pas lieu dans le cadre de cette étude, seulement une description détaillée de tous les éléments de la chaîne hybride allant des éléments déjà présents au niveau du quad conventionnel jusqu'aux ajustements apportés par l'hybridation envisagée, auront lieu dans le but de disposer d'un prérequis fondamentale contribuant à la réalisation espérée très prochainement.

### II.1 Le quad conventionnel

Le terme *quad* désigne les véhicules relevant de la catégorie des quadricycles à moteur. Ils ressemblent à la fois à l'automobile (quatre roues) mais aussi à la moto (position et conduite du pilote). *Le quad* est un véhicule non couvert motorisé tout terrain, montant jusqu' à 290 km/h, monoplace ou biplace à trois ou quatre roues. De plus, des chenilles ont été développées pour remplacer les roues d'un quad pour l'hiver. Au Québec, on désigne ces véhicules par le sigle **VTT**, abréviation de véhicule tout-terrain. Aux Etats-Unis, on utilise le sigle **ATV**, abréviation de *All Terrain Vehicule* pour désigner les quads.

#### II.1.1 Eléments d'un quad conventionnel

Les quads peuvent se distinguer en fonction des éléments mécaniques qui les composent, qui sont généralement : le type de transmission, le type de cylindrée et le type de suspension.



FIGURE II.1 – Structure mécanique du quad conventionnel

### II.1.1.1 La transmission

Les quads peuvent être de deux types soit à quatre roues motrices (4\*4) soit à deux roues motrices (4\*2). Dans le cas des deux roues motrices, ce sont les roues arrière qui sont reliées au moteur pour transmettre le couple, donc il s'agit de véhicule à propulsion (d'où le risque de cabrage).

Le dernier élément de la transmission qui permet de différencier les types de quad est la présence ou non d'un différentiel. Un différentiel est un dispositif mécanique qui permet aux roues de ne pas tourner à la même vitesse, ce qui est un avantage certain en virage où la roue intérieure est censée tourner moins vite que la roue extérieure au virage.

### II.1.1.2 La cylindrée

La cylindrée des moteurs peut varier entre  $50 \text{ cm}^3$  pour la plupart des quads pour enfant et  $650 \text{ cm}^3$  pour les quads utilisés dans le domaine forestier ou agricole pour la traction. La vitesse peut atteindre 130 km/h et le poids à vide varie entre 200 et 400 kg. On peut aussi distinguer plusieurs types de quads en fonction des éléments mécaniques qui les composent.

Ainsi, on peut distinguer les grosses cylindrées étant utilisées soit pour le sport, soit dans le secteur agricole et les petites cylindrées pour les quads enfant.

### II.1.1.3 La suspension

La suspension des quads est constituée de la combinaison entre le bloc de suspension arrière et le bloc de suspension avant. Ces deux blocs peuvent être des deux types suivants :

**II.1.1.3.1 Le type « *bras oscillant* »** Il s'agit du type de suspension qui équipe la plupart des motos. Le système est constitué d'un bras relié au cadre par une liaison pivot et un amortisseur placé entre les deux comme le montre le schéma suivant :



FIGURE II.2 – Amortisseur type bras oscillant

Remarquons que ce type de suspension est uniquement placé à l'arrière du quad, il impose le fait que l'arbre de transmission de l'essieu arrière travaille en flexion, ce qui peut présenter des problèmes de fatigue mécanique.

**II.1.1.3.2 Le type « *double triangle* »** Ce type de suspension est aussi utilisé sur les automobiles. Il a l'avantage de découpler la suspension de chacune des roues qui composent l'essieu. Pratiquement tous les quads sportifs ont ce type de montage à l'avant et à l'arrière, au même titre qu'ils ont généralement une transmission de type 4\*4 avec un différentiel à l'avant et à l'arrière.

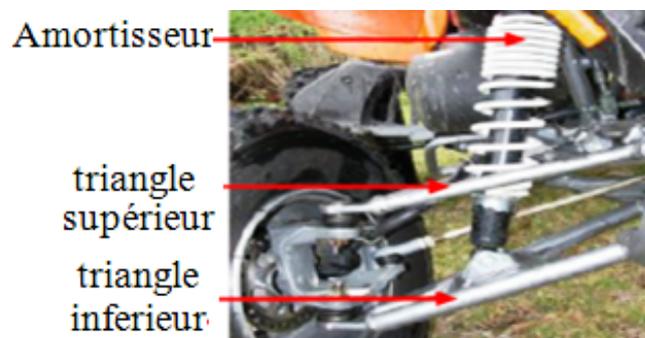


FIGURE II.3 – Amortisseur en double triangle

## II.1.2 Dimensionnement de la chaîne de traction

Le moteur thermique présent sur le quad comprend les caractéristiques suivantes :

Vitesse maximale (Nm) :	1750 tr /min
Puissance :	1500 W

TABLE II.1 – Caractéristiques du moteur thermique

Ce moteur est accoupler par un réducteur de type chaîne.

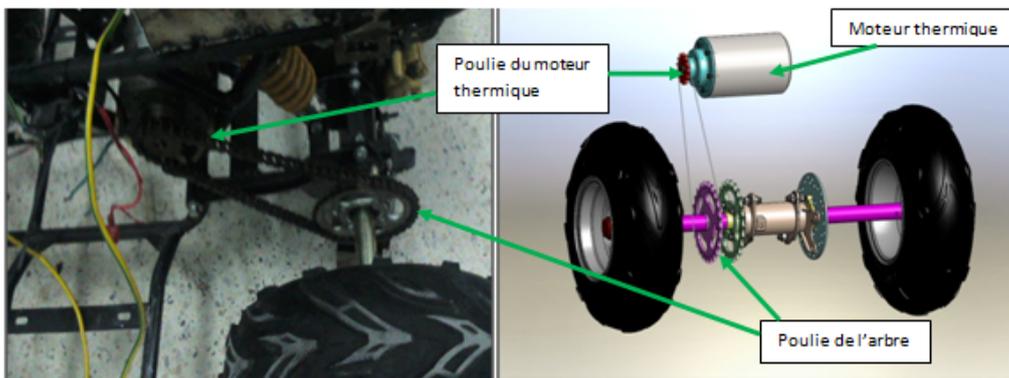


FIGURE II.4 – Emplacement du moteur thermique

La poulie située sur l'arbre de transmission est en fer et dispose de 37 dents. Quant à la poulie de moteur thermique, elle en possède 14. La figure suivante définit les grandeurs mécaniques nécessaires au dimensionnement de la chaîne de traction thermique.

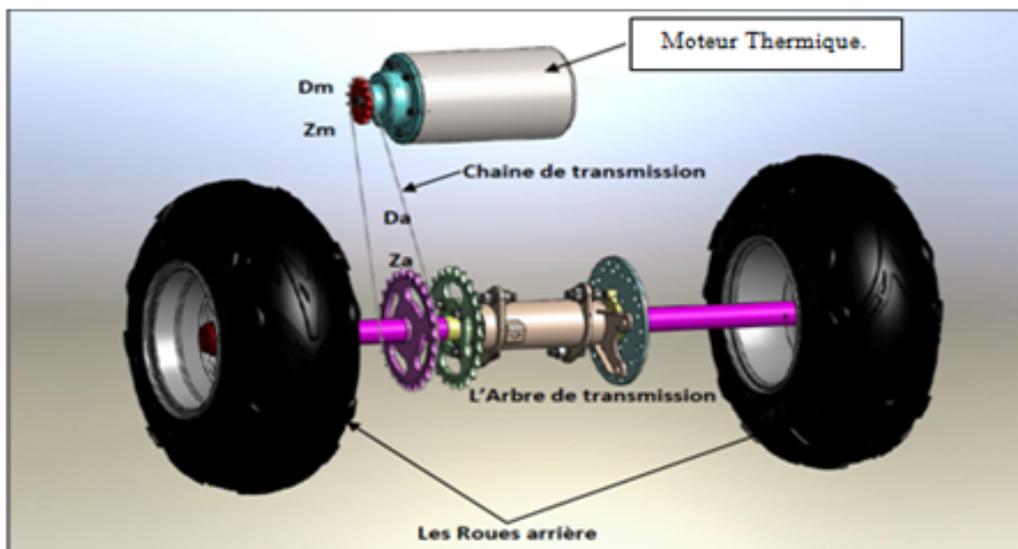


FIGURE II.5 – Schéma de la transmission du moteur thermique

On note par :

$N_m$  : la vitesse en tours par minute de l'arbre du moteur.

$D_m$  : le diamètre de la poulie de l'arbre du moteur.

$Z_m$  : Nombres des dents de poulie motrice.

$N_a$  : la vitesse en tours par minute 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.

$N_r$  : la vitesse de rotation des roues en tours par minute.

$D_r$  : le diamètre des roues.

$V_r$  : la vitesse linéaire de la roue en kilomètres par heure.

$N_{da}$  : le nombre de dents de la poulie de transmission.

$N_{dm}$  : le nombre de dents de la poulie motrice.

En effet, la vitesse de l'arbre de transmission est déduite à partir du rapport de diamètre entre les deux poulies ainsi que la vitesse de rotation de l'arbre du moteur :

$$\frac{N_m}{N_a} = \frac{D_a}{D_m} = \frac{N_{da}}{N_{dm}} = \frac{Z_a}{Z_m} = \frac{37}{14} = 2.64$$

Donc :

$$N_a = \frac{N_m}{2.64}$$

Il en résulte que la vitesse de rotation maximale des roues qui est celle de l'arbre de transmission est égale à :

$$N_{amax} = \frac{N_{mmax}}{2.64} = \frac{1750}{2.64} = 662.88tr/min.$$

## II.2 La chaîne de traction électrique apportée

### II.2.1 Approvisionnement en énergie

La propulsion électrique du quad à besoin d'une alimentation en énergie pour pouvoir gouverner 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. Ces batteries seront raccordées en parallèle d'une manière à garantir le bon fonctionnement des moteurs roues.

<b>Point d'origine :</b>	La Chine	<b>Nom de marque :</b>	Zhenlong
<b>Numéro du Type :</b>	6-DZM-20	<b>Type batterie :</b>	d'acide de plomb/gel battery/VRLA
<b>Tension nominale :</b>	12V	<b>Taille :</b>	181x76x170 $mm^3$
<b>Capacité nominale :</b>	30Ah	<b>Certificats :</b>	CE/ROHS

TABLE II.2 – Caractéristiques des batteries utilisées



FIGURE II.6 – Le type de batterie utilisé

## II.2.2 Le moteur électrique

La machine électrique à l'intérieur des roues (moteur-roue) est de type à courant continu sans balai ou Brushless et à rotor externe dont le principe de fonctionnement est celui d'une machine asynchrone triphasée à aimant permanent.

D'autre terme, un moteur brushless comporte les mêmes éléments qu'un moteur à courant continu, excepté le collecteur, avec un emplacement inversé des bobinages et de l'aimant permanent. Le rotor cette fois externe est composé d'un ou plusieurs aimants permanents, et le stator interne de plusieurs bobinages.

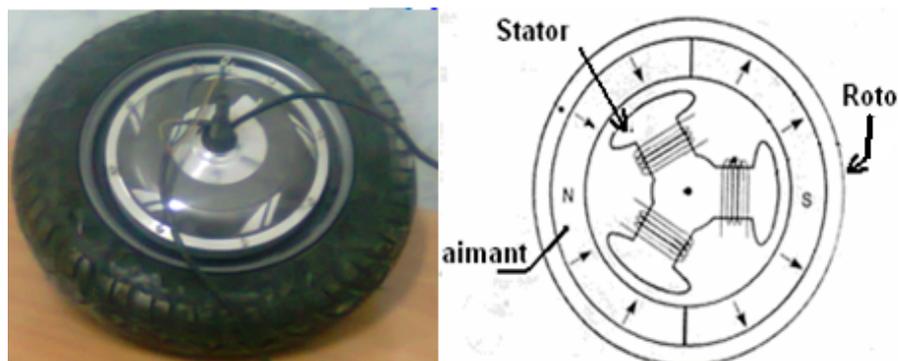


FIGURE II.7 – La roue + le moteur électrique intégré

Les moteurs Brushless sont constitués de 3 éléments principaux :

1. Une partie fixe, le stator, 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 [12].
2. Une partie tournante, le rotor, muni d'aimants permanents. Comme l'aiguille d'une boussole, ces aimants vont en permanence entraîner le rotor pour tenter de s'aligner sur le champ magnétique du stator. Pour garantir une durée de vie maximale du moteur, le rotor est monté sur des roulements à billes.

3. Trois capteurs magnétiques à *effet Hall* . Ces capteurs permettent de connaître à chaque instant la position des aimants du rotor.

La machine à courant continu sans balais se présente généralement munie de ses capteurs de position. Ses connexions extérieures comprennent donc les bornes des enroulements et les bornes des capteurs. [13], [14].

En effet, le bobinage statorique est parcouru par un courant nominal de 30A qui crée le champ tournant à l'intérieur du rotor comme le montre la figure suivante.

Les caractéristiques nécessaires du moteur-roue sont décrites par le tableau suivant :

<b>Types de Moteur :</b>	Moteur sans balais
<b>Tension :</b>	48V
<b>Puissance en watts :</b>	1000 w
<b>Taille de la roue :</b>	20 « - 28 »700c
<b>Endroit de moteur :</b>	avant
<b>Poids :</b>	5.7kg

TABLE II.3 – Caractéristiques des moteurs-roue

### II.2.3 La structure globale de Commande

La structure globale de commande d'un moteur à courant continu sans balais comprend :

- Des capteurs, munis de circuits de conditionnement et de mise en forme, qui permettent de connaître la position du rotor à tout instant, de type optique ou à effet hall.
- Un circuit logique de commande qui élabore les commutations à appliquer aux différentes phases du moteur compte tenu des signaux issus des capteurs.
- Un commutateur de puissance (actionneur) qui alimente les enroulements en fonction des informations issus à partir de la logique de commande.
- Une commande de la tension ou du courant permettant d'agir sur la vitesse du moteur [15].

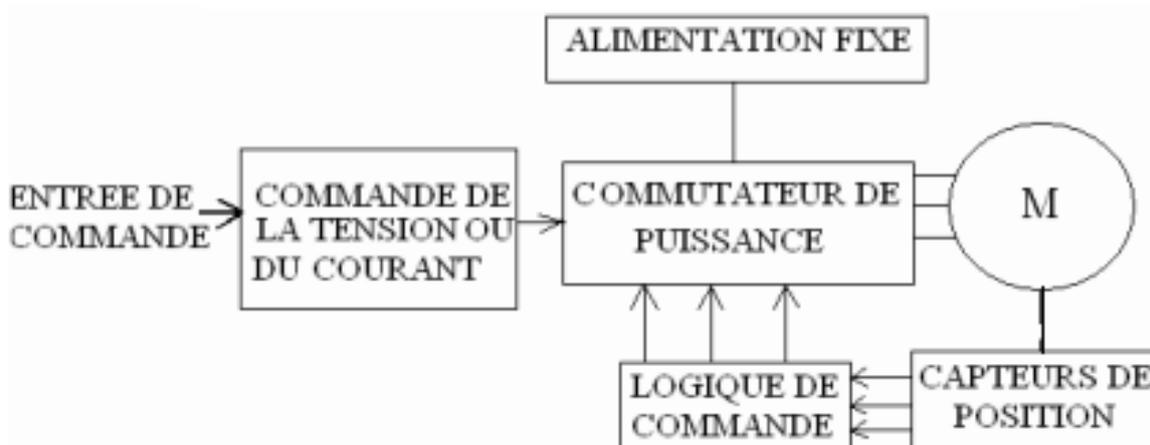


FIGURE II.8 – Structure générale de commande d'un moteur BLDC [12]

### II.2.3.1 Le commutateur de puissance

On prévoit en général l'inversion du sens du courant dans les phases (alimentation bidirectionnelle) pour pouvoir profiter du freinage récupératif à la recharge des batteries (transiter la puissance de la charge jusqu'à la source).

Les enroulements peuvent être couplés en étoile ou en triangle. On rencontre aussi parfois des alimentations unidirectionnelles, mais uniquement lorsque les phases sont couplées en étoile avec neutre sorti [15].

**II.2.3.1.1 L'alimentation unidirectionnelle** Dans ce cas, on a besoin d'un transistor et d'une diode par phase. Lorsqu'un transistor est saturé, la tension d'alimentation est appliquée aux bornes de la phase. Quand on bloque le transistor, la force électromotrice induite dans l'inductance du circuit impose la mise en conduction de la diode de roue libre qui court-circuite alors l'enroulement [15].

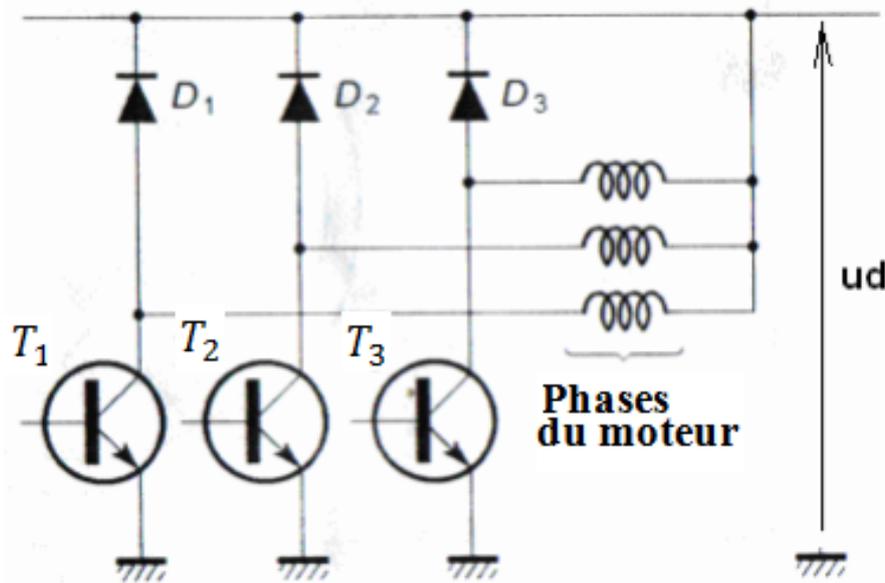


FIGURE II.9 – Alimentation unidirectionnelle [12]

**II.2.3.1.2 L'alimentation bidirectionnelle** Il faut ici deux transistors et deux diodes par phase. Le montage est identique, que le moteur soit en étoile ou en triangle. On sature simultanément deux transistors, l'un du groupe  $T_1, T_2, T_3$  et l'autre du groupe  $T'_1, T'_2, T'_3$ . Dans le cas du moteur triphasé en étoile, la tension  $U_d$  est appliquée aux bornes de deux enroulements en série. Dans le cas d'un moteur triphasé en triangle, cette tension est appliquée à une phase en parallèle avec les deux autres phases en série. Les six diodes assurent la fonction de roue libre dans tous les cas de figure [15].

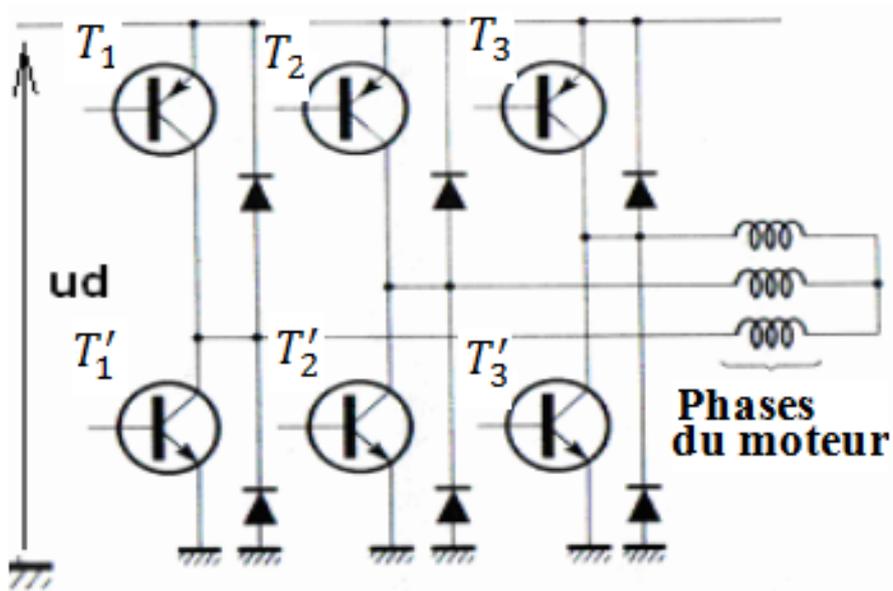


FIGURE II.10 – Alimentation bidirectionnelle [12]

### II.2.3.2 Les capteurs

Pour connaître la position instantanée du rotor, il faut disposer sur le stator fixe d'un certain nombre de capteurs. On utilise soit des capteurs magnétiques à effet hall, soit des capteurs optiques. Pour une machine triphasée, il nous faut trois capteurs régulièrement espacés.

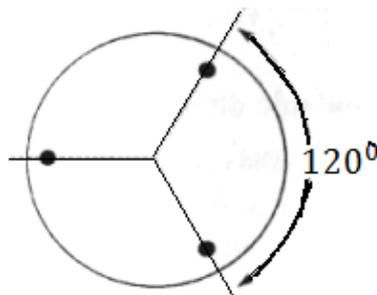


FIGURE II.11 – Position des capteurs pour un moteur à trois phases [12]

Après mise en forme par un comparateur adapté, on obtient trois signaux logiques  $h_1$ ,  $h_2$  et  $h_3$ . Pour un moteur à quatre phases on se contente de deux capteurs décalés de  $90^\circ$  (les deux capteurs supplémentaires donneraient les signaux inverses)[15].

**Capteur à effet Hall** Si un courant  $I_0$  traverse un barreau en matériau conducteur ou semi-conducteur, et si un champ magnétique d'induction  $B$  est appliqué perpendiculairement au sens de passage du courant, une tension  $V_h$ , proportionnelle au champ magnétique et au courant  $I_0$  apparaît sur les faces latérales du barreau. C'est la tension de Hall.

$$V_h = K_h \cdot B \cdot I_0$$

Où  $K_h$  est la constante de Hall, dépendant du matériau utilisé.

L'effet Hall est du à la déviation des électrons par le champ magnétique, créant une différence de potentiel appelée tension de Hall [16].

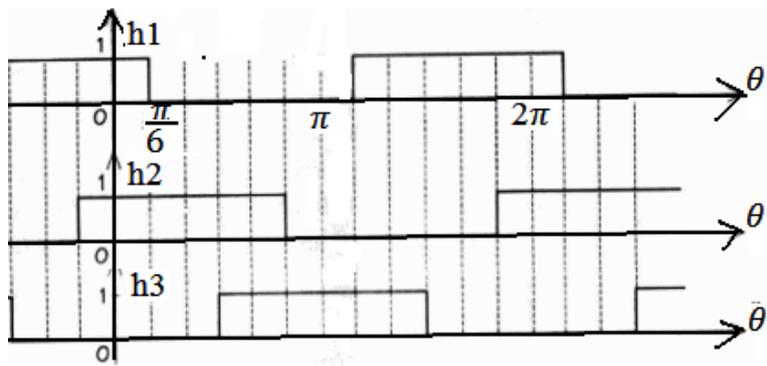


FIGURE II.12 – Signaux logiques issus des capteurs pour une machine triphasée [12]

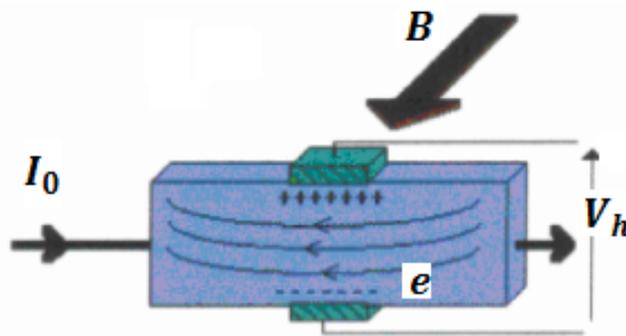


FIGURE II.13 – Capteur à effet hall [12]

### II.2.3.3 Logique de commande des interrupteurs

Ce circuit reçoit les informations logiques issues des capteurs et délivre les signaux de commandes des interrupteurs. Par exemple, dans le cas du moteur triphasé à alimentation bidirectionnelle, on dispose de trois signaux  $h_1$ ,  $h_2$ , et  $h_3$  et on veut élaborer les six signaux logiques  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$ ,  $C'_1$ ,  $C'_2$  et  $C'_3$  destinés à commander les six transistors pour obtenir les courants souhaités dans les trois phases du moteur.

On constate qu'il faut assurer les équations logiques suivantes :

$$C_1 = h_1.\bar{h}_2$$

$$C'_1 = \bar{h}_1.h_2$$

$$C_2 = h_2.\bar{h}_3$$

$$C'_2 = \bar{h}_2.h_3$$

$$C_3 = h_3.\bar{h}_1$$

$$C'_3 = \bar{h}_3.h_1$$

Cette logique de commande peut être facilement réalisée avec des circuits élémentaires, elle est en général intégrée dans des circuits spécialisés pour moteurs à courant continu sans balais [12].

Notons que cette logique de commutation peut être réalisée avec un simple programme sur microcontrôleur PIC.

### II.2.3.4 Commande des moteurs-roue [15]

On a supposé précédemment, que les variations des courants étaient rectangulaires alors qu'en réalité, il n'est pas ainsi. Le caractère inductif du circuit empêche les discontinuités du courant.

Si on applique une tension constante aux bornes des phases (alimentation en tension), les montées et les descentes sont progressives. Pour améliorer la rapidité de ces commutations, on utilise souvent une alimentation en courant. Dans ce cas, on régule l'intensité, en général par découpage. On obtient des temps de montée et de descente nettement plus petits, mais aussi une ondulation du courant autour de la valeur désirée.

**II.2.3.4.1 La commande en tension** On a vu que le moteur associé à son commutateur de puissance avec sa logique de commande et ses capteurs a un comportement analogue à celui d'une machine à courant continu. On peut donc le commander en tension en faisant varier l'alimentation  $U_d$  (appliquée au commutateur). Pour avoir un rendement correct, on utilise en général un hacheur pour cette opération. Son fonctionnement est identique à celui du moteur à courant continu.

**II.2.3.4.2 La commande en courant** Il est possible, comme pour une machine classique, d'utiliser une source de courant plutôt qu'une source de tension. De plus, dans le cas du moteur sans balais, il y a deux possibilités de réglage de courant, on trouve le réglage du courant total à l'entrée du commutateur, ou encore on régule le courant des phases par découpage pour s'approcher de la forme idéale de ses variations lors des commutations.

# Conclusion générale et perspectives

Dans cette étude on trouve un bon nombre de stratégies temps réel, à savoir celles dites *à base de règle*, dont l'objectif global était de faire fonctionner le moteur thermique aux voisinages de son meilleur rendement et que le moteur électrique viendrait par la suite compléter ce fonctionnement afin de faire correspondre le fonctionnement global de la chaîne hybride à celui exigé par le conducteur. À cet égard, la logique floue se présente comme un outil très adapté à ce genre de traitement à la fois par les performances qu'elle offre mais en plus par le contexte réaliste des commandes qu'elle évoque.

On trouve encore parmi les approches temps réel les méthodes de gestion par minimisation instantanée des pertes au niveau du groupe motopropulseur ou LMS, offrant à la fois des résultats très intéressants pour une facilité de mise en œuvre, seulement leur difficulté réside au niveau de la gestion de l'état de charge de la batterie afin de le maintenir à l'intérieur d'une plage de variation admissible. À cette fin un certain nombre d'astuces dont l'enjeu principale était de garantir un contrôle permanent de l'état de charge tout en maintenant la consommation en carburant la plus basse possible.

La deuxième partie de cette étude consiste à l'élaboration d'une plateforme expérimentale menant à la réalisation d'un quad électrique hybride partant d'un quad muni d'une motorisation conventionnelle en allant vers l'assemblage de deux roues, ayant chacune une machine électrique intégrée, à la place des roues avant du quad. Les caractéristiques des différents constituants de sa chaîne de traction ainsi que la technique de gestion et de commande de la chaîne électrique se trouvent élaborées dans cette partie.

# Références bibliographiques

- [1] R Dubouil. *Etude par simulation des transferts thermiques dans un groupe motopropulseur hybride électrique automobile*. Thèse de doctorat, Ecole centrale de Nantes, 2012.
- [2] W Hankache. *Gestion optimisée de l'énergie électrique d'un groupe électrogène hybride à pile à combustible*. Thèse de doctorat, Institut national polytechnique de Toulouse, 2008.
- [3] A Dubray. *Adaptation des lois de gestion d'énergie des véhicules hybrides suivant le profil de mission suivie*. Thèse de doctorat, Institut polytechnique de Grenoble, 2002.
- [4] C Forgez, G Friedeich, and J.M Biedinger. Système flou de supervision des modes de fonctionnement d'un véhicule hybride électrique parallèle. Rapport technique, Université de technologie de Compiègne, 2000.
- [5] S Delprat. *évaluation des stratégies de commande pour véhicules hybrides parallèles*. Thèse de doctorat, Université de Valenciennes et du Hainaut Cambrésis, 2002.
- [6] J 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 Henry Poincaré-Nancy 1, 2004.
- [7] S 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.
- [8] J Bernard. *Véhicule hybride à pile à combustible : dimensionnement et stratégie de commande*. Thèse de doctorat, Université de Valenciennes et du Hainaut Cambrésis, 2007.
- [9] M Ehsani, Y Gao, and K.L Butler. Application of electrically peaking hybrid (elph) propulsion system to a full-size passenger car with simulated design verification. *IEEE Transaction on Vehicular Technology*, 1999.
- [10] H Hannoun. Minimisation de l'énergie consommée dans un véhicule hybride thermique-électrique. Master2r, Laboratoire de génie électrique de Paris (GEP), 2005.
- [11] N.J Schouten, M.A Salman, and N.A Kheir. Energy management strategies for parallel hybrid vehicles using fuzzy logic. *Control Engineering Practice*, 2003.
- [12] M Djemai and T Mawloud. Commande de la vitesse et de la position d'un moteur à courant continu sans ballais pour les applications en robotique. Rapport technique, Ecole national polytechnique (ENP), 2007.
- [13] M Bouhrik. *Impact des Nouveaux Matériaux(NdFeB et SmCo) sur les Moteurs (BLDCM) Destinés aux Véhicules Electriques*. Thèse de doctorat, Université de Batna, 2007.
- [14] N de Laleu. *Conception de mini-drones avions : quadricoptere*. Thèse de doctorat, Centrale Paris, 2007.
- [15] P Mayé. *Moteurs électriques pour la robotique*. Editions Dunod,Paris, 2000.
- [16] P Abati. Les capteurs à effet hall, 2001. [www.stielec.ac-aixmarseille.fr](http://www.stielec.ac-aixmarseille.fr).