



**LABORATOIRE DE GENIE ELECTRIQUE DE PARIS**

**Master IST « Information Systèmes et Technologie »**

**Parcours recherche SESP  
« Sciences de l'énergie et des systèmes de puissance »**

**RAPPORT DE STAGE M2R**

Soutenu le 6 juillet 2005

Présentée par : **Hala HANNOUN**

**SUJET : Minimisation de l'énergie consommée dans un véhicule  
hybride thermique-électrique**

Encadrement : **MM. Demba DIALLO  
Claude MARCHAND**

## **Remerciements**

Je remercie M. KREISLER, Directeur du laboratoire de génie électrique pour m'avoir accueillie au cours de ces six mois de stage.

Mes remerciements s'adressent aussi à M. RAZEK, responsable du département MOCOSEM, pour m'avoir accueillie au sein de son département.

Je tiens à remercier chaleureusement M. DIALLO et M. MARCHAND pour m'avoir encadrée et dirigé mon travail avec patience et entière disponibilité.

Je remercie aussi M. CHABOT, ingénieur PSA, pour nos discussions fructueuses et pour l'attention qu'il a accordée à mon travail.

J'adresse des remerciements très sincères pour toutes les personnes de l'équipe COCODI et de l'équipe technique ainsi que pour mes collègues de master, qui par leur amitié et leur bonne humeur ont créé une ambiance de travail parfaite.

## Sommaire

|  |           |
|--|-----------|
| <b>Glossaire .....</b>   | <b>1</b>  |
| <b>Introduction .....</b>  | <b>2</b>  |
| <b>Chapitre 1 : Présentation du véhicule hybride.....</b>                  | <b>3</b>  |
| 1.1 Définition d'un véhicule hybride.....                                  | 4         |
| 1.2 Architecture choisie.....  | 4         |
| 1.3 Choix et dimensionnement des composants du groupe motopropulseur...5   |           |
| 1.3.1 Le véhicule.....   | 5         |
| 1.3.2 Le moteur thermique.....   | 5         |
| 1.3.3 Le moteur électrique.....  | 6         |
| 1.3.4 La batterie.....   | 7         |
| 1.3.5 La boîte de vitesse .....  | 8         |
| <b>Chapitre 2 : Modélisation et commande du groupe motopropulseur.....</b> | <b>9</b>  |
| 2.1 Vue globale du groupe motopropulseur .....                             | 10        |
| 2.2 Description des modèles .....  | 11        |
| 2.2.1 Le modèle dynamique du véhicule.....                                 | 11        |
| 2.2.2 Le moteur thermique.....   | 11        |
| 2.2.3 La boîte de vitesse .....  | 12        |
| 2.2.4 La batterie.....   | 13        |
| 2.2.5 Le moteur électrique .....   | 15        |
| 2.2.5.1 Introduction.....  | 15        |
| 2.2.5.2 Caractéristique couple-vitesse.....                                | 16        |
| 2.2.5.3 Le défluxage.....  | 19        |
| 2.2.5.4 Le mode générateur.....  | 20        |
| <b>Chapitre 3 : Stratégie d'optimisation par la logique floue.....</b>     | <b>22</b> |
| 3.1 Introduction.....  | 23        |
| 3.2 Le contrôleur flou.....  | 24        |
| 3.3 Application au contrôle du véhicule hybride.....                       | 25        |
| 3.3.1 Les fonctions d'appartenance.....                                    | 25        |
| 3.3.2 La base des règles.....  | 29        |
| 3.4 Conclusion.....  | 30        |
| <b>Chapitre 4 : Résultats de simulations.....</b>                          | <b>31</b> |
| 4.1 Introduction.....  | 32        |
| 4.2 Illustration des modes de fonctionnement.....                          | 32        |
| 4.2.1 Le mode tout électrique.....   | 32        |
| 4.2.2 Le mode mono propulsion.....   | 34        |
| 4.2.3 Le mode bi propulsion.....   | 38        |
| 4.3 Conclusion .....   | 40        |

|                          |           |
|--------------------------|-----------|
| <b>Conclusion .....</b>  | <b>41</b> |
| <b>Perspectives.....</b> | <b>42</b> |
| <b>Annexe 1.....</b>     | <b>43</b> |
| <b>Annexe 2.....</b>     | <b>44</b> |
| <b>Annexe 3.....</b>     | <b>46</b> |
| <b>Références.....</b>   | <b>49</b> |

## Glossaire

Les principales notations utilisées sont :

$C_e^*$  est la consigne de couple électrique

$C_e$  est le couple électrique fourni

$C_{roue}$  est le couple au niveau des roues

$C_{th}^*$  est la consigne de couple thermique

$C_{th}$  est le couple thermique fourni

$C_{tot}$  est le couple total au niveau de l'arbre primaire

$E$  est la force électromotrice interne de la batterie

$I_{bat}$  est le courant délivré par la batterie

$I_{cel}$  est le courant délivré par une cellule

$k$  est le rapport de la boîte de vitesse

$N_p$  est le nombre de branches en parallèle

$N_s$  est le nombre de cellules en série qui constitue une branche

$P_{dem}$  est la puissance demandée

$P_e$  est la puissance fournie par le moteur électrique

$P_{th}$  est la puissance fournie par le moteur thermique

$R$  est la résistance interne de la batterie

$Soc$  est l'état de charge de la batterie

$V$  est la vitesse du véhicule

$V_{bat}$  est la tension aux bornes de la batterie

$V_{cel}$  est la tension aux bornes d'une cellule

$w_b$  est la vitesse de base du moteur électrique

$W_{mot}$  est la vitesse mécanique des moteurs

$W_{roue}$  est la vitesse mécanique des roues.

## **Introduction**

Le nombre de véhicules en circulation ne cesse d'augmenter, et même si les nouveaux moteurs thermiques sont de moins en moins polluants, les problèmes de pollution sont de plus en plus critiques, particulièrement pour les gaz à effet de serre responsables du réchauffement de la planète.

Le moteur à combustion interne continue à jouer le rôle d'une source majeure de pollution urbaine : les transports sont jugés en France responsables du tiers des émissions de gaz carbonique et de trois quarts des émissions polluantes classiques, cette pollution se produisant en priorité dans les agglomérations urbaines. Il a été estimé en 1990 que les moteurs sont, en France, la source de 80 % du monoxyde de carbone, 70 % des oxydes d'azote, 60 % des hydrocarbures et 85 % du plomb présents dans l'atmosphère [1].

Au problème environnemental, s'ajoute également un problème économique du fait que les véhicules à combustion interne ont un très faible rendement concernant l'utilisation des combustibles fossiles et l'on parle fréquemment ces dernières années des ressources énergétiques qui sont en train de s'épuiser.

Une conséquence est alors la nécessité de prévoir de nouvelles technologies qui permettront de rendre les véhicules moins polluants et plus économes.

Les véhicules électriques sont apparus, dans un premier temps, comme une solution prometteuse. Leur faible autonomie combinée à un coût trop élevé ne leur a pas permis d'être concurrentiels vis-à-vis de leur homologue conventionnel.

Une autre solution semble aujourd'hui voir le jour : les véhicules hybrides. Les premiers modèles Toyota Prius, Honda Insight et Nissan Tino ont été commercialisés ces dernières années. L'ajout du moteur électrique dans un véhicule conventionnel a permis d'introduire des degrés de liberté supplémentaires dans la commande du groupe motopropulseur. Une gestion efficace des échanges énergétiques entre les différents composants (moteurs, batteries, etc.) permet de réduire significativement la consommation de carburant et les émissions de polluants.

# **Chapitre 1**

## ***Présentation du véhicule hybride***

## 1.1 Définition d'un véhicule hybride

Un véhicule hybride, par définition, est un véhicule qui dispose d'au moins deux sources d'énergie pour assurer sa propulsion. Les sources d'énergie disponibles sont le carburant contenu dans le réservoir, l'électricité stockée dans les batteries ou la pile à combustible.

Le réservoir de carburant constitue une source non réversible. Le moteur à combustion interne réalise de réels progrès, visant la réduction de sa consommation, comme l'amélioration des différentes parties mécaniques du véhicule (allègement de la carrosserie, performances aérodynamiques, utilisation de nouvelles technologies [2]). Néanmoins ces performances restent insuffisantes au regard des ambitions déclarées.

La pile à combustible est la technologie la plus prometteuse : la production d'électricité se fait à partir de l'hydrogène et son point de fonctionnement est pratiquement à zéro émission. Cependant, leur utilisation dans le domaine de l'automobile reste au stade du prototype et soulève de nombreux problèmes comme par exemple le stockage de l'hydrogène, ou l'encombrement des composants annexes (compresseurs, radiateurs, etc.). D'autre part, la distribution d'hydrogène à grande échelle nécessiterait une mise à jour complète du système de distribution de carburant actuel. Pour remédier à ce problème, des reformeurs embarqués permettraient de produire l'hydrogène à partir de carburants fossiles, (méthanol, éthanol) mais là encore de nombreux problèmes techniques sont à résoudre [3], de fait, elle n'est pas pour le moment commercialisable à grande échelle avant la prochaine décennie.

De ce fait, le véhicule hybride thermique/électrique se présente encore aujourd'hui comme le moyen de déplacement le plus « écologique ».

Afin de permettre la récupération d'énergie, la deuxième de ces sources est toujours réversible, les échanges ou transformations énergétiques sont bidirectionnelles. Elle peut être par exemple un accumulateur électrochimique, un condensateur, un volant d'inertie... et la plus utilisée actuellement est la batterie.

Un des éléments qui détermine en partie l'utilisation possible du véhicule hybride est la capacité de la batterie car elle détermine l'autonomie du véhicule en mode électrique pur. Le problème est d'utiliser de manière optimum par rapport à la consommation de carburant (et donc les émissions de CO<sub>2</sub>) l'énergie disponible dans la batterie. Cette optimisation est possible en utilisant au mieux les degrés de liberté de la chaîne de traction du véhicule (rapports de boîte par exemple), tout en satisfaisant la demande de puissance du conducteur et des accessoires.

## 1.2 Architecture choisie

Trois principales architectures existent [4]: l'architecture série, l'architecture parallèle et l'architecture série parallèle combinée (la Toyota Prius est un exemple de ce système dual).

On a fait le choix de l'architecture parallèle simple arbre qui est à addition de couple. Le couple appliqué à la transmission mécanique est l'addition des couples issus des deux moteurs qui sont montés sur un même arbre, comme le montre la figure 1.1. Leurs régimes sont alors liés et linéairement dépendant du régime des roues.

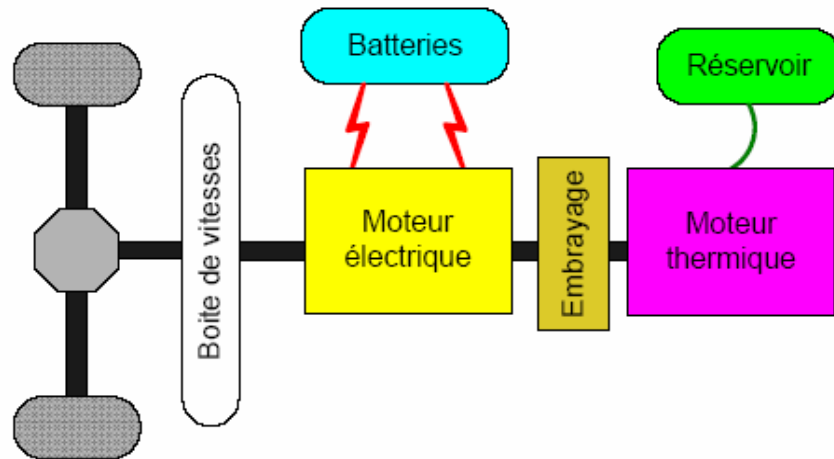


Figure 1.1 : architecture hybride parallèle à arbre simple

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

#### 1.3.1 Le véhicule

Avant de passer au dimensionnement des différents composants, il faut d'abord préciser les paramètres du véhicule à utiliser. Le véhicule choisi est du type segment M1 (307, Xsara, Civic...) qui possède les paramètres suivants :

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

#### 1.3.2 Le moteur thermique

Le critère dimensionnant pour le moteur thermique est le maintien de la vitesse de croisière demandée [5]. En effet, le moteur électrique est réservé pour les phases de

démarrage et vient assister le thermique lorsque la demande de puissance augmente, c'est à dire durant les phases d'accélération, en côte ou en vitesse de pointe.

La courbe de la figure 1.2 illustre la puissance nécessaire pour maintenir la vitesse stabilisée sur terrain plat sur la base des paramètres du véhicule choisi, avec le rendement de la transmission mécanique estimé à 0.95.

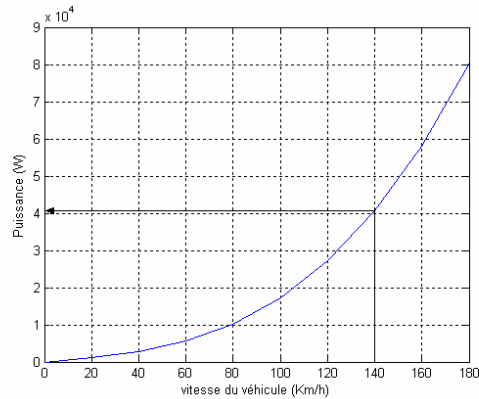


Figure 1.2 : Puissance nécessaire à vitesse stabilisée sur terrain plat

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

### 1.3.3 Le moteur électrique

La contrainte pour dimensionner le moteur électrique est l'accélération de 0 à 50 km/h en 8 secondes en mode tout électrique [5]. La figure 1.3 illustre la puissance demandée pour répondre à cette contrainte.

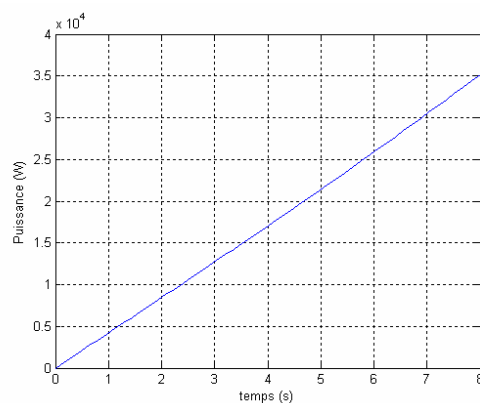


Figure 1.3 : Accélération de 0-50 km/h en tout électrique

La courbe montre que la puissance nécessaire est d'environ 35 kW. On a donc choisi le moteur asynchrone LS 225 ST - 37 kW – Leroy Somer dont les caractéristiques peuvent être consultées dans l'annexe 1.

### 1.3.4 La batterie

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

Tension nominale : 7.2 V  
 Capacité nominale : 6.5Ah  
 Puissance spécifique : 1300w/kg  
 Energie spécifique : 46wh/kg  
 Masse : 1040g  
 Dimensions : 19.6x106x285

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

On a choisi comme modèle équivalent d'une cellule une force électromotrice interne E en série avec une résistance interne R, comme le montre la figure 1.4. E et R étant tous les deux fonction de l'état de charge (soc). La batterie est une association en série et en parallèle de cellules.

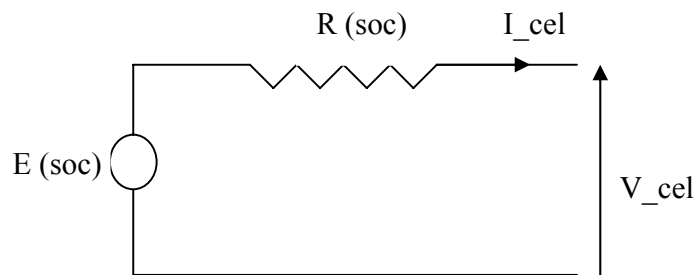


Figure 1.4 : modèle équivalent d'une cellule

On a les équations suivantes :

$$V_{bat} = N_s * V_{cel} = N_s * (E - R * I_{cel})$$

$$I_{cel} \text{ étant } = \frac{I_{bat}}{N_p} \Rightarrow V_{bat} = N_s * (E - R * \frac{I_{bat}}{N_p}) \quad (1)$$

$V_{bat}$  est la tension aux bornes de la batterie ;  
 $I_{bat}$  est le courant délivré par la batterie ;  
 $V_{cel}$  est la tension aux bornes d'une cellule ;  
 $I_{cel}$  est le courant délivré par une cellule ;  
 $N_s$  est le nombre de cellules en série qui constitue une branche.  
 $N_p$  est le nombre de branches en parallèle.

$$\text{La puissance délivrée par la batterie } P = V_{bat} * I_{bat} \quad (2)$$

A partir des équations (1) et (2), on en déduit l'équation suivante  $(RN_sN_p)*I_{cel}^2 - (N_sN_pE)*I_{cel} + P = 0$ .

Pour résoudre cette équation, il faut au préalable déterminer ses coefficients :

-En ce qui concerne le moteur électrique, son rendement est égal à 0.927, il absorbe donc une puissance électrique  $P = 0.927 * 37 \approx 40$  kW, en négligeant les pertes dans le convertisseur.

-Pour  $\eta = 0.7$ , on peut déduire les valeurs de  $E = 6.485$  V et  $R = 0.053 \Omega$  par une technique d'identification qui sera développée dans le chapitre suivant lors de la modélisation de la batterie.

On en déduit donc :  $\Delta = (N_sN_pE)^2 - 4*(RN_sN_p)*P \geq 0 \Rightarrow (N_sN_p) \geq \frac{4*R*P}{E^2} \Rightarrow (N_sN_p) \geq 204,5$ .

Cependant pour que la masse de la batterie demeure acceptable (200 à 300 Kg) [6],  $N_sN_p$  ne doit pas dépasser les 300 car une cellule pèse environ 1 Kg.

Cette première étape du dimensionnement nous a permis de déterminer une condition limite sur le produit  $N_sN_p$ . Pour résoudre cette inégalité, on va utiliser un critère supplémentaire qui est la vitesse de base  $w_b$  du moteur électrique qui dépend directement de la tension d'alimentation. Cette dépendance entre  $N_s$ ,  $N_p$  et  $w_b$ , résumé dans le tableau 1.1, a été obtenue grâce à la simulation de l'ensemble batterie-machine électrique après les avoir modélisées (détails chapitre suivant).

| $N_s$     | $N_p$    | $N_sN_p$   | $W_b$ (tr/mn) | $V_{bat}$ (V) | $I_{bat}$ (A) | $I_{cel}$ (A) |
|-----------|----------|------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| 36        | 7        | 252        | 445           | 207           | 94.8          | 13.54         |
| 42        | 6        | 252        | 520           | 236           | 94.5          | 15.75         |
| 62        | 4        | 248        | 735           | 320           | 94            | 23.5          |
| <b>70</b> | <b>4</b> | <b>280</b> | <b>845</b>    | <b>365</b>    | <b>91</b>     | <b>22.75</b>  |

Tableau 1.1

On remarque que si on augmente  $N_s$  et que l'on diminue  $N_p$  (pour conserver la même masse), on augmente la tension et la vitesse de base, par contre le courant dans une cellule augmente beaucoup.

Comme nous avons intérêt à avoir une plus grande vitesse de base possible tout en gardant un poids acceptable, le choix final est donc un compromis tel que  $N_s = 70$  et  $N_p = 4$ .

### 1.3.5 La boîte de vitesses

La boîte de vitesse choisie est à cinq rapports, les valeurs des rapports de transmission entre l'arbre primaire et l'arbre secondaire sont les suivantes :

Première qui correspond au rapport 13.

Deuxième qui correspond au rapport 10.

Troisième qui correspond au rapport 7.

Quatrième qui correspond au rapport 5.

Cinquième qui correspond au rapport 4.

## **Chapitre 2**

### ***Modélisation et commande du groupe motopropulseur***

## 2.1 Vue globale du groupe motopropulseur

Avant de passer à la modélisation individuelle de chaque composant de la chaîne, une vue globale de l'ensemble s'avère nécessaire. Ainsi, dans la figure 2.1, nous pouvons observer les liaisons entre les différents blocs fonctionnels du groupe motopropulseur.

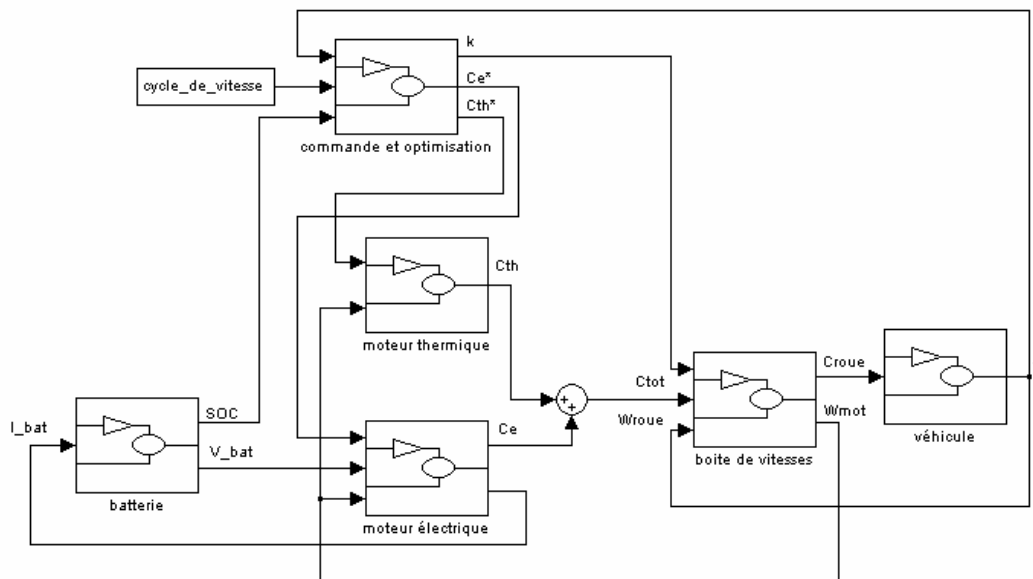


Figure 2.1 : vue globale du groupe motopropulseur

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

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

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

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

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

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

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

## 2.2 Description des modèles

### 2.2.1 Le modèle dynamique du véhicule

Le modèle dynamique choisi est un modèle simplifié qui ne tient pas compte des forces de roulis et de tangage. Le véhicule est modélisé comme une masse en mouvement soumise à la force motrice  $F$  développée par le groupe motopropulseur et à différents efforts liés à l'environnement  $F_R$ , tels que  $F_R = f_{ro} + f_{ao} + f_{rm}$  [6].

-  $f_{ro} = f.m.g$  représente la résistance au roulement (contact pneu-route)  
où  $f$  est le coefficient de frottement,  $m$  la masse du véhicule et  $g$  représente l'accélération de la pesanteur.

-  $f_{ao} = a v^2$  représente la résistance aérodynamique (pénétration du véhicule dans l'air)  
où  $a$  est une constante et  $v$  est la vitesse du véhicule.

-  $f_{rm} = m.g.\sin \alpha$  représente la force de la pesanteur (résistance de montée en cote)  
où  $\alpha$  est la pente.

En appliquant le principe fondamental de la dynamique :  $F - F_R = m \cdot \frac{dv}{dt}$ , on peut déduire la vitesse  $v$  (figure 2.2).

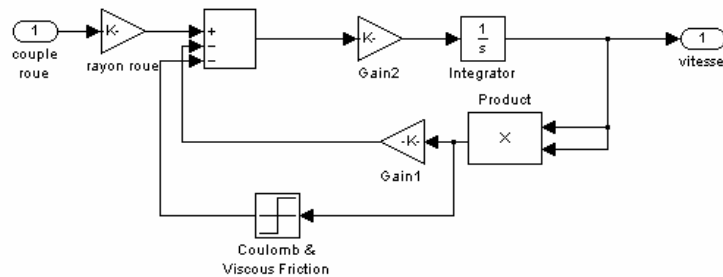


Figure 2.2 : modèle dynamique du véhicule

### 2.2.2 Le moteur thermique

Il est considéré comme générateur de couple, son modèle est identifié à partir de cartographies issues de mesures expérimentales illustrant le comportement du moteur thermique en débit de carburant (figure 2.3) [7].

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

Le modèle, présenté à la figure 2.4, se réduit donc à deux entrées : la consigne de couple et le régime de rotation de l'arbre, et à une sortie : le couple réel fourni qui n'est autre que le couple de consigne.

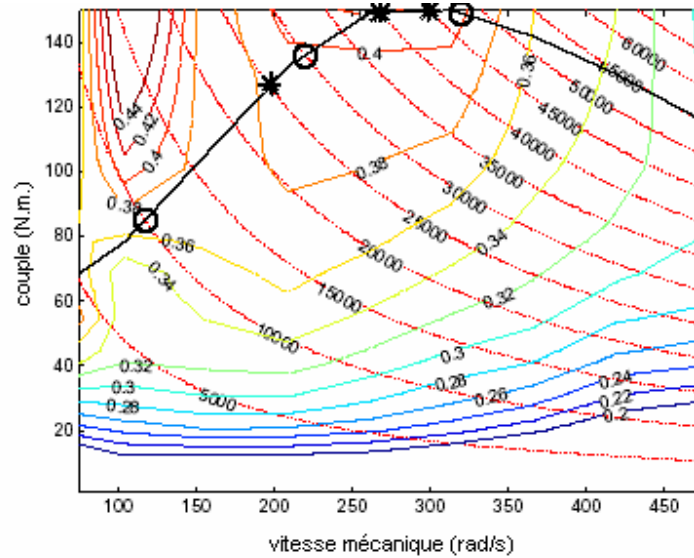


Figure 2.3 : courbes iso-rendements du moteur thermique

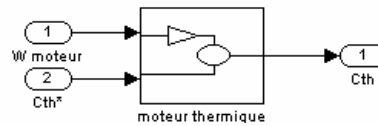


Figure 2.4 : le modèle du moteur thermique

### 2.2.3 La boîte de vitesses

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

- $C_{roue} = k * C_{tot}$
- $W_{mot} = k * W_{roue}$

D'où le modèle final représenté sur la figure 2.5.

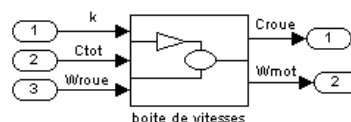


Figure 2.5: le modèle de la boîte de vitesses

## 2.2.4 La batterie

La batterie est délicate à modéliser à cause de la complexité du processus électrochimique qui les caractérise et des conditions d'utilisation particulièrement sévères dans un véhicule.

On rencontre dans la littérature [8] plusieurs modèles de complexités différentes où les éléments du circuit électrique équivalent dépendent de l'état de charge de la batterie et de la température de fonctionnement.

Le modèle électrique de la batterie est un modèle à paramètres ajustables selon l'utilisation et le type de la batterie, d'où la nécessité de faire des essais de laboratoire représentatifs de l'application visée afin de bien déterminer les différents paramètres.

Finalement, comme il a été déjà mentionner dans le paragraphe 1.4.4, le modèle est limité simplement à une force électromotrice interne 'E' en série avec une résistance 'R', toutes les deux étant fonction de l'état de charge.

Pour déterminer la variation continue de chacune de ces deux grandeurs en fonction de l'état de charge, la caractéristique [9] montrée à la figure 2.6, qui trace l'évolution de la tension aux bornes d'une cellule lors de la décharge pour différents courants de décharge (C étant la capacité nominale égale à 6.5 Ah), a été utilisée.

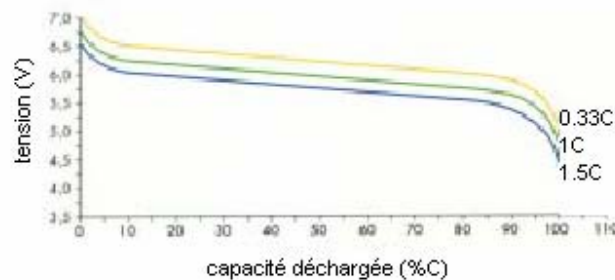


Figure 2.6 : évolution de la tension lors de la décharge  
Pour différents courants de décharge

Le principe est le suivant :

- 1- Pour plusieurs valeurs discrétisées de l'état de charge, on détermine les valeurs de E et R correspondantes.
- 2- Pour la simulation numérique, on procède à un lissage par approximation polynomiale à partir des valeurs discrètes déjà obtenues.

Pour chacune des trois courbes de décharge à courant constant, on peut écrire :

$V = E(\text{soc}) - R(\text{soc}) I$ , en supposant que E et R ne dépendent que du soc.

La valeur de R, relative à un soc donné, est obtenue en moyennant les trois valeurs de  $R = \frac{\Delta V}{\Delta I}$  entre les trois courbes.

Une fois R calculée, on passe au calcul de E en moyennant les valeurs  $E(\text{soc}) = V + R(\text{soc}) I$  entre les trois courbes.

A ce stade, E et R sont des valeurs discrètes en fonction du soc. Grâce au lissage polynomial, on obtient les courbes de R et E représentées sur la figure 2.7.

Pour R, un polynôme de degré 9 a été retenu alors que pour E le polynôme est de degré 7. Les détails de calcul sont dans l'annexe 2.

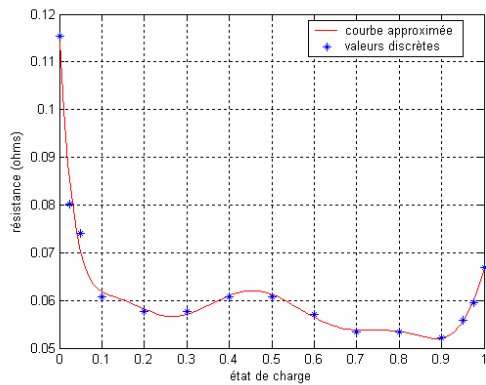


Figure 2.7a : R (soc)

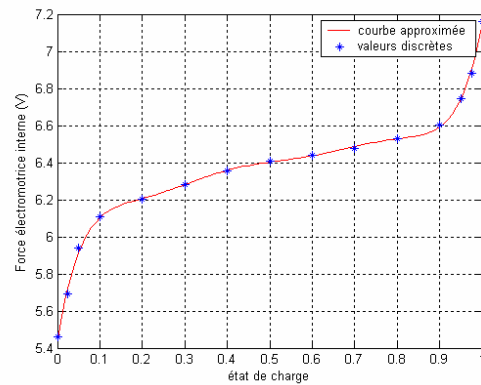


Figure 2.7b : E (soc)

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

$$\text{soc}(t) = - \frac{\int I dt}{C * 3600} + \text{soc}(t=0), \text{ soc}(t=0) \text{ étant l'état de charge initial et } C = 6.5 \text{ Ah.}$$

Nous pouvons donc en déduire le modèle final de la batterie illustré sur la figure 2.8 :

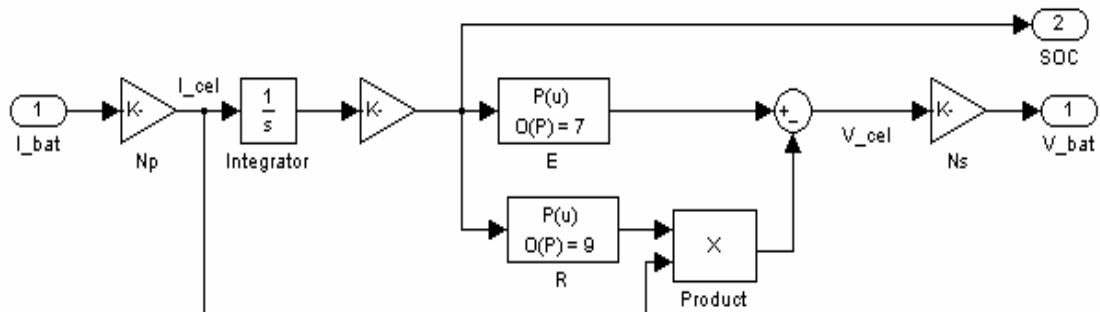


Figure 2.8 : le modèle détaillé de la batterie

## 2.2.5 Le moteur électrique

### 2.2.5.1 Introduction

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

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

$$C_e = p \frac{M_{sr}}{L_r} \Phi_{rd} I_{sq}, \text{ les paramètres se trouvant dans l'annexe 1.}$$

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

La régulation des grandeurs nécessaires au pilotage vectoriel de la machine fait apparaître alors trois boucles de régulation au lieu de quatre :

- Deux boucles internes pour la régulation des courants selon les axes d et q.
- Une boucle externe pour la régulation du flux rotorique.

Les régulateurs utilisés sont de type RST numérique en cascade déterminés par la technique du placement des pôles.

En résumé, le modèle du moteur électrique montré à la figure 2.10 consiste en trois entrées : la consigne du couple  $C_e^*$ , la tension d'alimentation  $V_{bat}$  et la vitesse de rotation  $W_{mot}$  et deux sorties : le couple réel fourni  $C_e$  et le courant batterie  $I_{bat}$ .

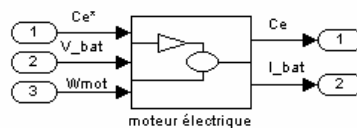


Figure 2.10 : modèle moteur électrique.

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

$$I_{bat} = \frac{v_{s1}i_{s1} + v_{s2}i_{s2} + v_{s3}i_{s3}}{V_{bat}}, \text{ } v_{si} \text{ étant la tension instantanée aux bornes d'une phase}$$

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

### 2.2.5.2 Caractéristique couple-vitesse

En supposant que la MLI est vectorielle [10], la tension maximale, dans le plan (d, q), que peut délivrer l'onduleur sans distorsion est

$$V_{\max} = V_{\max(a,b,c)} \sqrt{\frac{3}{2}} = \frac{V_{\text{bat}}}{\sqrt{3}} \sqrt{\frac{3}{2}} = \frac{V_{\text{bat}}}{\sqrt{2}}$$

Le courant maximal admissible dans le plan (d, q)  $I_{\max} = 1.3I_n \sqrt{\frac{3}{2}} = 151 \text{ A}$ , en admettant

un dépassement de 30% par rapport au courant nominal  $I_n$  égale à  $67 \sqrt{2} \text{ A}$ . Ayant  $I_{\max}$ , on peut passer maintenant au calcul du couple maximal  $C_{\max}$  que peut fournir le moteur.

$$\text{En régime permanent, } I_{sd} = \frac{\Phi_{rd}}{L_m} = \frac{1.2}{0.0291} = 41.237 \text{ A} \Rightarrow I_{sq} = \sqrt{I_{\max}^2 - I_{sd}^2} \approx 145 \text{ A}$$

$$\Rightarrow C_{\max} = p * I_{sd} * \Phi_{rd} = 2 * 145 * 1.2 = 348 \text{ N.m}$$

A présent, on va associer la batterie précédemment dimensionnée à la machine et sa commande afin de valider la caractéristique couple-vitesse.

$C_{\max}$  est le couple maximal jusqu'à la vitesse de base. Pour toute vitesse  $W_{\text{mot}}$  supérieure à la vitesse de base, nous allons déterminer le couple maximal que peut délivrer le moteur en imposant une rampe de couple de  $400 \text{ N.m/s}$  (voir figure 2.11).

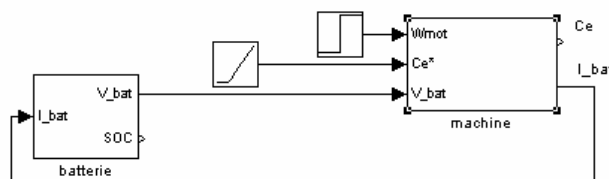


Figure 2.11 : association moteur-batterie

Par exemple pour  $W_{\text{mot}} = 920 \text{ tr/mn}$ , le couple maximal vaut  $270 \text{ N.m}$ , comme le montre la figure 2.12.

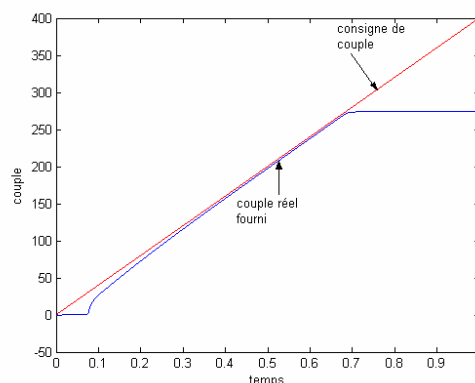


Figure 2.12 : réponse à une rampe de couple = 400/1

A cette même vitesse de 920 tr/mn, la figure 2.13 montre la réponse à un échelon de couple de 270 N.m.. La figure 2.14 montre que le module de la tension aux bornes de la phase vaut  $\frac{V_{bat}}{\sqrt{3}}$ , ce qui certifie que le couple correspondant est le couple maximal pour cette vitesse. Le courant batterie correspondant est représenté sur la figure 2.15.

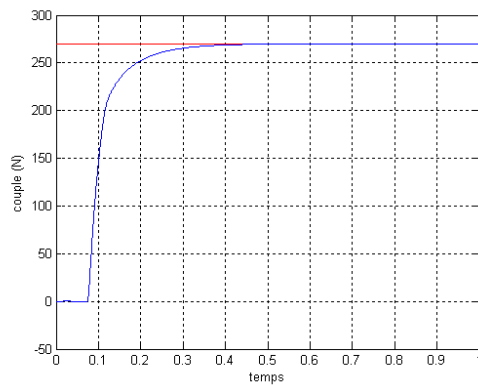


Figure 2.13 : réponse à un échelon de 270 N.m.

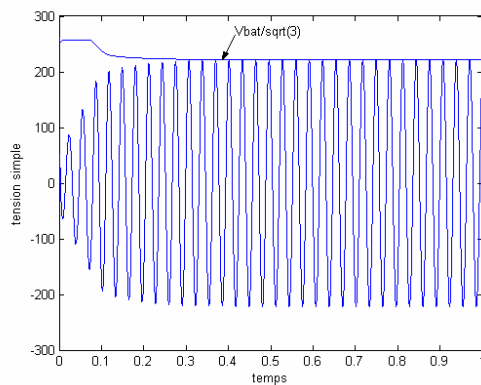


Figure 2.14 : tension aux bornes d'une phase.

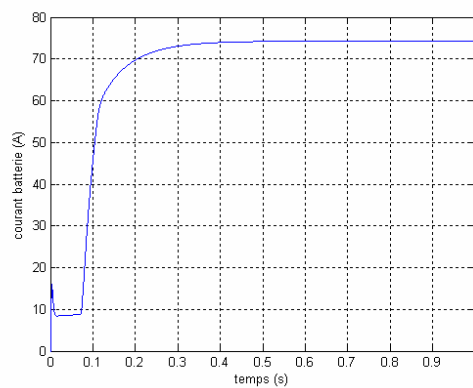


Figure 2.15 : courant délivré par la batterie.

Le même travail est répété pour plusieurs vitesses afin d'avoir la caractéristique finale de la figure 2.16. et ceci pour un soc = 0.7.

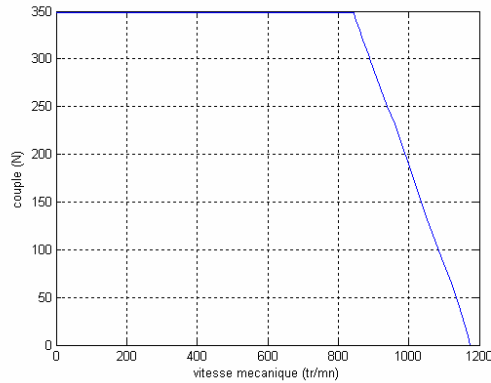


Figure 2.16 : caractéristique couple-vitesse à soc=0.7.

La même procédure est répétée pour plusieurs valeurs de soc (soc=0.8 et 0.95) et la figure 2.17 montre l'influence du soc sur la caractéristique.

Les points simulés sont regroupés dans le tableau 3.1 de l'annexe 3.

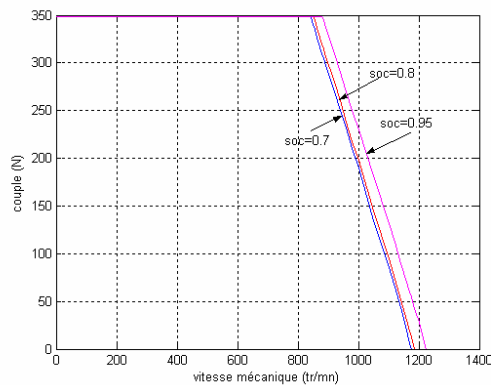


Figure 2.17 : variation de la caractéristique avec le soc.

La figure 2.17 montre que :

- Pour une vitesse donnée, plus la batterie est chargée, plus le couple fourni est grand.
- La vitesse de base augmente avec l'état de charge.

**Par la suite, la caractéristique du moteur à soc = 0.7, qui correspond au cas le plus défavorable, sera adoptée.** En effet pour un bon fonctionnement de la batterie, soc doit rester entre 0.7 et 0.95.

A soc = 0.7, la vitesse du moteur ne dépasse pas 1175 tr/mn ce qui n'est pas suffisant car il est prévu d'assister le moteur thermique en cas de forte demande de puissance sur toute

la gamme de vitesse envisagée (jusqu'à 4536 tr/mn). Comme les deux moteurs tournent à la même vitesse (architecture simple arbre), une plus large plage de vitesse pour le moteur électrique s'avère indispensable, d'où la nécessité de passer au défluxage.

### 2.2.5.3 Le défluxage

Avant d'introduire le défluxage, le flux de référence était de 1.2 Wb. Lorsque la tension atteint sa valeur maximale, on va réduire le flux, donc défluxer. Le fonctionnement du moteur se fait alors à tension constante égale à la celle atteinte à la vitesse de base [10]. Le nouveau flux de référence à introduire dans la commande, a été calculé de la façon suivante :

$$\Phi_{ref} \cong \frac{L_m}{L_s} * \frac{1}{W_s} * \sqrt{(V_s)_{max}^2 - (W_s \sigma L_s I_{sq})^2} ; (V_s)_{max} = 258 \text{ V}$$

est la tension maximale atteinte, dans le plan (d, q) à la vitesse de base et pour  $\text{soc} = 0.7$ .

La figure 2.17 montre la variation du nouveau flux de référence avec la vitesse du moteur. Les points simulés sont regroupés dans le tableau 3.2 de l'annexe 3.

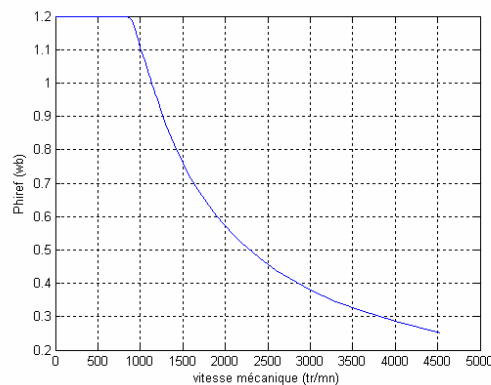


Figure 2.17 : le nouveau flux de référence.

Avec le défluxage, le moteur est maintenant capable de monter en vitesse et peut atteindre la vitesse maximale du moteur thermique. La figure 2.18 montre l'influence du défluxage sur la caractéristique couple-vitesse et le tableau 3.3 de l'annexe 3 regroupe les nouveaux points de fonctionnement.

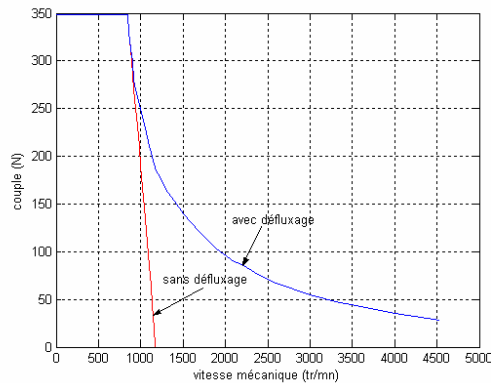


Figure 2.18 :  $C_e (W_{mot})$ .

### 2.2.5.4 Le mode générateur

Le moteur électrique est aussi prévu pour fonctionner en générateur lors du freinage pour récupérer l'énergie, d'où la nécessité d'avoir sa caractéristique pour ce deuxième mode de fonctionnement. Une rampe de  $-400 \text{ N.m/s}$  est appliquée cette fois ci. La figure 2.19 montre la caractéristique pour les deux modes de fonctionnement. Les points simulés se trouvent dans le tableau 3.4 de l'annexe 3.

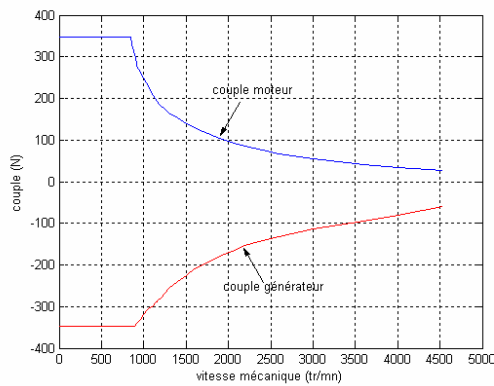


Figure 2.19 : couples moteur et générateur.

La caractéristique, obtenue par simulation, n'est pas tout à fait symétrique : la vitesse de base atteint cette fois 890 tr/mn, et la valeur absolue du couple pour une vitesse donnée est supérieure à celle en fonctionnement moteur.

La figure 2.20 montre la variation de la puissance en moteur et en générateur en fonction de la vitesse du moteur.

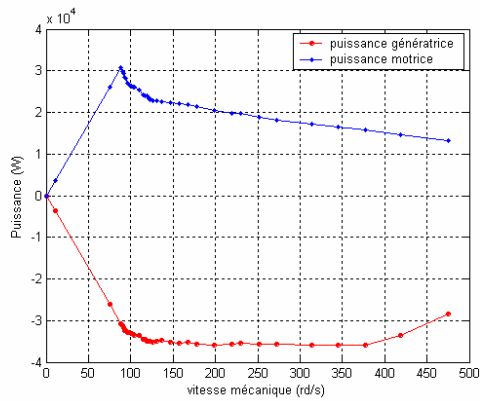


Figure 2.20 : La puissance pour les 2 modes.

En mode moteur, la puissance maximale pouvant être atteinte est d'environ 30 kW alors qu'en mode génératrice elle vaut -35 kW. Le moteur n'arrive pas à fournir la puissance nominale de 37 kW à cause de son alimentation par la tension batterie : à la vitesse de base, la tension aux bornes d'une phase vaut 211 V alors que la tension nominale est de 326 V (voir annexe 1).

## **Chapitre 3**

### ***Stratégie d'optimisation par la logique floue***

### 3.1 Introduction [11-12]

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

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

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

**Exemple :** considérons le cas où la vitesse est une variable, les fonctions d'appartenance sont montrées sur la figure 3.1

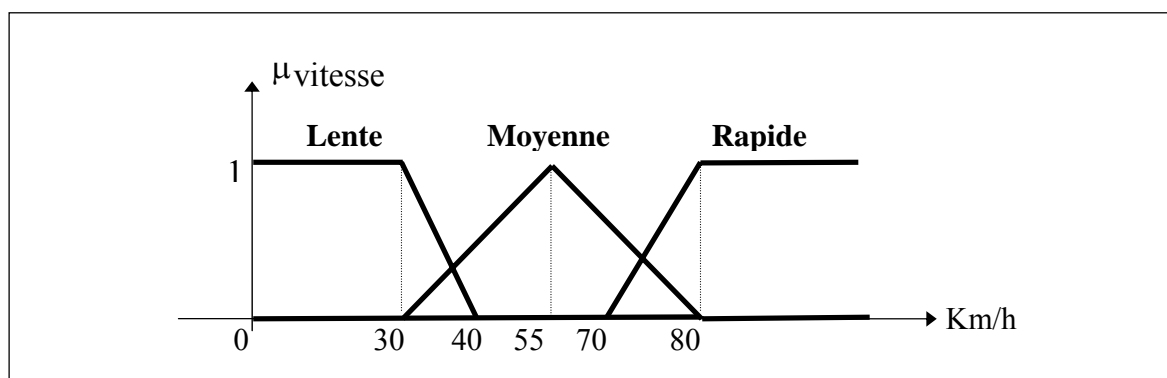


Figure 3.1 : exemple de fonctions d'appartenance.

L'univers de discours est de 0 à 100 km/h.

Les variables linguistiques sont : lente, moyenne, rapide.

‘Lente’ a été choisie pour les vitesses inférieures à 30 km/h, ‘rapide’ pour les vitesses supérieures à 80 km/h et ‘moyenne’ est une solution intermédiaire.

Une manière de combiner des propositions floues consiste à utiliser des règles (ou implications) floues. Une règle floue s’écrit :

« *Si  $x_1$  est  $A_1$  et  $x_2$  est  $A_2$  et.....et  $x_n$  est  $A_n$  alors  $y$  est  $B$*  »

La base de règles a pour but de structurer la connaissance que l'on a sur le contrôle du processus en produisant des règles de la forme:

*Si < état du processus > Alors < action en sortie >.*

La partie "**Si**" est appelée antécédent de la règle : elle indique la condition pour laquelle la règle est vraie, et la partie "**Alors**" est appelée conséquence de la règle : elle représente l’action à appliquer. Les opérateurs booléens (et, ou, non) sont utilisés pour combiner plusieurs conditions.

Les paramètres auxquels on a recours pour construire la base des règles sont:

- Le choix de "l'état du processus" et de la variable de sortie.
- Le choix du contour de l'antécédent et de la conséquence des règles.
- Le choix des valeurs linguistiques pour l'état du processus et la variable de sortie.

Les algorithmes de réglage conventionnels sont alors remplacés par une série de règles linguistiques de la forme "*Si .....Alors.....*". Par opposition à un régulateur classique, le régulateur par logique floue ne traite pas une relation mathématique bien définie (algorithme de réglage), mais utilise des inférences avec plusieurs règles se basant sur des variables linguistiques.

### 3.2 Le contrôleur flou

Il existe plusieurs types de contrôleurs flous : Mamdani, Larsen, Sugéno... Dans ce travail, un correcteur « Sugéno » a été adopté pour la simple raison qu’il est le plus communément utilisé dans les applications de type gestion d’énergie des véhicules [7,12]. Pour Sugéno les conséquences des règles sont des valeurs discrètes et pour calculer une sortie  $u_j$  du correcteur, il procède de la manière suivante [12]:

- La fuzzification : qui associe à une valeur numérique de l’entrée le 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....  $\Rightarrow \mu_i = \min (\mu_A(x_1), \mu_B(x_2))$
  - Si  $x_1$  est A ou  $x_2$  est B alors...  $\Rightarrow \mu_i = \max (\mu_A(x_1), \mu_B(x_2))$
  - Si  $x_1$  n’est pas A alors....  $\Rightarrow \mu_i = 1 - \mu_A(x_1)$ ,

- L'inférence : pour chaque règle  $i$ , le degré d'appartenance de l'antécédent  $\mu_i$  est utilisé pour modifier la conséquence de la règle  $c_i$ , et ceci est fait en les multipliant ( $\mu_i c_i$ ),
- L'accumulation : les résultats de l'étape d'inférence sont combinés en une seule valeur

telle que :  $u_j = \frac{\sum_{i=1}^n \mu_i c_i}{\sum_{i=1}^n \mu_i}$ ,  $n$  étant le nombre de règles.

### 3.3 Application au contrôle du véhicule hybride

Dans le contexte du véhicule hybride, objet complexe, multi physique et à paramètres fortement variables selon les points de fonctionnement et l'utilisation, l'établissement d'un modèle est une tâche ardue. C'est pourquoi nous nous intéressons aux méthodes d'optimisation sans modèles et qui s'appuient sur la connaissance.

La logique floue, par sa capacité à mimer le raisonnement humain semble particulièrement adaptée à la gestion de la répartition de puissance entre les deux sources d'énergie dont nous disposons. Elle possède en effet la robustesse nécessaire pour prendre naturellement en compte les variations du système.

Les objectifs de la stratégie d'optimisation se résument ainsi :

- 1- Satisfaire la demande de puissance du conducteur,
- 2- Réduire la consommation de carburant et par conséquent les émissions de CO<sub>2</sub>,
- 3- Maintenir l'état de charge de la batterie ente 0.7 et 0.95.

Le régulateur choisi possède trois entrées : la puissance demandée  $P_{dem}$  calculée à partir de la vitesse demandée, l'état de charge de la batterie soc et la vitesse du véhicule  $V$ . Il fournit en sortie le rapport de la boîte de transmission  $k$  et la puissance exigée du moteur thermique  $P_{th}$ . La puissance demandée au moteur électrique sera par la suite déduite :  $P_e = P_{dem} - P_{th}$ .

Dans la suite, une description des fonctions d'appartenance des différentes entrées est présentée.

#### 3.3.1 Les fonctions d'appartenance

##### • L'état de charge

Pour l'état de charge, la fonction est représentée sur la figure 3.2.

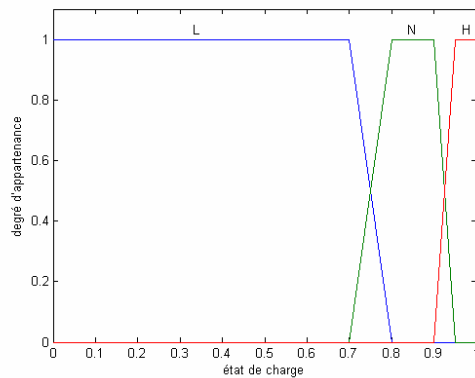


Figure 3.2 :  $\mu$  (soc).

Trois variables linguistiques ont été choisies pour décrire l'état de charge :

- L pour petit ('low') lorsque  $\text{soc} < 0.7$
- N pour normal lorsque  $0.8 < \text{soc} < 0.9$
- H pour grand ('high') lorsque  $\text{soc} > 0.95$ .

Pour un bon fonctionnement de la batterie et une meilleure durée de vie, il faut éviter de se trouver dans les deux cas extrêmes.

#### • La vitesse du véhicule

Pour la vitesse du véhicule  $V$ , la fonction choisie est illustrée sur la figure 3.3. Dans la stratégie, le choix du rapport  $k$  est basé sur la vitesse du véhicule (voir paragraphe 3.3.2). Ainsi pour chacun des 5 rapports de la boîte ( $k=13, 10, 7, 5, 4$ ), une fonction de type trapézoïdale a été associée.

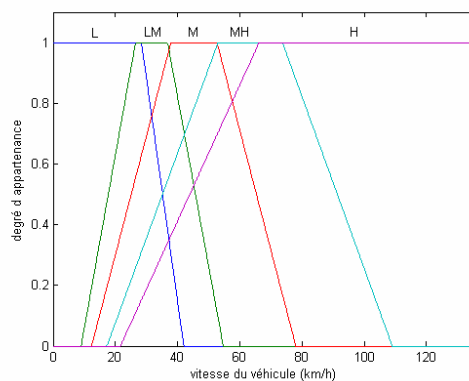


Figure 3.3 :  $\mu$ (v).

Pour les notations utilisées :

- L pour petit ('low')
- LM pour petit moyen ('low medium')
- M pour moyen ('medium')
- MH pour moyen grand ('medium high')
- H pour grand ('high').

On a que :  $W_{mot} = kW_{roue} \Rightarrow V(km/h) = 3.6 \frac{R}{k} W_{mot} (rd/s)$ , R étant le rayon d'une roue.

La vitesse maximale du véhicule correspond alors à la valeur minimale de  $k = 4$  et à la valeur maximale de  $W_{mot} = 475$  rd/s, elle vaut donc 136 km/h.

Le but de la stratégie est d'optimiser la consommation du moteur thermique dont la vitesse est comprise entre **75** et **475** rd/s, avec une zone de meilleur rendement pour les vitesses comprises entre **230** et **320** rd/s (voir figure 2.3).

Pour chaque valeur du rapport k, les quatre vitesses précédemment mentionnées du moteur thermique permettent de déterminer les quatre points caractéristiques de la fonction trapézoïdale correspondante. Par exemple pour  $k = 10$ , la fonction associée est montrée sur la figure 3.4 :

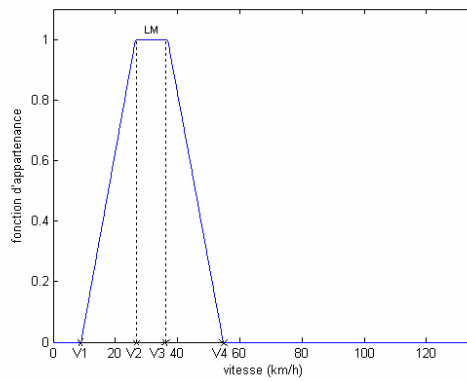


Figure 3.4 : la fonction associée à  $k=10$ .

$$V1 = 3.6 \frac{0.32}{10} 75 \approx 9 \text{ Km/h,}$$

$$V2 = 3.6 \frac{0.32}{10} 230 \approx 26.5 \text{ Km/h,}$$

$$V3 = 3.6 \frac{0.32}{10} 320 \approx 36.8 \text{ Km/h,}$$

$$V4 = 3.6 \frac{0.32}{10} 475 \approx 54.7 \text{ Km/h.}$$

Le tableau suivant résume les différentes valeurs de V1, V2, V3 et V4 pour les 5 fonctions :

| K  | V1 (km/h) | V2 (km/h) | V3 (km/h) | V4 (km/h) |
|----|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 13 | 0         | 0         | 28,4      | 42        |
| 10 | 9         | 26,5      | 36,8      | 54,7      |
| 7  | 12,34     | 37,85     | 52,66     | 78        |
| 5  | 17,28     | 53        | 73,7      | 109       |
| 4  | 21,6      | 66,2      | 136       | 136       |

• **La puissance demandée**

Pour déterminer les fonctions d'appartenance de la puissance demandée, on réalise une expertise basée sur le raisonnement suivant :

La puissance demandée est positive pendant la traction.

Les caractéristiques puissance (vitesse mécanique) des deux moteurs sont représentées sur la fig. 3.5 (voir fig. 2.3 et 2.20). La limite positive de la  $P_{dem}$  (univers de discours) vaut 69 kW ce qui correspond au maximum de puissance fournie par les deux moteurs ensemble : 55 kW thermique et 14 kW électrique.

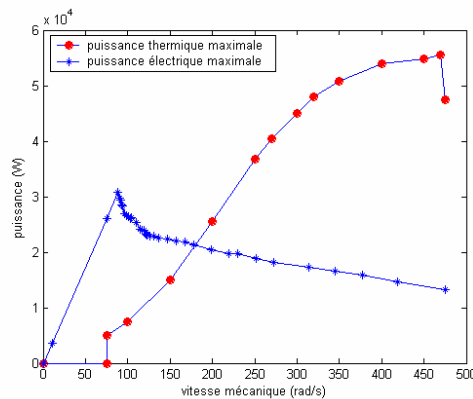


Figure 3.5 : Les puissances maximales thermique et électrique.

Les courbes d'iso rendement reportées sur la caractéristique du moteur thermique (fig. 2.3) indiquent qu'en dessous de 10 kW le rendement est très faible, entre 30 et 48 kW le rendement est optimal (environ 0.4).

Pendant la phase de freinage, la puissance demandée devient négative, ce qui correspond à une récupération d'énergie et une recharge de la batterie si son état de charge le permet (soc inférieur à 0.95).

La limite inférieure (-65 kW) a été fixée en considérant une sévère décélération de 100 à 0 km/h en 10 secondes.

On en déduit donc les fonctions représentées sur la figure suivante :

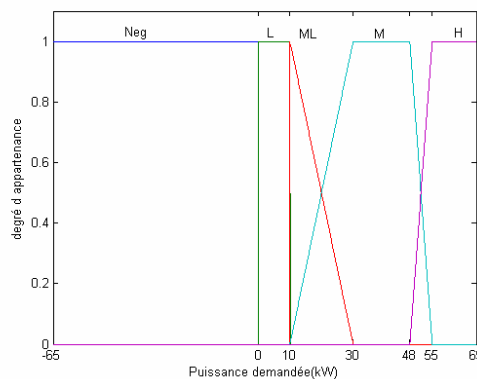


Figure 3.6 :  $\mu ( P_{dem} )$ .

Avec les notations associées :

- Neg pour négative
- L pour petit ('low')
- ML pour moyen petit ('medium low')
- H pour grand ('high').

### 3.3.2 La base des règles

Une fois les entrées du système de décision choisies, et leurs fonctions d'appartenance définies, 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. Cette étape essentielle s'appuie sur une connaissance des lois physiques du système et la simulation numérique permet d'ajuster les réglages.

La difficulté de la répartition de puissance est liée au nombre important de contraintes à prendre en compte. En effet, l'objectif primordial que nous nous fixons est de réduire les émissions de CO<sub>2</sub>. Pour parvenir à cela, il faut que le moteur thermique soit utilisé dans les meilleures conditions de rendement :

La cartographie du moteur thermique (figure 2.3) montre que, pour une vitesse donnée, plus la puissance fournie par le moteur thermique augmente, plus son rendement s'améliore.

Donc la stratégie doit toujours essayer de placer les points de fonctionnement du moteur thermique les plus proches possibles de la courbe optimale et cela en exigeant une puissance supérieure à la demande. Le surplus de puissance servira pour recharger la batterie.

Mais il va de soi qu'il faut aussi respecter les contraintes importantes sur les conditions d'utilisation de la batterie et sur la puissance que peut absorber le moteur électrique en mode générateur (voir figure 2.20).

De fait, il sera donc difficile d'être toujours sur la courbe optimale, mais on essaiera de s'en rapprocher le plus possible. Par exemple :

1- Lorsque  $W_{mot} = 250$  rd/s,  $P_{dem} = 20$  kW et  $soc < 0.95$ , dans ce cas le point de fonctionnement du moteur thermique peut être placé sur la courbe optimale  $\Rightarrow P_{th} = 35$

kW, le moteur électrique est capable à cette vitesse d'absorber 15 kW (voir fig. 2.20).

2- Par contre si  $W_{mot} = 450$  rd/s,  $P_{dem} = 20$  kW et  $soc < 0.95$ , le moteur thermique ne peut pas être optimisé au meilleur rendement en lui demandant 55 kW, car à cette vitesse le moteur électrique ne peut absorber que 30 kW au maximum.

La base de règles finalement construite est la suivante :

- 1- If V is L then k is 13
- 2- If V is LM then k is 10
- 3- If V is M then k is 7
- 4- If V is MH then k is 5

- 5- If V is H then k is 4
- 6- If  $P_{dem}$  is Neg then  $P_{th}$  is 0
- 7- If  $P_{dem}$  is L then  $P_{th}$  is 0
- 8- If  $P_{dem}$  is H then  $P_{th}$  is 55
- 9- If  $P_{dem}$  is M and soc is L then  $P_{th}$  is 55
- 10- If  $P_{dem}$  is ML and soc is L then  $P_{th}$  is 40
- 11- If  $P_{dem}$  is M and soc is N then  $P_{th}$  is 48
- 12- If  $P_{dem}$  is ML and soc is N then  $P_{th}$  is 30
- 13- If  $P_{dem}$  is not Neg and soc is H then  $P_{th}$  is  $P_{dem}$ .

On ne peut expliciter quelques unes de ces règles comme suit :

- Règle 6 : lorsque la  $P_{dem}$  est négative, seul le moteur électrique fonctionne pour récupérer l'énergie, le moteur thermique est arrêté.
- Règle 7 : le moteur thermique possède un très faible rendement pour les faibles puissances alors on a choisi de ne pas le démarrer avant que la puissance demandée atteigne 10 kW, il en résulte un démarrage en tout électrique.
- Règle 9 : lorsque la  $P_{dem}$  est élevée, le moteur thermique fournit son maximum (55 kW) et l'électrique vient l'assister selon l'équation  $P_e = P_{dem} - P_{th}$ .
- Règle 13 : lorsque le soc est élevé, la batterie ne peut plus être chargée et le moteur thermique fournira alors juste la puissance demandée.

### 3.4 Conclusion

Le but principal de ce chapitre était de présenter la stratégie d'optimisation par la logique floue en justifiant le choix des fonctions d'appartenances et des règles. Dans la suite et afin de valider cette stratégie, on va l'appliquer à plusieurs cycles de vitesse.

## **Chapitre 4**

### ***Résultats de simulation***

## 4.1 Introduction

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

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

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

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

## 4.2 Illustration des différents modes de fonctionnement

### 4.2.1 Le mode tout électrique

La figure 4.1 montre le profil de vitesse demandée ainsi que la réponse du système.

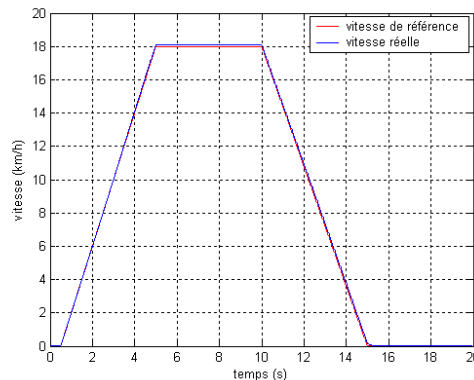


Figure 4.1 : Comparaison entre vitesse de référence et vitesse réelle.

La figure 4.2 montre que la puissance demandée n'a pas dépassé les 10 kW. Ainsi durant tout le cycle, seule la machine électrique est utilisée.

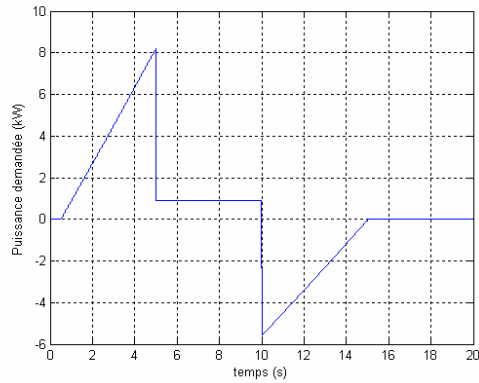


Figure 4.2 : La puissance demandée pour suivre le cycle.

La variation du rapport de la boîte est illustré sur la figure 4.3.

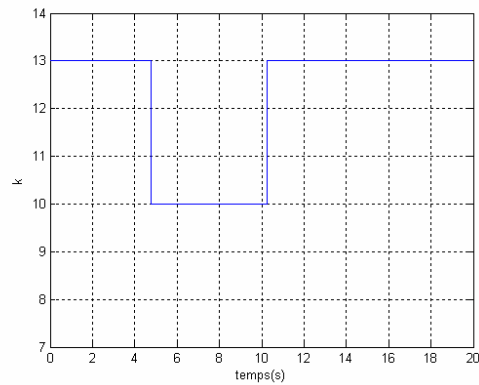


Figure 4.3 : Rapport de la boîte.

Ce cycle correspond à de faibles vitesses, seuls les deux premiers rapports sont utilisés.

La figure 4.4 montre le couple de référence ainsi que la réponse en couple du moteur électrique. Au début, durant la phase de démarrage, la machine est en mode moteur, puis vient la phase de freinage pour s'arrêter qui correspond à un fonctionnement en générateur.

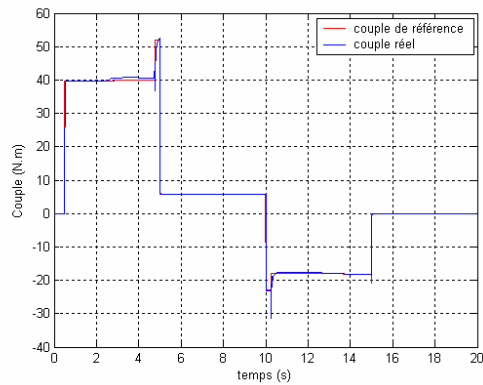


Figure 4.4 : Comparaison entre couple réel et couple de référence.

La batterie passe par les deux états :

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

Les figures 4.5, 4.6 et 4.7 montrent respectivement les variations de l'état de charge, de la tension et du courant batterie.

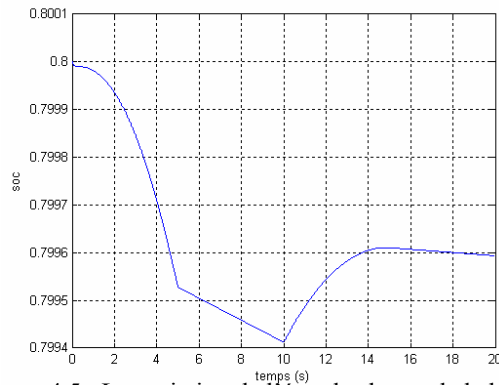


Figure 4.5 : La variation de l'état de charge de la batterie.

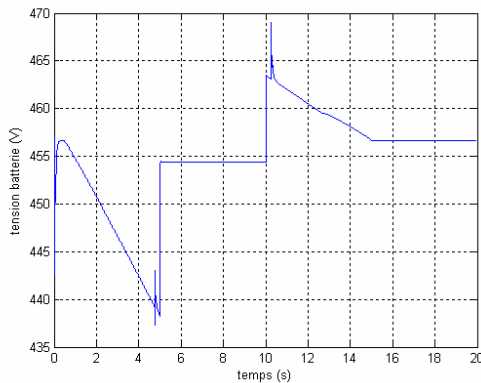


Figure 4.6 : La variation de la tension batterie.

batterie.

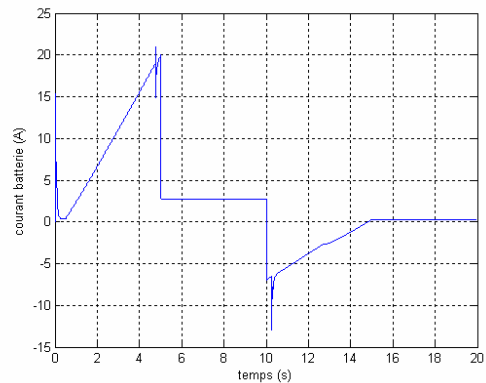


Figure 4.7 : La variation du courant

#### 4.2.2 Le mode mono propulsion

Sur ce profil de mission, la propulsion sera soit électrique, soit thermique.

En Europe, le cycle considéré comme le plus représentatif de l'utilisation moyenne d'une automobile pour la mesure des émissions et de la consommation est le Cycle Européen Normalisé (93/116) [5] de la figure 4.8.

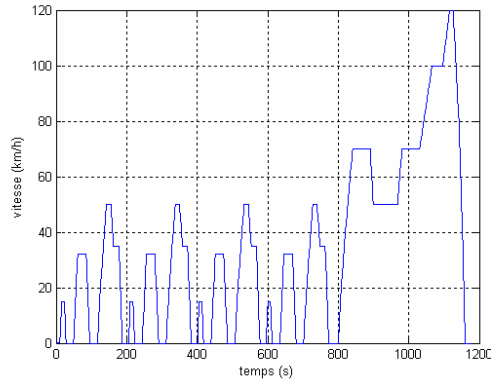


Figure 4.8 : Le cycle 93/116.

Seule une partie du cycle a été considérée pendant la simulation (entre 800 et 1162 s), la réponse en vitesse est montrée sur la figure 4.9.

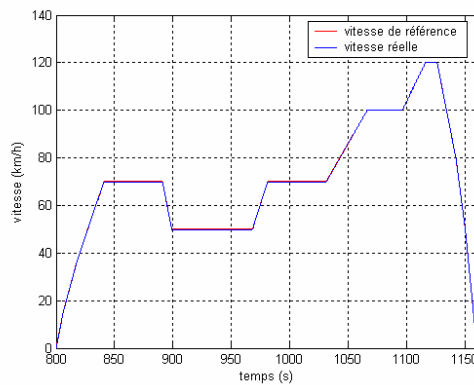


Figure 4.9 : Comparaison entre vitesse de référence et vitesse réelle.

La variation du rapport de la boîte de vitesse  $k$  en fonction du temps et de la vitesse du véhicule est représentée sur la figure 4.10.

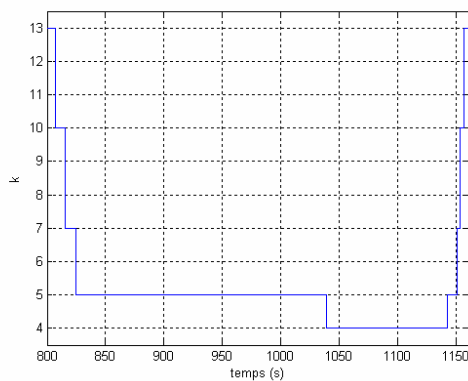


Figure 4.10 a :  $k$  (t).

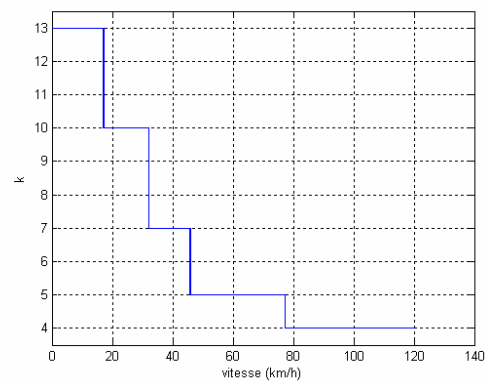
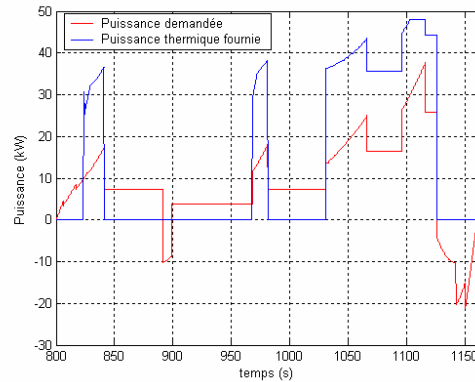


Figure 4.10 b :  $k$  (V).

Tant que la puissance demandée, illustrée sur la figure 4.11, est inférieure à 10 kW, c'est le moteur électrique qui assure la propulsion. Au delà de cette valeur, la propulsion est assurée par le moteur thermique. La puissance qu'il fournit est représentée sur la même figure. La différence est utilisée pour recharger la batterie à travers la machine électrique utilisée en génératrice.



Figures 4.11 : les puissances demandée et thermique.

La figure 4.12 montre l'évolution des points de fonctionnement du moteur thermique, avec hybridation, issus de la stratégie de répartition et sans hybridation (moteur thermique tout seul). Les points de fonctionnements sont comparés à la courbe optimale : avec hybridation, ils sont situés plus haut que sans hybridation et par conséquent ils ont un rendement meilleur.

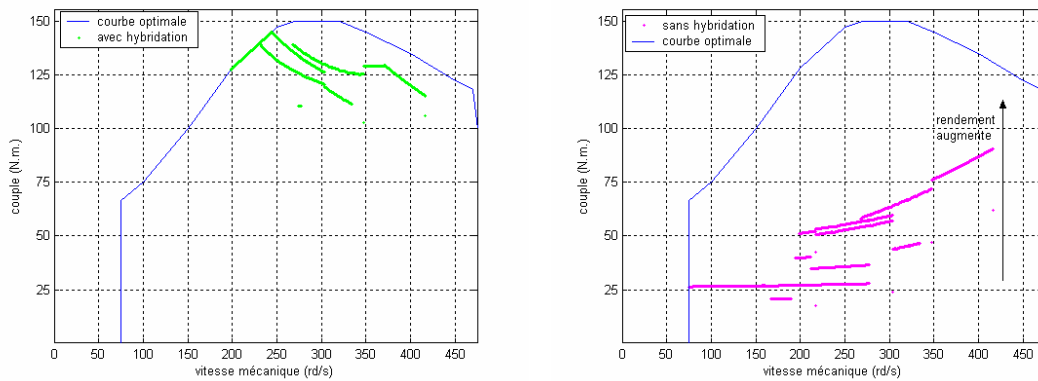


Figure 4.12 : points de fonctionnement du moteur thermique.

La réponse en couple du moteur électrique et sa vitesse sont tracées sur les figures 4.13 et 4.14.

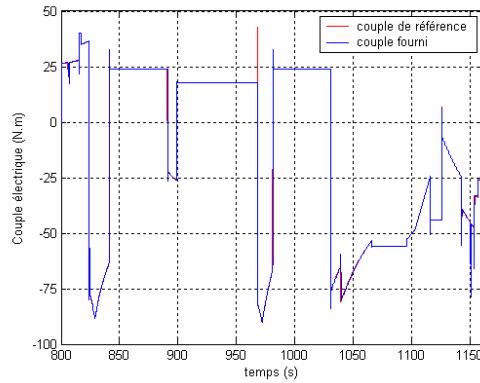


Figure 4.13 : couple électrique.

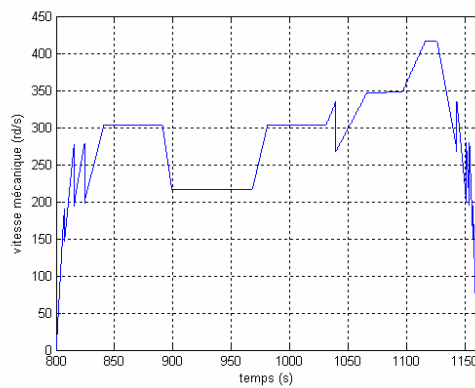


Figure 4.14 :  $W_{mot}(t)$ .

La vitesse de rotation de l'arbre primaire, qui n'est autre que la vitesse des deux moteurs, subit des discontinuités à cause du changement de rapport, alors que la vitesse de l'arbre secondaire, c'est à dire du véhicule est continue.

Les variations de l'état de charge, du courant et de la tension batterie sont montrées sur les figures 4.15, 4.16 et 4.17.

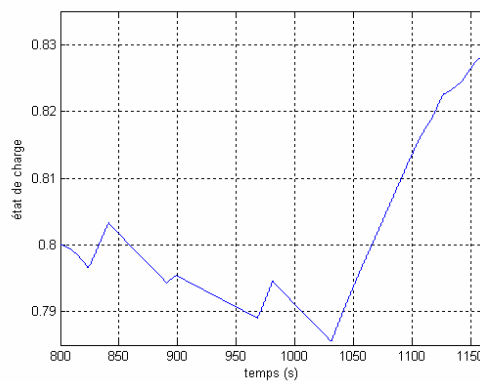


Figure 4.15 : soc (t).

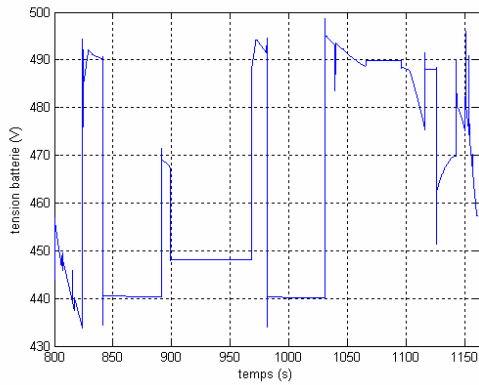


Figure 4.16 :  $V_{bat}(t)$ .

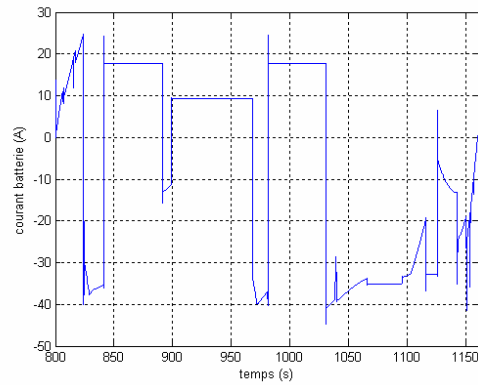


Figure 4.17 :  $I_{bat}(t)$ .

### 4.2.3 Le mode bi propulsion

Sur le profil de mission de la figure 4.18, lors de certains points de fonctionnement, la propulsion sera assurée simultanément par les deux moteurs. On parle dans ce cas de mode assisté ou de mode bi propulsion.

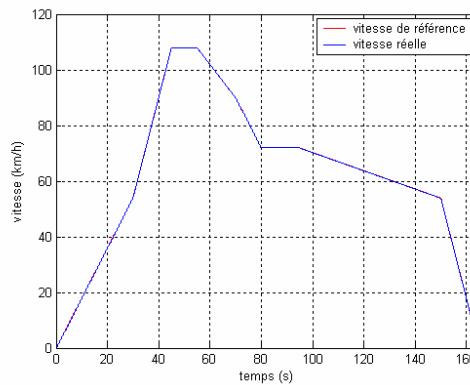


Figure 4.18 : vitesse de référence et vitesse réelle.

Sur la figure 4.19, nous avons représenté la puissance demandée ainsi que les puissances de chaque moteur. On peut y voir les différents modes de fonctionnement.

La notation « +EM » correspond au cas où la machine électrique contribue à la propulsion alors que « -EM » correspond au fonctionnement en génératrice. « MT » sous entend le moteur thermique. Le mode bi propulsion est compris entre 41.5 et 45 secondes.

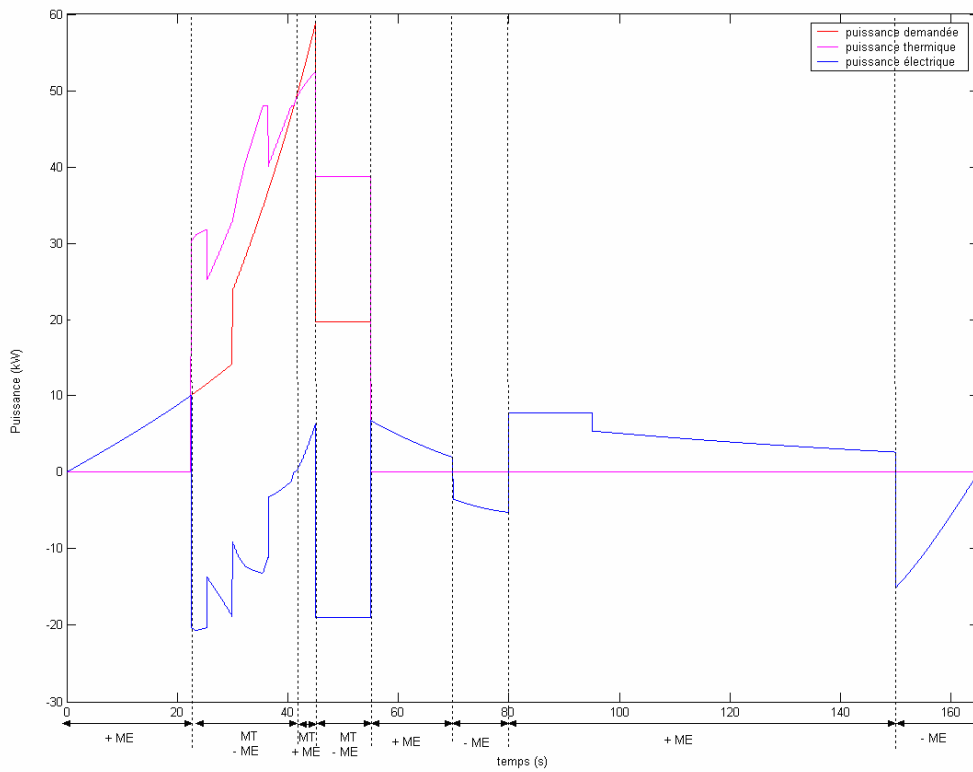


Figure 4.19 : les puissances demandée, thermique et électrique.

L'évolution du soc sur la figure 4.20 est conforme à ce qu'on attendait. On peut remarquer que pendant le mode bi propulsion, soc diminue.

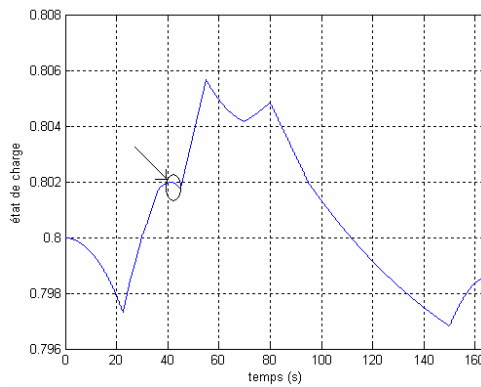


Figure 4.20 : soc (t).

De nouveau, la courbe 4.21 montre l'intérêt de l'hybridation dans l'amélioration du rendement du moteur thermique.

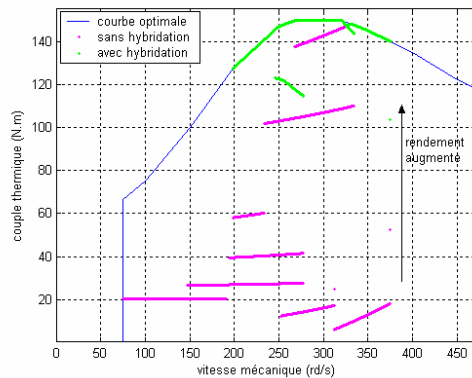


Figure 4.21 : les points de fonctionnement du moteur thermique.

### 4.3 Conclusion

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

L'utilisation du seul moteur électrique en propulsion pour des puissances demandées inférieures à 10 kW permet d'éviter l'utilisation du moteur thermique dans un domaine de fonctionnement dans lequel il est particulièrement polluant et peu efficace.

De surcroit, nous avons aussi démontré que nous pouvons maintenir les points de fonctionnement du moteur thermique sur, ou au voisinage, de sa courbe optimale. Ainsi son rendement sera amélioré et les émissions de CO<sub>2</sub> seront réduites.

## Conclusion

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

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

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

Nous avons ensuite présenté le dimensionnement des principaux composants de la chaîne de traction hybride en fonction des critères de profils de mission pour un véhicule destiné à un usage urbain et semi-urbain. Ce travail a permis de définir le moteur à combustion interne avec une puissance de 55kW et la machine à induction avec une puissance de 37kW. Nous avons aussi choisi et dimensionné la batterie, de type Ni-MH. Elle est constituée de 70 cellules en série et de 4 cellules en parallèle.

Afin de préparer la simulation numérique de l'ensemble de la chaîne, nous avons développé la modélisation des constituants. Le moteur à combustion interne est modélisé simplement par sa caractéristique couple-vitesse associée au réseau des courbes d'iso rendement et d'émissions d'oxydes de carbone. La machine à induction est représentée dans le référentiel de Concordia par ses équations d'état. Elle est contrôlée dans le référentiel (d, q) par une technique de commande vectorielle. Nous avons intégré à la commande un algorithme de défluxage qui a permis d'augmenter la vitesse de base et de l'adapter aux contraintes de la structure parallèle.

La batterie a été modélisée par un circuit électrique équivalent de Thévenin constitué par une fem  $E$  en série avec une résistance  $R$ . Ces paramètres ont été identifiés à partir des caractéristiques de décharge et leurs évolutions en fonction de l'état de charge ont été obtenues.

Le véhicule a été modélisé simplement comme une masse en mouvement soumise à la force motrice et aux forces résistantes. La boîte de vitesses est considérée comme parfaite et représentée par un rapport de transmission.

Par la suite, nous avons mis en place la stratégie de gestion de l'énergie à bord du véhicule. Un contrôleur à base de logique floue a été implanté. En fonction de la puissance demandée, de la vitesse du véhicule et de l'état de charge de la batterie, le contrôleur flou choisit la meilleure répartition de puissance entre le moteur thermique et la machine électrique. Cette stratégie a permis d'utiliser le moteur thermique au meilleur de son rendement et de réduire les émissions d'oxydes de carbone et même de les supprimer notamment par un démarrage tout électrique. La simulation numérique a permis de valider la stratégie sur trois profils de mission différents.

## Perspectives

Nous avons identifié plusieurs axes dans lesquels on pourrait poursuivre ce travail.

On pourrait tout d'abord améliorer la modélisation par :

- le développement d'un modèle plus fin de la transmission mécanique,
- une représentation des lois d'évolution des pédales,
- la prise en compte de la température dans le modèle de la batterie et dans celui de la machine à combustion interne,
- l'introduction des forces de tangage et de roulis dans la dynamique du véhicule.

En ce qui concerne la gestion de l'énergie, on pourrait aussi développer les thèmes suivants :

- introduire dans la simulation une cartographie de la machine électrique avec les courbes d'iso rendement en mode moteur et générateur,
- introduire dans la simulation une cartographie de la batterie avec les courbes d'iso rendement,
- introduire les demandes de puissance des auxiliaires (climatisation...),
- optimiser les règles du contrôleur flou par une approche mathématique d'optimisation globale.

Enfin, nous envisageons de nous rapprocher de « professionnels » (constructeur ou équipementier automobile) afin de valider notre approche par l'expérience.

## Annexe 1

### **Caractéristiques des moteurs asynchrones LS 225 ST-37 kW-Leroy Somer fournies par le constructeur:**

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

En supposant les fuites rapportées au stator :

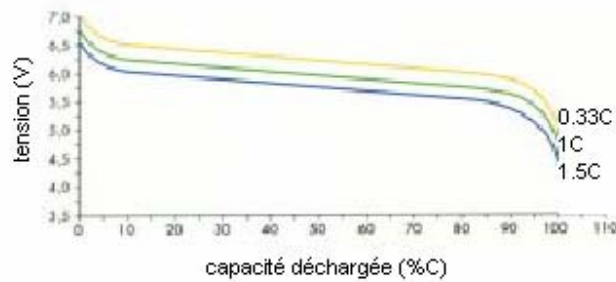
$M_{sr} = L_r = L_m = 29.1 \text{ mH}$  ;  $M_{sr}$  étant l'inductance mutuelle stator-rotor,  
 $L_r$  l'inductance propre rotor.

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

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

## Annexe 2

### Identification de E (soc) et R (soc)



Évolution de la tension lors de la décharge  
Pour différents courants de décharge

Pour une valeur fixée du soc :

$V_1$  est l'intersection avec la courbe 0.33C

$V_2$  est l'intersection avec la courbe 1C

$V_3$  est l'intersection avec la courbe 1.5C

C étant la capacité nominale, égale à 6.5 Ah.

Comme pour un soc donné E et R sont respectivement constants, on a donc :

$$V_1 = E - RI_1, I_1 = 0.33C$$

$$V_2 = E - RI_2, I_2 = C$$

$$V_3 = E - RI_3, I_3 = 1.5C$$

D'où :

$$R_1 = \frac{V_1 - V_2}{I_2 - I_1}, R_2 = \frac{V_2 - V_3}{I_3 - I_2}, R_3 = \frac{V_1 - V_3}{I_3 - I_1},$$

$$D'où finalement R = \frac{R_1 + R_2 + R_3}{3}.$$

Les valeurs obtenues sont les suivantes :

| R1          | R2         | R3         | R          |
|-------------|------------|------------|------------|
| 0,057692308 | 0,07692308 | 0,06574622 | 0,0667872  |
| 0,057692308 | 0,06153846 | 0,0591716  | 0,05946746 |
| 0,057692308 | 0,05384615 | 0,05588429 | 0,05580758 |
| 0,057692308 | 0,04615385 | 0,05259698 | 0,05214771 |

|             |            |            |            |
|-------------|------------|------------|------------|
| 0,046153846 | 0,06153846 | 0,05259698 | 0,05342976 |
| 0,046153846 | 0,06153846 | 0,05259698 | 0,05342976 |
| 0,046153846 | 0,06923077 | 0,05588429 | 0,05708963 |
| 0,046153846 | 0,07692308 | 0,0591716  | 0,06074951 |
| 0,046153846 | 0,07692308 | 0,0591716  | 0,06074951 |
| 0,040384615 | 0,07692308 | 0,05588429 | 0,05773066 |
| 0,040384615 | 0,07692308 | 0,05588429 | 0,05773066 |
| 0,046153846 | 0,07692308 | 0,0591716  | 0,06074951 |
| 0,057692308 | 0,09230769 | 0,07232084 | 0,07410695 |
| 0,069230769 | 0,09230769 | 0,07889546 | 0,08014464 |
| 0,080769231 | 0,15384615 | 0,11176857 | 0,11546132 |

Une fois R calculée, on passe au calcul de E:

$$E_1=V_1+RI_1, E_2=V_2+RI_2, E_3=V_3+RI_3 \text{ et } E = \frac{E_1+E_2+E_3}{3}.$$

Les différentes valeurs sont regroupées dans le tableau suivant :

| E1         | E2         | E3         | E          |
|------------|------------|------------|------------|
| 7,14325855 | 7,18411681 | 7,15117521 | 7,15951686 |
| 6,87755769 | 6,88653846 | 6,87980769 | 6,88130128 |
| 6,74470726 | 6,73774929 | 6,74412393 | 6,74219349 |
| 6,61185684 | 6,58896011 | 6,60844017 | 6,60308571 |
| 6,51460684 | 6,54729345 | 6,52094017 | 6,52761349 |
| 6,46460684 | 6,49729345 | 6,47094017 | 6,47761349 |
| 6,42245726 | 6,47108262 | 6,43162393 | 6,44172127 |
| 6,38030769 | 6,44487179 | 6,39230769 | 6,40582906 |
| 6,33030769 | 6,39487179 | 6,34230769 | 6,35582906 |
| 6,24883226 | 6,32524929 | 6,26287393 | 6,27898516 |
| 6,17383226 | 6,25024929 | 6,18787393 | 6,20398516 |
| 6,08030769 | 6,14487179 | 6,09230769 | 6,10582906 |
| 5,9089594  | 5,98169516 | 5,92254274 | 5,93773243 |
| 5,67191026 | 5,72094017 | 5,68141026 | 5,69142023 |
| 5,39766453 | 5,55049858 | 5,42574786 | 5,45797032 |

•Pour R, un polynôme de degré 9 a été retenu, les coefficients dans l'ordre croissants sont alors :

1.0e+003 \*[-0.18613071538066 0.92070217900893 -1.91440966798028  
2.17537531072058 -1.47108597039846 0.60551962999085 -0.14978220321593  
0.02141014469663 -0.00164636316513 0.00011423641492

•Pour E, le polynôme choisi est d'ordre 7, les coefficients sont alors :

1.0e+003 \*[0.30844490586172 -1.08961964952882 1.56475071060997 -  
1.17202113603541 0.48890545257763 -0.11277072635905 0.01401694326073  
0.00544241913016]

### Annexe 3

#### **Caractéristiques couple-vitesse de la machine électrique**

Le tableau 3.1 résume les points de fonctionnement qui ont été simulés pour  $\text{soc}=0.7, 0.8$  et  $0.95$  respectivement.

| <b>W(tr/mn)</b> | <b>Couple (N)<br/>soc=0,7</b> | <b>Couple (N)<br/>soc=0,8</b> | <b>Couple (N)<br/>soc=0,95</b> |
|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|
| 0               | 348                           | 348                           | 348                            |
| 845             | 348                           | 348                           | 348                            |
| 850             | 340                           | 348                           | 348                            |
| 855             | 334                           | 345                           | 348                            |
| 860             | 330                           | 340                           | 348                            |
| 870             | 320                           | 330                           | 348                            |
| 880             | 310                           | 320                           | 348                            |
| 885             | 305                           | 315                           | 345                            |
| 890             | 300                           | 310                           | 340                            |
| 920             | 270                           | 280                           | 310                            |
| 940             | 250                           | 260                           | 290                            |
| 960             | 232                           | 238                           | 270                            |
| 980             | 210                           | 217                           | 250                            |
| 1000            | 190                           | 198                           | 230                            |
| 1050            | 135                           | 145                           | 182                            |
| 1100            | 85                            | 95                            | 132                            |
| 1120            | 65                            | 73                            | 112                            |
| 1140            | 44                            | 52                            | 90                             |
| 1160            | 20                            | 30                            | 70                             |
| 1170            | 5                             | 19                            | 60                             |
| 1175            | 0                             | 13                            | 55                             |
| 1187            |                               | 0                             | 42                             |
| 1200            |                               |                               | 28                             |
| 1225            |                               |                               | 0                              |

**Tableau 3.1**

Le tableau 3.2 montre le défluxage, c'est à dire la variation du flux avec la vitesse du moteur  $W_{\text{mot}}$  :

| Wmot (tr/mn) | flux de référence calculé (wb) |      |         |      |        |
|--------------|--------------------------------|------|---------|------|--------|
| 0            | 1,2                            |      |         |      |        |
| 485          | 1,2                            | 1100 | 1,026   |      |        |
| 860          | 1,965                          | 1120 | 1,01125 | 1700 | 0,6715 |
| 870          | 1,195                          | 1140 | 0,9964  | 1900 | 0,601  |
| 890          | 1,191                          | 1160 | 0,9822  | 2100 | 0,5436 |
| 900          | 1,187                          | 1170 | 0,9756  | 2200 | 0,5189 |
| 920          | 1,177                          | 1175 | 0,9716  | 2400 | 0,4757 |
| 940          | 1,1592                         | 1200 | 0,95136 | 2600 | 0,4391 |
| 960          | 1,1404                         | 1250 | 0,9133  | 3000 | 0,3805 |
| 980          | 1,123                          | 1300 | 0,8782  | 3300 | 0,346  |
| 1000         | 1,106                          | 1400 | 0,81545 | 3600 | 0,317  |
| 1050         | 1,0655                         | 1500 | 0,7611  | 4000 | 0,2854 |
|              |                                | 1600 | 0,7135  | 4536 | 0,252  |

**Tableau 3.2**

Le tableau 3.3 regroupe les points simulés avec défluxage :

| W (tr/mn) | couple (N) |      |     |
|-----------|------------|------|-----|
| 0         | 348        |      |     |
| 845       | 348        | 1200 | 182 |
| 860       | 330        | 1250 | 175 |
| 870       | 322        | 1300 | 165 |
| 890       | 305        | 1400 | 153 |
| 900       | 300        | 1500 | 140 |
| 920       | 280        | 1600 | 130 |
| 940       | 270        | 1700 | 120 |
| 960       | 262        | 1900 | 103 |
| 980       | 254        | 2100 | 90  |
| 1000      | 250        | 2200 | 86  |
| 1050      | 230        | 2400 | 75  |
| 1100      | 210        | 2600 | 67  |
| 1120      | 204        | 3000 | 55  |
| 1140      | 200        | 3300 | 48  |
| 1160      | 192        | 3600 | 42  |
| 1170      | 190        | 4000 | 35  |
| 1175      | 188        | 4536 | 28  |

**Tableau 3.3**

Le tableau 3.4 regroupe les points simulés en mode générateur :

| W (tr/mn) | Couple (N) |      |      |
|-----------|------------|------|------|
| 0         | -348       |      |      |
| 845       | -348       | 1200 | -280 |
| 860       | -348       | 1250 | -267 |
| 870       | -348       | 1300 | -255 |
| 890       | -348       | 1400 | -240 |
| 900       | -344       | 1500 | -225 |
| 920       | -340       | 1600 | -210 |
| 940       | -335       | 1700 | -200 |
| 960       | -330       | 1900 | -180 |
| 980       | -325       | 2100 | -162 |
| 1000      | -320       | 2200 | -154 |
| 1050      | -305       | 2400 | -142 |
| 1100      | -300       | 2600 | -131 |
| 1120      | -295       | 3000 | -114 |
| 1140      | -292       | 300  | -104 |
| 1160      | -288       | 3600 | -95  |
| 1170      | -285       | 4000 | -80  |
| 1175      | -284       | 4536 | -60  |

**Tableau 3.4**

## REFERENCES

1. P. Degobert “Pollution atmosphérique, réduction des émissions dues au moteur”, Techniques de l’Ingénieur, traité génie mécanique Doc. B 2 714.
2. P.Leduc and all, “Downsizing of Gasoline Engine : an Efficient Way to Reduce CO2 Emissions”, Oil and Gas Science and Technology – Rev. IFP, Vol. 58 (2003), No. 1, pp. 115-127
3. A. Martin “Progress of fuel cell technology allows for different fuel options ”, Electric Vehicle Symposium EVS 18, Berlin, Octobre 2001.
4. S. Delprat “Evaluation de stratégies de commande pour véhicules hybrides parallèles ”, Rapport de thèse. Université de Valenciennes et des Hainault Cambrésis, LAMIH, 2002.
5. G. Paganelli “ Conception et commande d’une chaîne de traction pour véhicule hybride parallèle thermique et électrique ”, rapport de thèse. Université de Valenciennes et du Hainault Cambrésis, LAMIH, 1999.
6. M. Ehsany, K. M. Rahman, and H. A. Toliyat, “Propulsion system design of electric and hybrid vehicle application”, IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 44, pp. 19-27 Feb. 1997.
7. Naim A. Kheir, Mutasim A. Salman, Niels J. Schouten “Emissions and fuel economy trade-off for hybrid vehicles using fuzzy logic ”, Mathematics and Computers in simulation 66 (2004), p.155-172.
8. P.H. Mellor, N. Schofield, A.J. Brown, D.Howe, “Assessment of supercapacitor/flywheel and battery EV traction system”, ISATA 2000, p235-242, session ‘Electric/Powertrain’, Dublin, September 2000.
9. Fabrice DELFOSSE, “Détermination de l’état de charge des batteries d’un véhicule électrique”, travail de fin d’études à l’université de Liège, année académique 1997-1998.
10. W. Leonhard, “Control of electrical drives”, Springer Verlag 1985.
- 11 F. Zidani, “ Contribution à la commande et au diagnostic de la machine Asynchrone par la logique floue”, thèse de Doctorat de l’Université de Batna (Algérie), 29 janvier 2003.
12. N. Schouten, M. Salman, and N. Kheir, “Fuzzy logic control for parallel hybrid vehicles”, IEEE Trans. Contr. Syst.Technol., vol 10,pp. 460-468, May 2002.

