

Système flou de supervision des modes de fonctionnement d'un véhicule hybride électrique parallèle

C Forgez, G Friedrich, J.M. Biedinger

Université de Technologie de Compiègne
Laboratoire d'Electromécanique
BP20529
60205 COMPIEGNE Cedex
e-mail: christophe.forgez@utc.fr

Résumé - Cet article présente une méthode de gestion des modes de fonctionnement d'un véhicule hybride électrique parallèle. Des rappels concernant la structure parallèle hybride sont présentés en début d'article. Etant données les nombreuses difficultés liées à l'utilisation d'une telle structure, nous proposons une méthode permettant de déterminer, de manière intuitive, quel mode de traction (électrique, hybride ou thermique) adopté en fonction de l'environnement traversé par le véhicule et en fonction de l'état de charge des batteries. Les règles intuitives sont formalisées au travers d'inférences floues. Des simulations présentent le fonctionnement d'un tel superviseur pour différentes configurations.

Mots clés - véhicule hybride électrique, gestion des modes de fonctionnement, logique floue

I INTRODUCTION

L'individualisation des transports routiers conjugué au développement des infrastructures et à la concentration des grandes agglomérations, ont conduit dans les deux dernières décennies à l'augmentation notable de la pollution atmosphérique causée par les rejets de gaz des véhicules thermiques. Bien que la motorisation électrique soit une réalité, et qu'elle permet d'annuler ces rejets de gaz polluants, celle-ci ne semble pourtant pas être plébiscitée par les automobilistes en raison d'une autonomie restreinte, d'une recharge contraignante et inadaptée à leurs besoins. C'est pourquoi de nombreux constructeurs s'orientent vers une hybridation afin de combiner les avantages de la motorisation thermique et de la motorisation électrique. L'objectif de l'hybridation réside dans la minimisation de la consommation de carburant et par conséquent conduit à la réduction des rejets de gaz polluants [1][2].

La structure sur laquelle nous travaillons est composée d'une machine électrique placée sur l'arbre de motorisation principal [3]. Des travaux menés au Laboratoire d'Electromécanique de Compiègne ont déjà montré la possibilité d'adopter cette structure pour la fonction d'alternodémarrage et, se sont concrétisés par la réalisation d'un prototype en collaboration avec un équipementier automobile [4]. Avec la structure hybride trois modes de fonctionnement sont alors possibles: le mode tout électrique (préconisé en ville ou en bouchon), le mode hybride (la traction électrique s'ajoute ou se substitue en partie à la traction thermique) et le mode thermique (seule la machine thermique sert à la motorisation). La recharge des batteries, ou de leurs

supercapacités éventuellement associées, dans les véhicules hybrides électriques parallèles s'effectue de manière autonome soit à la l'aide du moteur thermique, soit par le biais de l'énergie cinétique récupérée et convertie lors des phases de freinage.

L'une des difficultés principales liées à la structure hybride est la gestion des flux d'énergie, autrement dit : **Comment gérer au mieux et de manière autonome l'énergie électrique embarquée et de manière tout à fait transparente pour le conducteur ?** Il est extrêmement difficile de répondre à cette question de par la conception du système. Sa résolution est en effet assujettie à diverses contraintes. Etant donné la complexité du problème, nous proposons de définir une stratégie basée sur une analyse intuitive du problème de gestion des flux d'énergie.

Dans un premier temps nous allons redéfinir la structure hybride ainsi que le rôle du superviseur. Ensuite nous proposerons une gestion floue des flux d'énergie en fonction de l'environnement dans lequel circule le véhicule et, de l'état de charge des batteries. Des simulations effectuées sur les bases d'un véhicule hybride électrique parallèle de tourisme sont proposées afin de visualiser les basculements d'un mode à l'autre.

II SUPERVISION

On se propose dans ce paragraphe de définir une stratégie basée sur une analyse intuitive du problème de gestion et qui englobe différentes sous stratégies : il faut en effet définir quel mode de traction on utilise (tout électrique, hybride ou tout thermique), dans quelles proportions, et comment gérer la recharge. Ainsi, nous décomposons notre stratégie en trois niveaux :

- le premier niveau **permet de calculer** "un degré d'intérêt à utiliser le mode tout électrique" pour la traction du véhicule
- le second niveau **décide** à partir du résultat du "degré d'intérêt à utiliser le mode tout électrique" quel mode adopter pour la traction (électrique, hybride ou thermique)
- le troisième niveau **quantifie** la valeur des couples électromécaniques selon les différents cas (mode traction ou mode recharge).

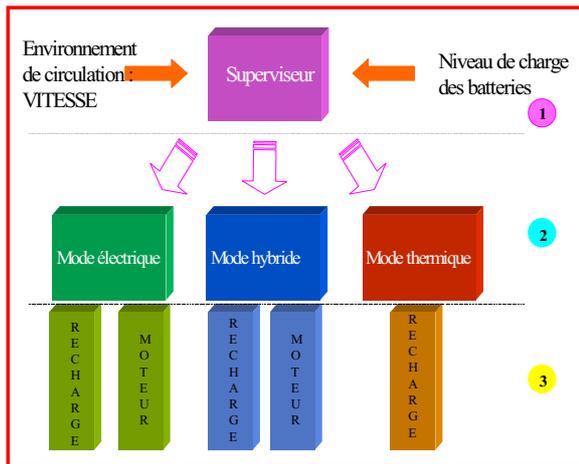


Figure 1. Schéma décisionnel

Ce dernier niveau requiert une loi de commande pour la machine électrique ainsi que pour le moteur thermique et ceci pour chaque mode (électrique, hybride ou thermique) choisi.

Les lois de commande pour les modes thermique et tout électrique découlent du bon sens : on a le couple thermique égal au couple désiré et le couple électromécanique nul en régime thermique. Par contre on a le couple thermique nul et le couple électromécanique égal au couple désiré en régime électrique

En ce qui concerne la loi de commande du mode hybride, différentes stratégies sont proposées afin de tenir compte du cycle de fonctionnement et des rendements des moteurs thermiques et électriques [1][5]. Nous ne traiterons pas dans cet article de la loi de commande en mode hybride. Nous focalisons toute notre attention sur les niveaux 1 et 2 du superviseur en supposant que toutes les lois de commande soient déterminées.

III SUPERVISION FLOUE

Le choix du mode de traction dépend essentiellement de l'environnement dans lequel évolue le véhicule ainsi que de l'état de charge des batteries.

Nous avons donc axé notre gestion sur l'analyse de la vitesse du véhicule V_{veh} , ce qui nous renseigne sur le type d'environnement traversé et, sur l'analyse de la quantité d'énergie électrique disponible Q_{dispo} . L'idée est de privilégier plutôt le mode électrique en ville, afin de réduire les émissions de gaz polluants, et plutôt le mode thermique sur autoroute, où le moteur thermique pourra servir éventuellement à la recharge des batteries. Cependant, le choix du mode tout électrique va dépendre également de la quantité d'énergie électrique disponible. Il est évident qu'il est ridicule de vouloir imposer le mode tout électrique (ou même hybride) si la quantité d'énergie électrique disponible est nulle ou insuffisante pour assurer les besoins désirés. Nous pouvons traduire les choix possibles en fonction des diverses situations au moyen d'inférences floues. Le principal intérêt du flou est de quantifier des notions qui ne le sont pas [6]. Ainsi, nous allons utiliser cette propriété afin de définir des ensembles de couple vitesse-état de charge des batteries à partir desquels nous allons définir quel mode adopter.

A. Fuzzyfication

Nous décomposons alors les variables vitesse du véhicule V_{veh} et état de charge des batteries Q_{dispo} en sous ensembles flous dont le découpage n'est bien sûr pas exhaustif. Pour la variable vitesse du véhicule nous distinguons quatre sous ensembles représentant chacun un environnement : B Bouchon, V Ville, R Route et AR AutoRoute. Nous décomposons la variable 'état de charge' en quatre sous ensembles : N Nul, F Faible, M Moyen, S Super.

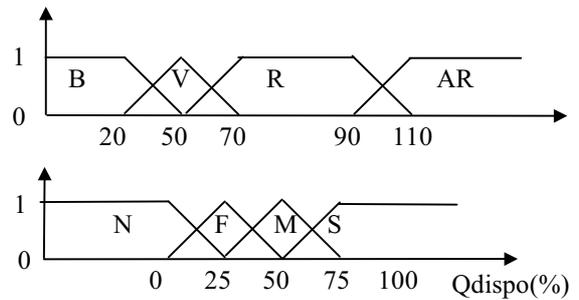


Figure 2. Ensembles flous des variables vitesse véhicule et état de charge des batteries

Chaque ensemble est défini au travers d'une fonction d'appartenance triangulaire ou trapézoïdale, bornée entre 0 et 1, et qui traduit le degré d'appartenance d'une valeur d'une variable d'appartenir à un ensemble concerné. Le chevauchement des fonctions d'appartenance permet d'attribuer à une valeur particulière plusieurs ensembles avec des degrés d'appartenance différents, ceci permet d'éviter une appartenance stricte d'une valeur particulière à un seul ensemble comme en logique binaire. On transforme ainsi une notion quantifiable par une notion d'ensemble qui est par conséquent non quantifiable. Chaque ensemble représente une situation, ce qui nous permet de définir des règles à adopter selon chacune des situations rencontrées.

B. Définition des règles

A partir de ces deux variables, on définit une table de règles qui traduit de manière intuitive l'intérêt de choisir en traction plutôt un mode tout électrique E , plutôt un mode hybride H ou thermique seul T en fonction de l'état de charge des batteries et de l'environnement dans lequel évolue le véhicule.

	N	F	M	S
B	T	H	E	E
V	T	H	H	E
R	T	T	T	H
AR	T	T	T	T

Table 1 : Table des règles floues permettant de déterminer le degré d'intérêt à utiliser la machine électrique

Nous constatons d'après la table 1 que le fonctionnement en mode tout électrique est autorisé en ville, soit pour une vitesse moyenne de 50 km/h. Nous devons nous assurer que la puissance de la machine électrique seule est alors suffisante pour garantir les mêmes performances qu'en mode tout thermique dans cette plage de fonctionnement. Nous avons donc décrit sur la figure 3 une courbe d'isopuissance de 23kW dans le repère vitesse-accelération en tenant compte du modèle mécanique du véhicule étudié. Cette puissance correspond à celle préconisée pour la machine électrique afin que celle-ci permette à elle seule une accélération maximale de 1.04 m/s² (accélération maximale relevée sur cycle EUROPE NF R 11-502) au moins jusqu'à une vitesse de 50 km/h; ainsi les performances du véhicule en mode tout électrique sont similaires aux performances espérées en mode thermique pur jusqu'à 50km/h. Par cette remarque nous attirons l'attention par le fait que la commande de notre système (ici la supervision des modes de fonctionnement) est intimement lié au dimensionnement du matériel piloté.

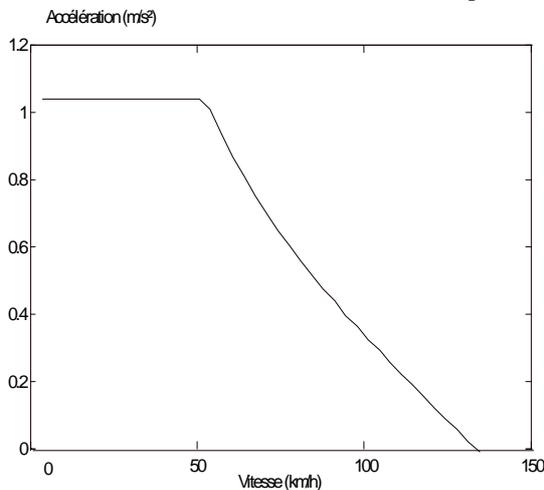


Figure 3. Domaine de performance atteint par le véhicule avec une puissance inférieure à 23 kW

C. Défuzzification

La défuzzification est l'opération inverse de la fuzzyfication; on cherche une valeur exacte à partir des ensembles issus de la table de règles. Ainsi, pour chaque couple de valeurs V_{veh} et Q_{dispo} , nous allons définir à partir de la table 1, quelles sont les règles concernées, puis par le biais d'un calcul barycentrique des règles, nous en déduisons une valeur pour la variable de sortie.

La figure 4 représente le résultat de la défuzzification des règles de la table 1 en fonction des ensembles flous présentés figure 2. Cette fonction représente le degré d'intérêt à utiliser le mode électrique. Plus ce degré est élevé, plus l'intérêt à utiliser le mode tout électrique est grand, et inversement.

Ensuite, afin de sélectionner le mode tout électrique, hybride ou thermique, nous comparons la valeur donnée par cette fonction 'degré d'intérêt' par rapport à des seuils prédéfinis. Il est bien sûr nécessaire de placer un hysteresis au niveau de chaque seuil afin d'éviter des basculements intempestifs d'un mode de fonctionnement à l'autre dus à de faibles variations de vitesses ou de mesures de l'état de charge des batteries.

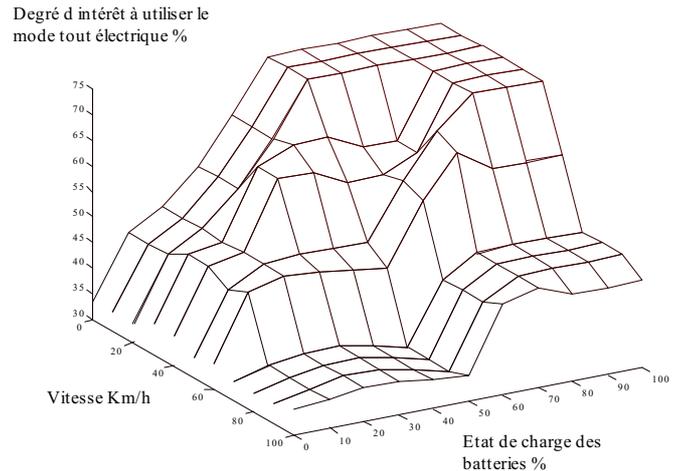


Figure 4. Degré d'intérêt envers l'électrique en fonction de l'état de charge et de l'environnement

Le niveau de basculement du mode tout électrique au mode hybride est évalué selon plusieurs critères. Par exemple, en fonction du couple minimum que peut fournir le moteur thermique, ceci afin d'éviter de se placer dans la configuration hybride et d'être confronté à devoir imposer au moteur thermique un couple inférieur à son couple minimum.

On pourrait également régler le seuil de basculement d'un mode à l'autre, en fonction de variables supplémentaires permettant ainsi de prendre en compte l'analyse des besoins momentanés du conducteur. Ceci permettrait de discriminer les besoins exceptionnels des besoins habituels et permettrait d'anticiper la gestion de l'énergie.

Ce modèle flou (non exhaustif) du 'degré d'intérêt à utiliser le mode électrique' permettra de déterminer quel est le mode de traction le plus judicieux à utiliser dans l'instant présent. Il reste maintenant à définir comment la machine électrique doit être utilisée, c'est à dire si on l'utilise pour tracter ou pour recharger les batteries.

IV SIMULATIONS

Nous avons testé cette gestion floue de l'énergie pour différentes quantités d'énergie stockée. Nous pouvons ainsi vérifier que le contrôleur flou fonctionne selon nos attentes. Les couples électriques et thermiques présentés sur les figures 5 à 7 sont ramenés aux couples disponibles aux roues. Sur chacune des figures, l'énergie électrique et thermique sont présentées. Lorsque l'énergie est notée positivement, nous la considérons comme énergie consommée et négative lorsqu'elle est récupérée.

Les différents essais sont basés sur un cycle élémentaire de vitesse tel que:

- de 0 à 20s on impose une accélération de 1.04m/s²
- de 20 à 26s on impose une accélération nulle
- de 26 à 46s on impose une décélération de -1.04m/s²

Ce cycle nous permet d'atteindre une vitesse maximale qui permet de positionner le système dans les trois modes (électrique, hybride et thermique) selon l'état de charge des batteries. On suppose que la mesure de l'état de charge est réalisée de manière indépendante de la gestion des modes.

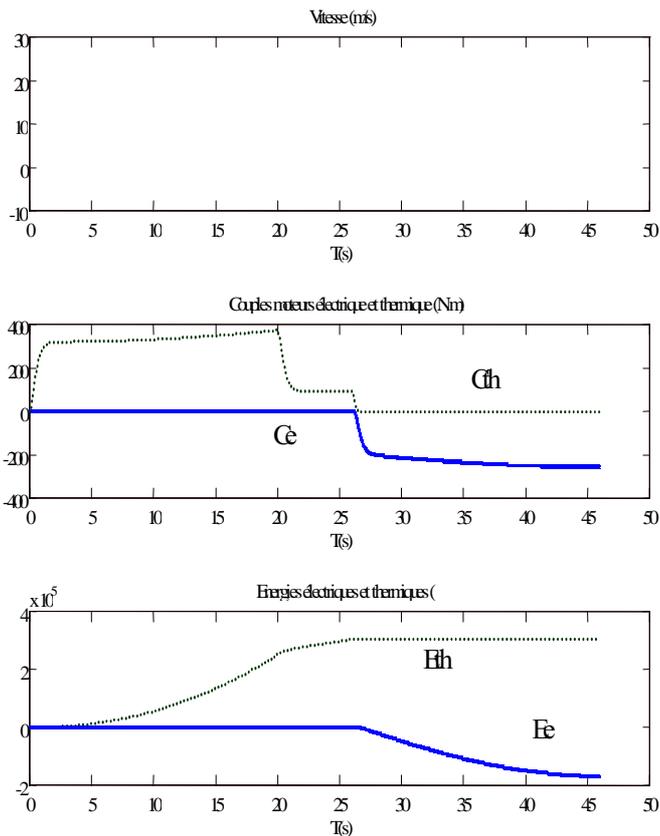


Figure 5. Gestion de l'énergie électrique sur un cycle élémentaire ($Q_{dispo}=0\%$)

Nous renvoyons le lecteur aux travaux suivants en ce qui concerne la mesure de l'état de charge [7].

On supposera invariante la quantité d'énergie électrique stockée durant le cycle. Les figures 5 - 7 représentent l'évolution des couples thermiques et électriques pour un cycle élémentaire de vitesse et pour différentes configurations.

On constate qu'avec une quantité d'énergie disponible trop faible ($Q_{dispo}=0\%$), le superviseur n'autorise pas la machine électrique à fournir un couple moteur, mais qu'il autorise son fonctionnement en mode génératrice pour la récupération énergétique au cours du freinage. Ceci s'explique par le fait que lors du freinage malgré que le mode de traction sélectionné soit le mode thermique, le freinage adopté par le superviseur est dans un premier temps assurer par la machine électrique.

La simulation figure 6 montre par rapport à celle figure 5 qu'en augmentant la quantité d'énergie disponible, le superviseur autorise l'utilisation de la machine électrique en traction en mode hybride uniquement et seulement pour des vitesses faibles. On remarque que dans cette configuration, le freinage ne permet pas de récupérer autant d'énergie qu'il n'a été dépensé. Ceci s'explique par le fait qu'en début de cycle, le mode électrique a été enclenché, le déficit énergétique en fin de cycle correspond donc à cette phase.

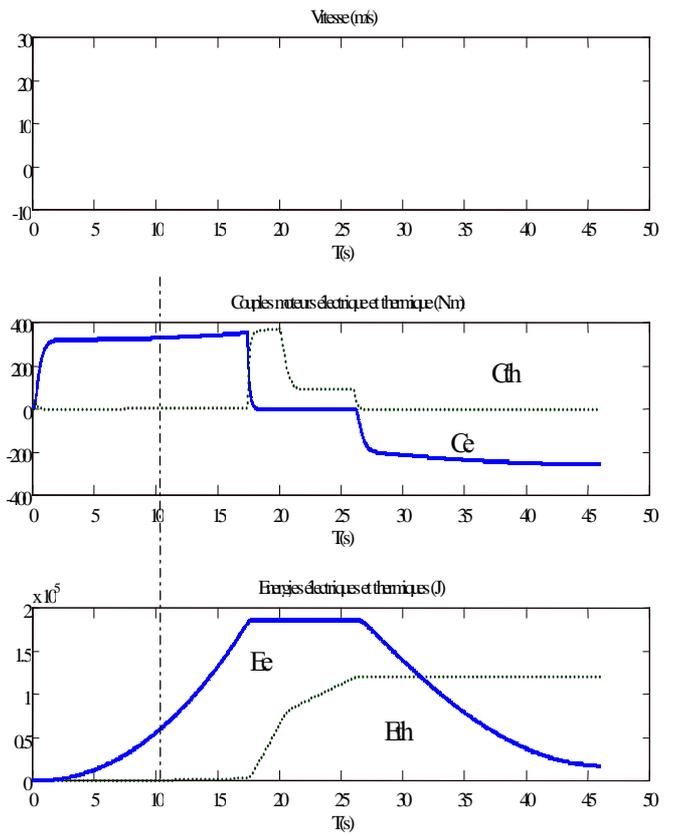


Figure 6. Gestion de l'énergie électrique sur un cycle élémentaire ($Q_{dispo} = 30\%$)

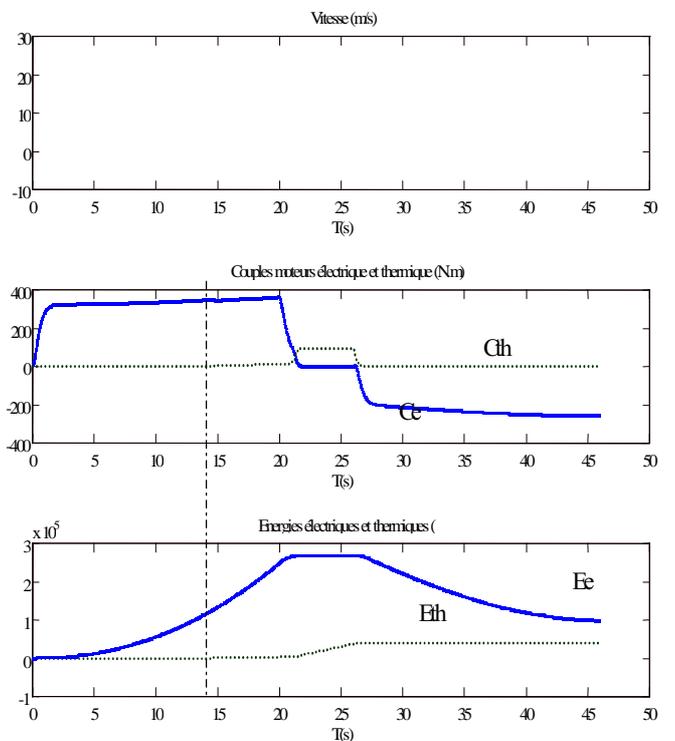


Figure 7. Gestion de l'énergie électrique sur un cycle élémentaire ($Q_{dispo}=70\%$)

La dernière simulation illustre la possibilité qu'offre le superviseur de gérer les modes de fonctionnement en traction tout électrique, hybride et thermique seul ainsi que gérer la recharge. Toutefois on constate un déficit énergétique lié à une utilisation plus longue du mode électrique en début de cycle par rapport à la configuration précédente. La prolongation de l'utilisation du mode électrique engendre bien évidemment une dépense d'énergie électrique plus importante; par conséquent il convient de remarquer à nouveau que le dimensionnement de la configuration hybride est lié à la commande de celle-ci.

V CONCLUSION

L'étude menée dans cet article n'a pas la prétention de donner une seule configuration unique de superviseur d'un véhicule hybride, mais expose une méthode basée sur un raisonnement intuitif mis en équation au travers d'inférences floues. L'intérêt de la logique floue permet ici d'appréhender un problème complexe de par les non linéarités et non stationnarités inhérentes à la structure hybride et à l'utilisation de celle-ci.

Cependant, afin d'éviter les conflits ou les incohérences d'un tel système, liés à la concentration des fonctions de la machine électrique, il apparaît qu'une optimisation de la gestion des ressources est la clé d'une concentration réussie des fonctions réalisées par la machine électrique et, passe inévitablement par un dimensionnement optimal de la structure hybride. Cependant, à cette fin, il est primordial de connaître ou d'évaluer les performances attendues par les automobilistes pour un tel véhicule.

REFERENCES

- [1] 'Hybrid vehicle operating strategies', J. Seiler, D. Schröder, International Electric Vehicle Symposium and Exhibition, septembre 1998, Brussels.
- [2] 'Improvement of testing technology for hybrid electric vehicle motors', H. Suga, Y. Kawabata, International Electric Vehicle Symposium and Exhibition, septembre 1998, Brussels.
- [3] 'New classification on electric-thermal hybrid vehicles', J. Beretta, International Electric Vehicle Symposium and Exhibition, septembre 1998, Brussels.
- [4] 'Design of an integrated starter-generator: Comparison of an induction machine and a wound rotor synchronous machine', J.M. Biedinger, G. Friedrich, J.P. Vilain, Journée SEE, ENS Cachan 4 février 1999.
- [5] 'Conception and control of parallel hybrid car powertrain', G. Paganelli, J-J. Satin, T. M. Guerra, A. Noël, M. Delhom, E. Combes, J. E. Guy, International Electric Vehicle Symposium and Exhibition, septembre 1998, Brussels.
- [6] 'Fuzzy sets', L. A. Zadeh, Information and Control. New York Academic, 1965, vol 8 pp 338-353.
- [7] 'Détermination de l'état de charge d'une batterie plomb-acide en utilisation véhicule électrique', O. CAUMONT, Thèse de Doctorat de l'Université de Lille 1 (USTL), n° 2123, novembre 1997.