

Dimensionnement et contrôle d'un véhicule hybride électrique basé sur une pile à combustible

Alexandre RAVEY, Benjamin BLUNIER, Abdellatif MIRAOUI

Laboratoire Systèmes et Transports (SeT) – EA 3317/UTBM

Email : alexandre.ravey@utbm.fr, benjamin.blunier@utbm.fr, abdellatif.miraoui@utbm.fr

RÉSUMÉ – Ce papier décrit le dimensionnement des sources d'énergie dans un véhicule électrique hybride basé sur une pile à combustible et des batteries. Le contrôle associé à ces sources est un contrôleur de type flou. L'étude montre que l'hybridation du véhicule et son contrôle permet de diminuer drastiquement la puissance nominale de la pile à combustible. L'analyse se base sur un camion poubelle de 13000 kg et prouve qu'une pile à combustible de seulement 20 kW est suffisante pour faire fonctionner le camion. Finalement, une méthode d'optimisation basée sur la programmation dynamique permet de déterminer la gestion d'énergie optimale du véhicule pour un cycle donné et permet de valider le contrôleur flou conçu.

ABSTRACT – This paper describe the sizing of both energy sources of fuel cell hybrid electric vehicle. The control strategy used is based on fuzzy logic. The study proves that hybridization of the vehicle and its control allows downsizing the fuel cell power drastically. The study is based on a 13000 kg garbage truck and shows that a 20 kW fuel cell is enough to run the vehicle. Moreover, an optimal control strategy for a knowing driving cycle is given in order to compare and validate the fuzzy logic controller.

MOTS-CLÉS – dimensionnement – véhicule hybride électrique – pile à combustible – contrôleur flou

1. Introduction

Dans les applications de transport, la pile à combustible type PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cell) semble être appropriée grâce à leurs basses températures de fonctionnement (60-90°C) et leur grande densité de puissance [1] [2]. Un véhicule électrique basé sur un système PEMFC et des batteries n'émet pas d'émission de dioxyde de carbone et permet la récupération d'énergie au freinage. Le contrôle et le dimensionnement de ces deux sources d'énergie est directement lié à la consommation d'hydrogène. Les articles présents dans la littérature présentent le dimensionnement et le contrôle de système hybride pour des cycles de conduite standardisés tels que le cycle ECE ou UEDC [3] [4]. Bien que ces cycles soient efficaces pour déterminer la consommation de dioxyde de carbone dans le cas d'un véhicule thermique [5], ils ne représentent pas toutes les situations de conduite que peut subir un véhicule afin de déterminer la taille de chaque composant lors de l'hybridation d'un véhicule. Cet article se base sur une méthode originale qui propose d'étudier statistiquement une famille de cycle généré basée sur un cycle mesuré d'un camion poubelle lors de son fonctionnement.

Une première partie décrit le dimensionnement des différents composants (pile à combustible et batteries) permettant l'hybridation du véhicule afin de valider une famille de cycles et non pas un cycle unique standardisé. Une deuxième partie décrira le contrôle basé sur un contrôleur de logique flou. Finalement, la gestion optimale de l'énergie dans le véhicule sera obtenue par une méthode d'optimisation, ce qui servira de base de comparaison avec les résultats donnés par le contrôleur flou.

2. Dimensionnement des sources d'énergies

Pour un camion poubelle, les cycles standardisés du type ECE ou EUDC ne peuvent pas convenir afin de réaliser une étude de dimensionnements car le profil décrit lors du fonctionnement du camion est très spécifique, comportant de nombreux arrêts, des phases d'accélération et de décélération de courte durée... Une campagne de mesure a donc été menée sur les camions de poubelles de la ville de Belfort pendant leurs tournées afin de récupérer plusieurs cycles de fonctionnement représentatifs. Ces cycles sont ensuite analysés statistiquement afin de déterminer plusieurs paramètres :

- Distance de convoyage : la distance entre la base et la première maison de ramassage
- Vitesse de convoyage : la vitesse du camion pendant la distance de convoyage
- Vitesse de travail : la vitesse à laquelle roule le camion entre deux ramassages
- Distance de travail : distance entre deux maisons
- Temps de ramassage : temps mis pour ramasser une poubelle (lorsque le camion est à l'arrêt)
- Poids des poubelles
- Pente de la route

Chacun de ses paramètres est analysé statistiquement.

A partir des distributions définies précédemment, il est possible de générer un cycle afin de reformer une tournée du camion poubelle :

1. Le camion poubelle part de la base vide, il roule à une vitesse de convoyage jusqu'à la première maison
2. Le camion ramasse la première poubelle pendant un certain temps de ramassage, le poids du camion augmente en fonction du poids de la poubelle.
3. Si le camion n'est pas plein, il se dirige vers une autre maison et recommence l'étape numéro 2 jusqu'à ce qu'il soit plein.
4. Le camion est plein, il repart à la base.

Pour chaque étape, les paramètres sont pris aléatoirement en fonction des distributions statistiques établies précédemment. Afin d'avoir un échantillon représentatif, 5000 cycles sont générés et le dimensionnement devra être effectué pour respecter l'ensemble de ces cycles.

2.1 Modèle du véhicule

La seconde loi de Newton est utilisée afin de déterminer la puissance nécessaire à chaque instant t pour chaque cycle [6]:

$$F_t(t) = m_v(t) \frac{d}{dt} v(t) + F_a(t) + F_r(t) + F_g(t) + F_d(t) \quad (1)$$

Où F_a est la force d'accélération, F_r le frottement des roues, F_g la force causée par la gravité sur le véhicule lorsque la route n'est pas horizontale (pente), F_d résumant toutes les autres forces résistives qui s'applique sur le véhicule et F_t la force de traction qui dépend de la vitesse et de l'accélération.

$$F_a = \frac{1}{2} \rho A C_x v^2 \quad (2)$$

$$F_r = m_v(t) C_r g \cos(\alpha) \quad (3)$$

$$F_g = m_v(t) g \sin(\alpha) \quad (4)$$

Où $m_v(t)$ est la masse du véhicule en kilogramme ; ici, la masse dépend du temps et α la pente que décrit la route en radian.

Les paramètres du modèle sont : la vitesse, la pente, l'accélération et la masse du véhicule pour chaque temps t de la simulation. Le camion poubelle a les caractéristiques suivantes :

- Masse à vide : 13000 kg ;
- Masse charge pleine : 19000 kg ;
- Surface frontale (A) : 7 m²;
- Coefficient de résistance à l'air (C_x): 0.8;
- Coefficient de frottement des roues (C_r) : 0.015 ;
- Rendement de la transmission : 72 %;

Chaque cycle généré est simulé en utilisant le modèle décrit précédemment et la puissance instantanée $P(t)$ est calculée pour chaque temps t . La puissance moyenne \bar{P} ainsi que l'énergie E peuvent être déterminées :

$$P(t) = \frac{P_v(t)}{\eta_d} \quad (5)$$

$$\bar{P} = \frac{1}{T_{cycle}} \int_0^{T_{cycle}} P(t) dt \quad (6)$$

$$E = \bar{P} * T_{cycle} \quad (7)$$

Où η_d est le coefficient de frottement des roues et T_{cycle} est le temps total pour un cycle incluant les convoyages et la phase de ramassage des ordures. Chaque cycle étant différent, la puissance moyenne le temps total d'un cycle ainsi que d'autres paramètres varient.

2.2 Dimensionnement

Les puissances moyennes \bar{P} de chaque cycle sont ensuite analysées statistiquement : la Figure 1 montre la distribution de la puissance moyenne pour 5000 cycles générés. La puissance moyenne pour chaque cycle n'excède pas 18 kW. Une pile à combustible de 20 kW satisfait donc cent pour cent des cas.

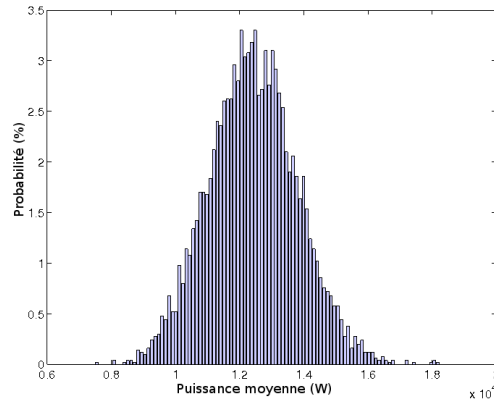


Figure 1 : Distribution statistique de la puissance moyenne pour 5000 cycles générés

Une fois la source d'énergie dimensionnée (pile à combustible), une deuxième simulation est lancée sur les mêmes cycles que précédemment en soustrayant la puissance instantanée à la puissance moyenne calculée précédemment afin de déterminer la capacité des batteries :

$$E_{batteries}(t) = \int P_{instantanée}(t) - \bar{P} dt \quad (8)$$

$$C_{batteries} = E_{batteries\ max} - E_{batteries\ min} \quad (9)$$

Les résultats de capacités pour chaque cycle sont également analysés statistiquement et représentés Figure 2. La capacité maximale n'excède pas 23 kWh. Un pack de batteries de 25 kWh satisfait donc cent pour cent des cas.

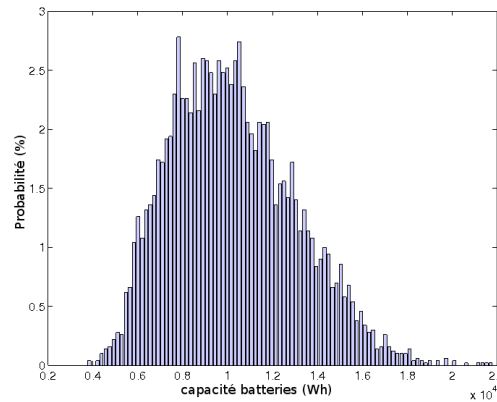


Figure 2 : Distribution statistique de la capacité pour 5000 cycles générés

3. Contrôle du véhicule

Pour réaliser la gestion de l'énergie entre la pile à combustible et les batteries, un contrôleur de logique floue est utilisé : la stratégie de contrôle doit prendre en compte les contraintes suivantes :

- La dynamique de la pile à combustible et les variations de tension sont limitées afin d'améliorer sa durée de vie. Idéalement, la pile devrait fonctionner à puissance constante [7].
- La pile à combustible doit travailler autour de son point de fonctionnement nominal, où le rendement est le maximum.
- L'état de charge de la batterie doit être maintenu dans une certaine plage et l'état de charge final doit être proche de l'état de charge initial (véhicule non rechargeable).
- L'énergie du freinage peut être récupérée [8].

Le contrôleur se base sur l'état de charge de la batterie et détermine le courant de la pile pour qu'elle fournisse la puissance voulue. Le contrôleur définit quatre états dans lesquels la pile à combustible peut se trouver :

- EV : lorsque la pile est éteinte (elle ne fournit pas de puissance) ;
- Bas : lorsque la pile fonctionne en dessous de sa puissance optimale ;
- Optimal : lorsque la pile à combustible fonctionne à son point de fonctionnement optimal ;
- Haut : lorsque la pile fonctionne à son point de fonctionnement maximal.

A chaque zone est associée une plage d'état de charge de la batterie. Plus la batterie se décharge, plus la puissance de la pile sera élevée, et inversement.

La Figure 3 montre l'utilisation du contrôleur flou sur le cycle mesuré d'un camion poubelle de la ville de Belfort :

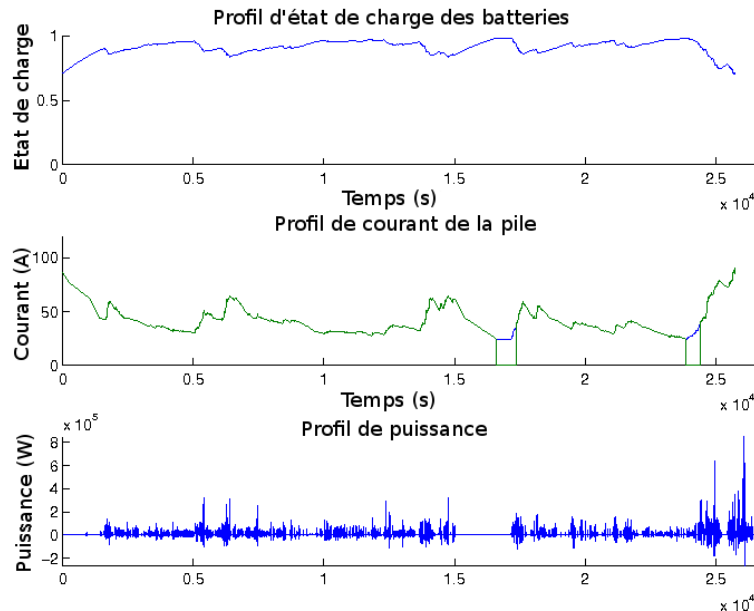


Figure 3 Profil d'état de charge, de courant et de puissance lors de l'utilisation du contrôleur logique flou

L'état de charge des batteries est maintenu dans une région optimale et l'état de charge final est équivalent à l'état de charge initial. Le courant de la pile à combustible varie selon les zones définies précédemment : le contrôleur arrête plusieurs fois la pile en forçant le courant à 0 A.

4. Contrôle optimal du véhicule

Afin de valider le fonctionnement du contrôleur flou. La gestion d'énergie optimale du véhicule est recherchée et servira de base de comparaison. Les contraintes restent les mêmes que pour le contrôleur flou ; à savoir que l'état de charge finale doit être le même que l'état de charge initial, mais cette fois-ci la zone optimale de fonctionnement de la pile à combustible n'est pas définie. L'optimisation porte sur la réduction du dihydrogène consommé par la pile.

Le problème peut donc être formulé de la façon suivante [9]:

$$\min_{P_{FC} \in u_{FC}} \sum_{k=0}^{N-1} \Delta m_{H_2}(P_{FC}, k) T_s \quad (10)$$

$$u_{FC} = P_{FC_{min}} \leq P_{FC} \leq P_{FC_{max}} \quad (11)$$

$$x_{(k+1)} = x(k) + P_b n_b T_s \quad (12)$$

$$x_0 = SoC_{init} \quad (13)$$

$$x_N = SoC_{final} = SoC_{init} \quad (14)$$

$$N = \frac{T_{dc}}{T_s} \quad (15)$$

Où P_{FC} est la puissance de la pile (comprise entre 0kW et 20kW) ; Δm_{H_2} représente la masse de dihydrogène consommée pour un pas k du cycle de conduite ; x représente l'état de charge de la batterie ; N est le nombre de pas du cycle de conduite ; T_s le temps pour un pas et T_{dc} le temps total du cycle.

Pour résoudre ce problème, un algorithme de programmation dynamique a été utilisé [10]. La puissance de la pile P_{FC} est discrétisée de 0W à 20kW par échantillon de 100W et représente la donnée d'entrée de l'algorithme. L'algorithme va minimiser la fonction de coût exprimée par l'équation (10) en choisissant à chaque pas k la puissance P_{FC} tout en respectant la contrainte énoncée par l'équation (14).

La Figure 4 montre les résultats de l'optimisation pour le même cycle de conduite que le contrôleur flou défini précédemment.

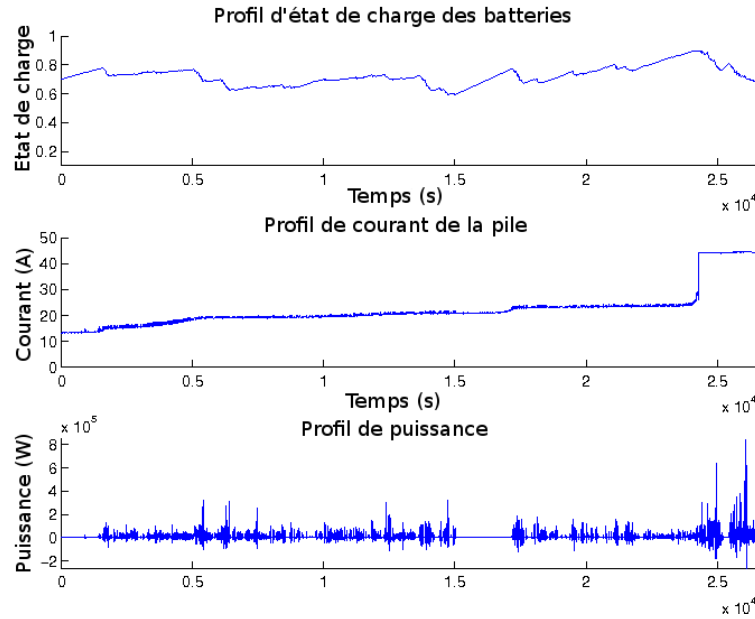


Figure 4 Profil d'état de charge, de courant et de puissance lors de l'utilisation de l'optimisation avec la programmation dynamique

5. Comparaison et résultats

L'optimisation par programmation dynamique nous permet d'obtenir l'état de charge final de la batterie strictement identique à celui initial du fait que le cycle de conduite est «connu» par le contrôleur ; contrairement au contrôleur flou qui est conçu pour répondre à n'importe quel type de cycle de conduite tout en gardant l'état de charge de la batterie dans une zone optimale [11,12]. L'inconvénient de cette stratégie est la consommation de dihydrogène puisque le contrôleur n'est pas idéal pour le cycle. Le Tableau 1 montre la consommation pour un véhicule standard (uniquement basé sur une pile à combustible), un véhicule hybride avec le contrôleur flou et un véhicule hybride avec l'optimisation par programmation dynamique.

Tableau 1. Consommation de dihydrogène pour différentes architecture de véhicule

Type de véhicule	Puissance pile à combustible (kW)	Capacité batterie (kWh)	Consommation h2 (g)	Economie (%)
Véhicule pile à combustible seule	105	0	6831	référence
Véhicule hybride avec contrôleur flou	20	25	3807	44
Véhicule hybride avec optimisation par programmation dynamique	20	25	3651	47

L'hybridation avec la méthode de dimensionnement décrite dans cet article permet d'économiser 44% de la consommation de dihydrogène. De plus, l'utilisation du contrôleur flou permet l'utilisation du camion dans n'importe quelle situation malgré le fait que l'optimisation pour le cycle précis utilisé dans cette étude permet d'économiser près de 47% de dihydrogène.

6. Conclusion

Le dimensionnement et le contrôle d'un véhicule hybride électrique basé sur une pile à combustible de type PEMFC à été présenté. La méthode de dimensionnement utilisée permet d'économiser jusqu'à 44% de dihydrogène pour le cycle étudié. De plus, le contrôleur flou conçu permet de répondre de tout type de besoin du véhicule tout en restant proche de la consommation optimale pour un cycle précis. Les futurs travaux seront axés sur l'optimisation de la gestion de l'énergie pour s'approcher de la consommation minimale pour un cycle donné en utilisant des contrôleurs basés sur l'apprentissage de cycle de conduite et le renforcement.

Références

- [1] B. Blunier and A. Miraoui, *20 Questions sur la pile à combustible*. Technip, 2008.
- [2] B. Blunier and A. Miraoui, *Piles à combustible, Principe, modélisation et applications avec exercices et problèmes corrigés*. Ellipses, 2007.
- [3] J. R. Kenworthy, *Driving cycles, urban from and transport energy*. 1986.
- [4] J. Rimaux, S. Delprat, and T. Guerra, "Control strategy for hybrid vehicles: synthesis and evaluation," in *IEEE Vehicular Technology Conference*, Orlando, 2003.
- [5] M. André, R. Joumard, R. Vidon, P. Tassel, and C. Pruvost, *Influence du cycle de conduite sur les émissions unitaires*. 1999.
- [6] L. Guzzella and A. Sciarretta, *Vehicle Propulsion Systems, Introduction to modeling and optimization*. Springer, 2005.
- [7] J. T. Pukrushpan, A. G. Stefanopoulou, and H. Peng, "Control of Fuel Cell Power Systems : Principle, Modeling Analysis," *Advances in Industrial Control*, 2004.
- [8] M. P. R. Apter, "Regeneration of power in hybrid vehicles," in *IEEE Vehicular Technology Conference*, 2002.
- [9] J. Bernard, S. Delprat, F. Buechi, and T. Guerra, "Global Optimisation in the power management of a fuel cell hybrid vehicle," in *Vehicle Power and Propulsion Conference*, 2006.
- [10] L. Guzzella and O. Sundstorm, "A generic dynamic programming Matlab function," pp. 2082-2088, 2009.
- [11] S. Kermani, S. Delprat, and T. Guerra, "Predictive control for HEV energy management: experimental results," pp. 364-369, 2009.
- [12] S. Delprat and T. Guerra, "Control strategy for hybrid vehicles: synthesis and evaluation," in *IEEE Vehicular Technology Conference*, Orlando, USA, 2003.