

Gestion d'énergie par λ-control d'un véhicule multi-sources

Ali Castaings, Walter Lhomme, Rochdi Trigui, Alain Bouscayrol

▶ **To cite this version:**

Ali Castaings, Walter Lhomme, Rochdi Trigui, Alain Bouscayrol. Gestion d'énergie par λ-control d'un véhicule multi-sources. Symposium de Genie Electrique, Jun 2016, Grenoble, France. hal-01361673

HAL Id: hal-01361673
https://hal.science/hal-01361673

Submitted on 7 Sep 2016

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Gestion d'énergie par λ-control d'un véhicule multi-sources

A.Castaings[1,2,3], W.Lhomme[1,3], R.Trigui[2,3], A. Bouscayrol[1,3]
[1]*Université Lille1, L2EP, France*
[2]*IFSTTAR, Laboratoire Transports et Environnement, 69675 Bron, France*
[3]*MEGEVH, Réseau national sur les VEHs, megevh.univ-lille1.fr, France*

RESUME–Cet article a pour objet la gestion d'énergie d'un système de stockage d'énergie Pile à combustible / batterie / supercondensateurs pour véhicule. L'association d'une batterie et de supercondensateurs avec la pile à combustible est réalisée dans le but de diminuer la consommation d'hydrogènetout en limitant les contraintessur la pile à combustible et la batterie. Il faut de plus maintenir des performances acceptables tout en assurant la sécurité du système (i.e. limitation de la tension des supercondensateurs et de l'état de charge de la batterie). Une stratégie de gestion d'énergie basée sur l'optimisation (*λ-control*) est réalisée. Celle-ci permet de diminuer la consommation d'hydrogènede 6% par rapport au véhicule avec pile seule tout en garantissant la sécurité du système et une utilisation plus conservatrice de la pile.

Mots-clés—gestion d'énergie – batterie – supercondensateur – pile à combustibles – véhicule

1. INTRODUCTION

La concentration mondiale de CO_2 en 2012était 40 fois supérieure à celle correspondant à la moitié du 19^{e} siècle[1]. Il est dès lors primordial de développer des véhicules de moins en moins polluants[2]. La Pile à Combustible (PàC) est un convertisseur d'énergie représentant une alternative intéressante au Moteur à Combustion Interne (MCI).Cependant cette solution comporte aussi certaines limitations. Le rendement de la PàC diminue considérablement à faible charge. Son coût est relativement élevé et sa durée de vie est limitée. De plus, les transferts de puissances sont limités dans les phases transitoires (dynamiques). Par conséquent la PàC n'est jamais utilisée seule dans un véhicule [3].L'association d'une PàC et d'une batterie peut permettre de réduire la consommation d'hydrogène(H_2). Cependant la batterie présente certains inconvénients comme une durée de vie limitée [4]. Les Supercondensateurs (SCs) ont une forte densité de puissance et une durée de vie cent fois supérieure à celle des batteries. Cependant les SCs ont une densité énergétique particulièrement faible. Par conséquent,un Système de Stockage d'Energie (SSE) composé de l'association d'une source d'énergie principale (e.g. PàC et H_2) avec une source d'énergie secondaire comportant une association batterie-SCs peut s'avérer intéressant pour pallier les différentes limitations citées précédemment. Cependant la gestion d'énergie d'un tel système s'avère être relativement complexe.

Plusieurs travaux sur la gestion d'énergie de SSEsPàC-batterie-SCs ont été réalisés. Thounthong et. al.[5] ont proposé une stratégie de gestion d'énergie à base de règles simples (filtrage). D'autres travaux ont proposé des stratégies de gestion d'énergie basées sur la logique floue [6], [7]. Ces stratégies présentent l'avantage d'être implantables en temps réel mais étant basées sur des règles expertes, elles ne permettent pas d'atteindre des performances optimales. Les stratégies à base d'optimisation permettent de minimiser des critères de performances traduisant les objectifs souhaités. Des stratégies de ce type ont été définies pour desSSEsPàC-batterie-SCs. Yuet al. ont proposé une stratégie adaptable en temps réel [8]. Les limitations du SoC de la batterie et de la tension des SCs ont été gérées par une stratégie à base de règles. Garcia et al. ont proposé une stratégie à base d'optimisation mais sans prendre en compte les limitations de la tension des SCs [9]. L'objectif de cet article est de présenter une stratégie à base d'optimisation (*λ-control*) appliquée sur le véhicule PàC-batterie-SCs. La stratégie développée permet de minimiser la consommation de H_2 tout en assurant l'efficacité énergétique et la sécurité du système global (i.e. limitations de l'état de charge de la batterie et de la tension des SCs). Les simulations sont effectuées sur un cycle de conduite ECE 15. Laseconde partie traite de la modélisation et de la commande du système. Latroisième partieprésente la définition de la stratégie et ladernière partie est dédiée aux résultats de simulations.

2. MODELISATION ET ORGANISATION DE LA COMMANDE

2.1. Architecture et modélisation du système

L'architecture du système est présentée Figure 1. Chaque source est interfacée par un convertisseur DC-DC. Cela permet, entre autres, de découpler la tension du bus DC de celle des sources [10]. Par ailleurs, d'autres architectures ont également été utilisées dans la littérature [6], [11], [12].

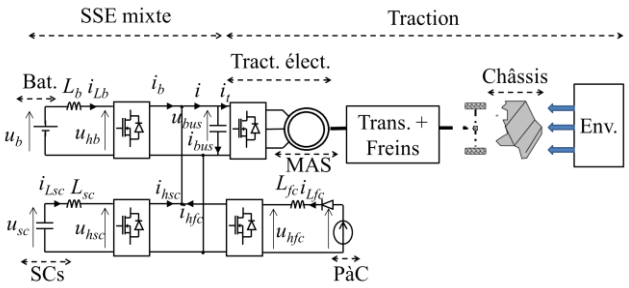


Figure 1: Architecture du système

Différents modèles sont utilisés pour les éléments du système :

Pile à Combustible

La modélisation de la PàC est réalisée à l'aide d'une courbe de polarisation [13]donnée par le constructeur pour un stack de la PàC(Figure 2). Cette courbe ne permet pas d'identifier les différentes dynamiques liées à la tension du stack, mais elle prend en compte les principales pertes dans celui-ci (i.e. chutes

de tension). Par ailleurs, une constante de temps est incorporée pour prendre en compte. C'est un modèle quasi-statique.

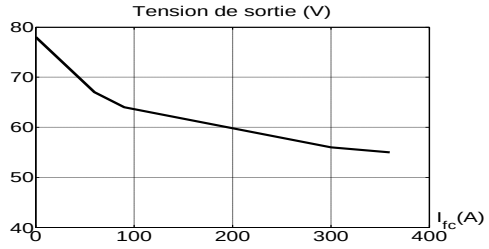


Figure 2 : courbe de polarisation

Batterie

La batterie utilisée est de type $LiFePO_4$. Son modèle doit prendre en compte les surtensions *ohmiques* et les surtensions de *diffusion*. En effet, ces phénomènes sont prépondérants dans les batteries de type $LiFePO_4$[14]. Le modèle retenu prend en compte ces deux phénomènes (Figure 3.a), avec *OCV* (Open Circuit Voltage) la tension à vide de la batterie etr_b la résistance série (surtensions ohmiques) de la batterie. L'impédance du CPE (Constant Phase Element, surtensions de diffusion) est définie par la relation (1) avec *Q* constant. Ce modèle a été caractérisé expérimentalement et validé avec une erreur inférieure à 4 % sur la réponse en tension.

$$Z_{CPE} = \frac{1}{Q(j\omega)^k} \quad k \in [0,1] \qquad (1)$$

Supercondensateurs

Le banc de SCs est modélisé par l'intermédiaire d'un modèle de Zubietaet Bonertà deux branches R-C[15](Figure 3.b),avecr_{sc}la résistance série du banc, C_{sc}la capacité principale et C_{i1} le coefficient d'évolution de la capacité variable avec la tension aux bornes des condensateurs du modèle. Ce modèle permet de prendre en compte les dynamiques rapides des SCs.

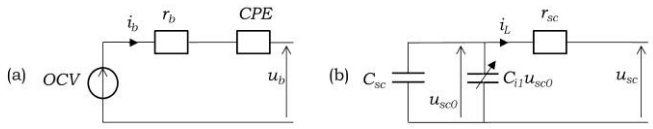


Figure 3: (a) modèle de la batterie, (b) modèle des SCs

Bobines de lissage et convertisseurs

Les bobines de lissage sont modélisées par un circuit *R-L*série, en considérant qu'il n'y a pas de saturation du circuit magnétique (avec r_{Li}et $L_i$respectivement l'inductance et la résistance série de la bobine de lissage).A noter que l'indice « i » correspondant à chaque sources (« fc » pour la PàC, « sc » pour les SCs, « b » pour la batterie).

$$L_i \frac{d}{dt} i_{Li} = u_i - u_{hi} - r_{Li} i_{Li} \qquad (2)$$

En ce qui concerne la modélisation des convertisseurs DC-DC, en considérant le temps de réponse du courant i_{Li} beaucoup plus grand que la période de commutation des interrupteurs du convertisseur DC-DC correspondant, un modèle moyen est utilisé[16]. Cela s'exprime par la relation (3)avec η_i le rendement du convertisseur et$m_i$la fonction de modulation du convertisseur (entre 0 et 1).

$$\begin{cases} u_{hi} = m_i u_i \\ i_{hi} = m_i \eta_i^{\gamma_i} i_{Li} \end{cases} m_i \in [0;1], \begin{cases} \gamma_i = -1, u_i i_{Li} < 0 \\ \gamma_i = 1, u_i i_{Li} \geq 0 \end{cases} \qquad (3)$$

Bus DC

Le modèle du bus DC est donné par la relation (4), avec C_{bus}la capacité du bus DC.

$$\begin{cases} C_{bus} \frac{d}{dt} u_{bus} = i_{bus} \\ i_{bus} = i - i_t \end{cases} \qquad (4)$$

Connexion en parallèle

Le nœud de courant entre la branchedela PàC, celle de la batterie, celledes SCs et le bus DC est exprimé par l'intermédiaire des lois de Kirchhoff :

$$\begin{cases} \text{i} = i_{hb} + i_{hsc} + i_{hfc} \\ u_{bus} \text{ commun} \end{cases} \qquad (5)$$

2.2. Organisation de la commande par la Représentation Energétique Macroscopique (REM)

La REM met en évidence les propriétés énergétiques des composants du système dans le but de développer des structures de commande (i.e. variables à imposer, nombre de correcteurs, mesures à effectuer, organisation des éléments de la commande)[17], [18]. La structure de commande du système a ainsi été développée par l'intermédiaire de la REM (éléments en orange et en vert)Figure 4. Elle est constituée de quatre sources (éléments en vert), la PàC (source de tension), la batterie (source de tension), le banc de SCs (source de tension) et le système de traction (source de courant).

L'approche de la REM consiste à organiser la commande du système en deux niveaux. La commande dite « locale » permet de commander chaque élément du système de façon systémique (i.e. en prenant en compte les interactions entre chaque élément). La commande globale (appelée également stratégie) coordonne les sous-systèmes afin d'atteindre un objectif global. La structure de commande correspond à la commande dite « locale » du système. Elle a pour but de définir les valeurs appropriées des fonctions de modulation m_i des convertisseurs DC-DC, afin d'assurer l'objectif du SSE mixte vis-à-vis du véhicule, la fourniture de la puissance du système de propulsion (asservissement de la tension du bus DC).La stratégie de gestion d'énergie (bleu foncé) vise à utiliser au mieux les sources d'énergie qui composent le SSE mixte. La commande et la REM de SSEs mixtes ont déjà été proposées par le passé [19], [20].

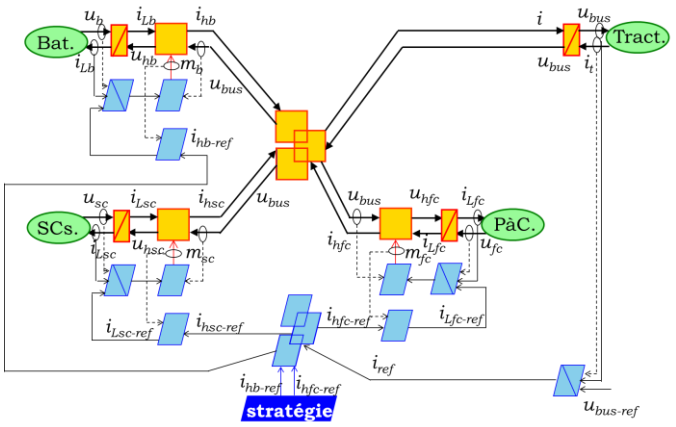


Figure 4: REM et structure de commande du système

3. GESTION DE L'ENERGIE BASEE SUR L'OPTIMISATION

La stratégie de gestion d'énergie est basée sur l'optimisation. Sa réalisation se fait en 2 étapes : la formulation du problème de commande optimale puis sa résolution.

3.1. Formulation du problème

Cette étape consiste entre autre à définir les critères de performances à minimiser et les variables du problème de commande optimale ainsi que les contraintes associées.

Critère de performances - le critère de performance *J*à minimiser est la consommation de H_2 du véhicule ainsi que la valeur efficace du courant de la batterie (durée de vie). Cela revient à minimiser le critère défini par la relation(6) avec *Qm*le débit massique de H_2et A_b un coefficient de pondération.

$$J = \int_{t_0}^{t_f} (Q_m + A_b i_{Lb}^2) dt \qquad (6)$$

Variables et contraintes associées

Trois types de variables interviennent dans le problème de commande optimale. Il y a les variables de commande, les variables d'état ainsi que les variables exogènes.

Les variables de commande correspondent aux sorties de la stratégie. Par conséquent, la REM impose deux variables de commande qui sont les courants de référence $i_{hb\text{-}ref}$et $i_{hfc\text{-}ref}$. Des limitations, contraintes de type inégalité, sont imposées à ces variables de commande. Au niveau de la PàC, les limitations du courant $i_{hfc\text{-}ref}$permettent d'assurer une utilisation en générateur non-réversible de la PàC et de limiter sa décharge (courant maximal $i_{hfc\text{-}M}$). Cela consiste également à imposer un courant strictement positif à la PàC (décharge en convention générateur). En ce qui concerne la batterie, les limitations du courant $i_{hb\text{-}ref}$(maximale $i_{hb\text{-}M}$ et minimale $i_{hfc\text{-}m}$) permettent de prendre en compte le courant maximal admissible en décharge et en charge de la batterie. Ces limitations sont exprimées par les relations (7) et (8). Par ailleurs, les variations maximales du courant de la PàC sont prises en compte en imposant des limitations sur la dérivée du courant $i_{hfc\text{-}ref}$par rapport au temps. Cela s'exprime par (9)avec $di_{hfc\text{-}M}$le gradient de courant maximal admissible donné par le constructeur.

$$0 \leq i_{hfc-ref} \leq i_{hfcM} \qquad (7)$$

$$i_{hb-m} \leq i_{hb-ref} \leq i_{hb-M} \qquad (8)$$

$$\left| \frac{d}{dt} i_{hfc-ref} \right| \leq di_{hfc-M} \qquad (9)$$

Les variables d'état correspondent à l'énergie aux bornes des sources qui seront contraintes par la stratégie (état énergétique imposé). Cela va correspondre aux sources dites « secondaires ». Les sources « secondaires » correspondent aux sources qui seront utilisée de manière ponctuelle dans le véhicule, contrairement aux sources « principales » sans lesquelles le véhicule ne pourra pas effectuer de trajet complet. Dans le cas du véhicule étudié, la PàC est une source principale tandis que les SCs et la batterie sont des sources secondaires. Les variables d'état pouvant être contraintes par la stratégie de gestion d'énergie sont l'énergie $E_b$aux bornes de la batterie et l'énergie E_{sc} aux bornes du banc de SCs. Cela revient à contraindre l'évolution de l'état de charge SoC_b de la batterie et la tension u_{sc} aux bornes des SCs. Des limitations sont imposées dans un premier temps à ces variables. Cela consiste à imposer des bornes maximales ($SoC_{b\text{-}M}$et $u_{sc\text{-}M}$) et minimales ($SoC_{b\text{-}m}$ et $u_{sc\text{-}m}$) au SoC de la batterie et à la tension des SCs (relations (10)et (11)). Une contrainte de « charge sustaining » est imposée sur chaque variable d'état dans un second temps. Elle s'exprime par (12)et (13) avec t_0 et t_f respectivement l'instant initial et l'instant final de l'horizon du cycle considéré

$$SoC_{b-m} \leq SoC_b(t) \leq SoC_{b-M} \qquad (10)$$

$$u_{sc-m} \leq u_{SC}(t) \leq u_{sc-M} \qquad (11)$$

$$SoC_b(t_f) = SoC_b(t_0) \qquad (12)$$

$$u_{SC}(t_f) = u_{SC}(t_0) \qquad (13)$$

Description mathématique du problème

La description mathématique du problème consiste d'abord à définir un modèle réduit du système considéré afin de faciliter l'étape de résolution. Dans cette étude, le modèle réduit est déduit par simplification de l'ensemble REM et structure de commande du SSE mixte [21]. La REM étant basée sur le principe d'action-réaction entre les différents éléments, cela permet de respecter les interactions entre les différents sous-systèmes. Premièrement, les ensembles convertisseurs DC-DC et bobines de lissage avec leurs commandes associées sont réduits. Les relations correspondantes sont traduites par (14)et (15).

$$i_{hi-ref} = i_{hi} \qquad (14)$$

$$u_i i_{Li} = u_i i_{hi} \eta_{gi}{}^{\gamma_{gi}} \text{ avec} \begin{cases} \gamma_{gi} = -1, i_{Li} > 0 \\ \gamma_{gi} = 1, i_{Li} \leq 0 \end{cases} \qquad (15)$$

Avec l'hypothèse que les courants de références des convertisseurs DC-DCsont bien contrôlés, l'ensemble bus DC et correcteur associé peut-être également réduit(16)et (17)avec η_{bus}le rendement du bus DC (pertes dues à la résistance interne). D'après le modèle dynamique utilisé pour le bus DC, il n'y a pas de résistance interne. Par conséquent η_{bus}vaut 1.

$$\begin{cases} u_{bus} = u_{bus-ref} \\ u_{bus}\, i = u_{bus}\, i_p \eta_{bus}{}^{\gamma_{bus}} \end{cases} \text{avec} \begin{cases} \gamma_{bus} = -1, i_p > 0 \\ \gamma_{bus} = 1, i_p \leq 0 \end{cases} \quad (16)$$

$$\begin{cases} i = i_{-ref} \\ i_{-ref} = i_p \eta_{bus}{}^{\gamma_{bus}} \end{cases} \quad (17)$$

Le principe de la réduction de modèle par l'intermédiaire de la REM est illustré Figure 6.

La seconde étape de la description mathématique consiste à exprimer le critère de performances en fonction des variables de commande. Le débit massique $Q_m$de H_2 est défini en fonction de la puissance nette P_{fc}en sortie de la PàC par l'intermédiaire de courbes du constructeur. Une interpolation du second ordre de la courbe liant Q_m et P_{fc}est ensuite réalisée afin de traduire le critère de performance de manière analytiqueFigure 5. Cela s'exprime par (18) avec a, b et c les coefficients déterminés par l'interpolation de la courbe liant Q_m et P_{fc}. A noter que le critère de performances$J$ est exprimé en fonction des variables de commande $i_{hb\text{-}ref}$et $i_{hfc\text{-}ref}$ par la relation (19).

$$\begin{cases} Q_m = a P_{fc}{}^2 + b P_{fc} + c \\ P_{fc} = \dfrac{u_{bus}\, i_{hfc-ref}}{\eta_{gfc}} \end{cases} \quad (18)$$

$$J = \int_{t_0}^{t_f} \left(a \left(\frac{u_{bus}\, i_{hfc-ref}}{\eta_{gfc}} \right)^2 + b \frac{u_{bus}\, i_{hfc-ref}}{\eta_{gfc}} + c + A_b \left(\frac{u_{bus}\, i_{hb-ref}\, \eta_{gb}^{\gamma_{gb}}}{u_b} \right)^2 \right) dt \quad (19)$$

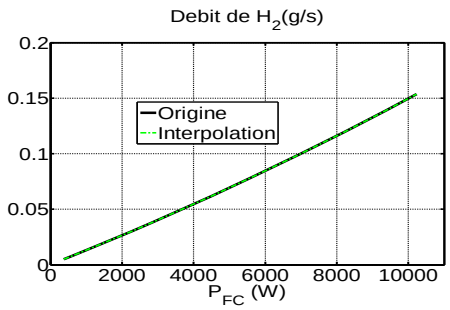


Figure 5 : débit de H_2 en fonction de la puissance nette de la PàC

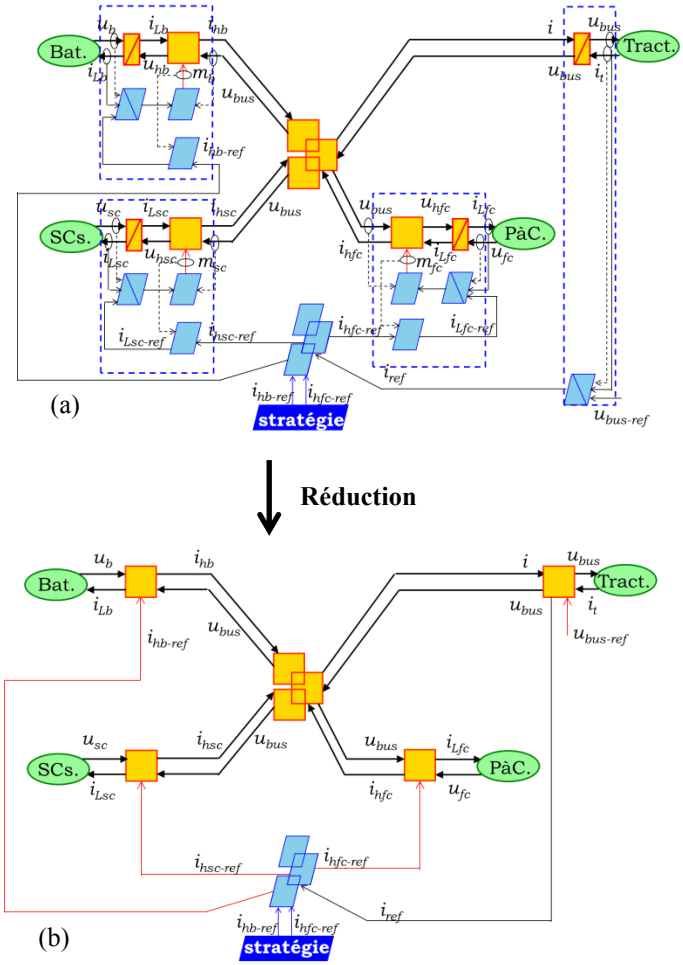


Figure 6: REM et structure de commande, (a) complet, (b) réduit

3.2. *Résolution du problème*

La résolution du problème de commande optimale consiste à définir les valeurs des variables de commande à imposer au système afin de minimiser le critère de performance. La méthode de résolution utilisée est le *λ-control*. La méthode du *λ-control* est basée sur le principe du *Calcul des Variations*[22].

Cela consiste à minimiser la fonction Hamiltonien H définie par (20). Les paramètres clés sont les multiplicateurs de Lagrange $\lambda_{b\text{-}ref}$et $\lambda_{sc\text{-}ref}$qui permettent de prendre en compte les contraintes (12), (13) associées aux variables d'états.Afin de trouver plus facilement les valeurs initiales des multiplicateurs de Lagrange, le Hamiltonien est traduit sous forme de somme pondérée de puissanceH_p(21).C'est le principe de la méthode de l'Equivalent ConsumptionMinimizationStrategy (ECMS)[23], [24].

$$H = a \left(\frac{u_{bus}\, i_{hfc-ref}}{\eta_{gfc}} \right)^2 + b \frac{u_{bus}\, i_{hfc-ref}}{\eta_{gfc}} + c + A_b \left(\frac{u_{bus}\, i_{hb-ref}\, \eta_{gb}^{\gamma_{gb}}}{u_b} \right)^2 + \lambda_{sc-ref} \frac{d}{dt} E_{sc} + \lambda_{b-ref} \frac{d}{dt} E_b \quad (20)$$

$$H_p = PCI\left[a\left(\frac{u_{bus}\, i_{hfc-ref}}{\eta_{gfc}}\right)^2 + b\frac{u_{bus}\, i_{hfc-ref}}{\eta_{gfc}} + c\right] + B_b r_b\left(\frac{u_{bus}\, i_{hb-ref}\, \eta_{gb}^{\gamma_{gb}}}{u_b}\right)^2 + s_{sc-ref}\frac{d}{dt}E_{sc} + s_{b-ref}\frac{d}{dt}E_b \quad (21)$$

Avec

$$\begin{cases} B_b = \dfrac{A_b PCI}{R_b} \\ s_{sc-ref} = \lambda_{sc-ref} PCI \\ s_{b-ref} = \lambda_{b-ref} PCI \end{cases} \quad (22)$$

Des conditions nécessaires d'optimalité donnant les variables de commande optimales à imposer s'expriment par :

$$\begin{cases} \dfrac{d}{dt}E_{sc}(t) = -s_{sc-ref} \\ \dfrac{d}{dt}E_b(t) = -s_{b-ref} \end{cases} \quad (23)$$

$$\begin{cases} \dfrac{d}{dt}s_{sc-ref} = -\dfrac{\partial H_p}{\partial E_{sc}} \\ \dfrac{d}{dt}s_{b-ref} = -\dfrac{\partial H_p}{\partial E_b} \end{cases} \quad (24)$$

$$\begin{cases} \dfrac{\partial H_p}{\partial i^*_{hfc-ref}} = 0 \\ \dfrac{\partial H_p}{\partial i^*_{hb-ref}} = 0 \end{cases} \quad (25)$$

D'après les conditions définies par (25), les expressions optimales des variables de commande sont données par (26) et (27).

$$i^*_{hfc-ref} = -\frac{\eta_{gfc}^2 \eta_{gsc}^{\gamma_{gsc}} s_{sc-ref} + \eta_{gfc}\, bPCI}{2aPCIu_{bus}} \quad (26)$$

$$i^*_{hb-ref} = \frac{\left(\eta_{gb}^{\gamma_{gb}} s_{b-ref} - \eta_{gsc}^{\gamma_{gsc}} s_{sc-ref}\right) u_b^2}{2B_b \eta_{gb}^{2\gamma_{gb}} r_b u_{bus}} \quad (27)$$

Les limitations (10) et (11) ne sont pas prises en compte dans le processus de résolution. D'autres facteurs d'équivalence devraient être introduits afin de prendre en compte celles-ci. Or, les valeurs de ces facteurs d'équivalence ne seraient pas évidentes à déterminer. D'autre part, ces valeurs ne seraient valables uniquement pour le cycle de conduite considéré (connu *a priori*). Les limitations sont relatives entre autres à la sécurité du système. Il est par conséquent nécessaire de trouver une solution appropriée pour respecter ces limitations dans toutes les conditions de conduite possibles. Le *λ-control* consiste àmodifier les valeurs des facteurs d'équivalence afin de respecter les limitations (10) et (11), par l'intermédiaire d'une boucle d'asservissement [25], [26]. Cela est illustré Figure 7 avec *x*la variable d'état contrainte et s_0 la valeur initiale du facteur d'équivalence associé.

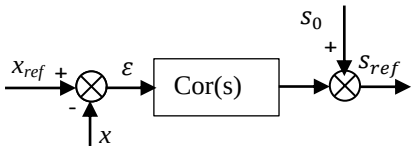


Figure 7 : principe du *λ-control*

4. RESULTATS DE SIMULATIONS

Paramètres

Le véhicule étudié comporte une masse totale de 640 kg.La machine électrique a une puissance nominale de 15 kW. Les simulations sont effectuées sur la phase basse vitesse d'un cycle ECE 15 (Figure 8). Les valeurs initiales des facteurs d'équivalence sont déterminées par itération par l'intermédiaire de simulations effectuées sur le cycle ECE 15 afin de respecter les contraintes de « charge sustaining » (relations (12) et (13)). Les résultats développés par la suite sont relatifs à une valeur de coefficient B_b égale à 20. Cette valeur représente un bon compromis entre la réduction de la consommation de H_2 et la minimisation de la valeur efficace du courant de la batterie. Les valeurs initiales des facteurs d'équivalence ont été déterminées égales à -1,6251et -1,6547pour $s_{b\text{-}ref}$et $s_{sc\text{-}ref}$respectivement.

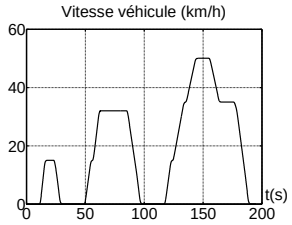


Figure 8 : cycle ECE 15

Résultats

Le véhicule avec PàC seule ainsi que le véhicule PàC-batterie-SCs sont comparés en prenant en compte la masse supplémentaire dans la configuration PàC-batterie-SCs. L'association PàC-batterie-SCs associée à la stratégie de gestion d'énergie, permettent de limiter les fluctuations du courant de la PàC (Figure 9.a). Cela permet de réduire la consommation de H_2 de 6 % (Figure 9.b). Aussi, les limitations de la tension des SCs ($u_{sc\text{-}M}$et $u_{sc\text{-}m}$) sont assurées (Figure 10.b). A noter que la batterie est très peu sollicitée. Ce qui donne des variations de très faible son état de charge (Figure 10.a).

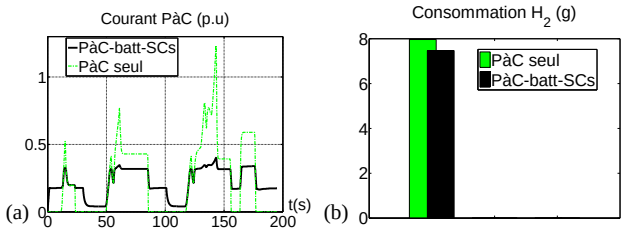


Figure 9 : (a), courant PàC (b) consommation H_2

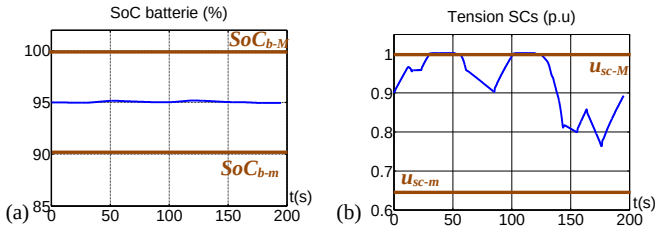


Figure 10: (a) SoC de la batterie, (b) tension des SCs

5. CONCLUSIONS

Une stratégie de gestion d'énergieà base d'optimisation a été développée pour un véhiculePile à Combustible, batterie, supercondensateurs. Celle-ci a permis de réduire la consommation d'hydrogène tout en minimisant la valeur efficace du courant de la batterie. De plus la sécurité du système a été assurée par la limitation de la tension des supercondensateurs et de l'état de charge de la batterie.

REFERENCES

[1] IEA, « CO2 Emissions from Fuel Combustion, Highlights », 2013.

[2] C. C. Chan, Y. S. Wong, A. Bouscayrol, et K. Chen, « Powering Sustainable Mobility: Roadmaps of Electric, Hybrid, and Fuel Cell Vehicles [Point of View] », *Proc. IEEE*, vol. 97, n° 4, p. 603‑607, avr. 2009.

[3] J. Bernard, S. Delprat, F. N. Buchi, et T.-M. Guerra, « Fuel-Cell Hybrid Powertrain: Toward Minimization of Hydrogen Consumption », *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 58, n° 7, p. 3168‑3176, sept. 2009.

[4] N. Omar, M. A. Monem, Y. Firouz, J. Salminen, J. Smekens, O. Hegazy, H. Gaulous, G. Mulder, P. Van den Bossche, T. Coosemans, et J. Van Mierlo, « Lithium iron phosphate based battery – Assessment of the aging parameters and development of cycle life model », *Appl. Energy*, vol. 113, p. 1575‑1585, janv. 2014.

[5] P. Thounthong, S. Raël, et B. Davat, « Energy management of fuel cell/battery/supercapacitor hybrid power source for vehicle applications », *J. Power Sources*, vol. 193, n° 1, p. 376‑385, août 2009.

[6] J. Solano-Martinez, D. Hissel, M.-C.Pera, et M. Amiet, « Practical Control Structure and Energy Management of a Testbed Hybrid Electric Vehicle », *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 60, n° 9, p. 4139‑4152, nov. 2011.

[7] Q. Li, W. Chen, Z. Liu, M. Li, et L. Ma, « Development of energy management system based on a power sharing strategy for a fuel cell-battery-supercapacitor hybrid tramway », *J. Power Sources*, vol. 279, p. 267‑280, avr. 2015.

[8] Z. Yu, D. Zinger, et A. Bose, « An innovative optimal power allocation strategy for fuel cell, battery and supercapacitor hybrid electric vehicle », *J. Power Sources*, vol. 196, n° 4, p. 2351‑2359, févr. 2011.

[9] P. García, J. P. Torreglosa, L. M. Fernández, et F. Jurado, « Viability study of a FC-battery-SC tramway controlled by equivalent consumption minimization strategy », *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 37, n° 11, p. 9368‑9382, juin 2012.

[10] Z. Amjadiet S. S. Williamson, « Power-Electronics-Based Solutions for Plug-in Hybrid Electric Vehicle Energy Storage and Management Systems », *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 57, n° 2, p. 608‑616, févr. 2010.

[11] Q. Li, W. Chen, Y. Li, S. Liu, et J. Huang, « Energy management strategy for fuel cell/battery/ultracapacitor hybrid vehicle based on fuzzy logic », *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 43, n° 1, p. 514‑525, déc. 2012.

[12] M. Zandi, A. Payman, J.-P. Martin, S. Pierfederici, B. Davat, et F. Meibody-Tabar, « Energy Management of a Fuel Cell/Supercapacitor/Battery Power Source for Electric Vehicular Applications », *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 60, n° 2, p. 433‑443, févr. 2011.

[13] D. Chrenko, « Energetic Macroscopic Representation Modeling and Control of a Low Temperature Fuel Cell System Fed by Hydrocarbons », thèse de doctorat, Université de Franche-Comté, 2008.

[14] C. Hellwig, S. Sörgel, et W. G. Bessler, « A Multi-Scale Electrochemical and Thermal Model of a LiFePO4 Battery », *ECS Trans.*, vol. 35, n° 32, p. 215‑228, nov. 2011.

[15] L. Zubietaet R. Bonert, « Characterization of double-layer capacitors for power electronics applications », *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 36, n° 1, p. 199‑205, janv. 2000.

[16] J.-P. Hautier et J.-P. Caron, *Convertisseurs statiques: méthodologie causale de modélisation et de commande*. Editions TECHNIP, 1999.

[17] A. Bouscayrol, X. Guillaud, J.-P. Hautier, et P. Delarue, « Macromodélisation pour les conversions électromécaniques : application à la commande des machines électriques », *Rev. Int. GénieElectrique*, vol. 3, n° 2, p. 257‑282, juin 2000.

[18] A. Bouscayrol, J.-P.Hautier, et B. Lemaire-Semail, « Graphic Formalisms for the Control of Multi-Physical Energetic Systems », in *Systemic Design Methodologies for Electrical Energy Systems: Analysis, Synthesis and Management*, vol. tome 1, John Wiley & Sons, 2012.

[19] A.-L. Allègre, A. Bouscayrol, et R. Trigui, « Flexible real-time control of a hybrid energy storage system for electric vehicles », *IET Electr. Syst. Transp.*, vol. 3, n° 3, p. 79‑85, 2013.

[20] A. Castaings, W. Lhomme, R. Trigui, et A. Bouscayrol, « Practical control schemes of a battery/supercapacitor system for electric vehicle », *IET Electr. Syst. Transp.*, vol. 6, n° 1, p. 20‑26, nov. 2015.

[21] A. Castaings, W. Lhomme, R. Trigui, et A. Bouscayrol, « Comparison of energy management strategies of a battery/supercapacitors system for electric vehicle under real-time constraints », *Appl. Energy*, vol. 163, p. 190‑200, févr. 2016.

[22] D. E. Kirk, *Optimal Control Theory: An Introduction*. Dover Publications, 2004.

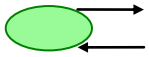
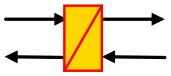
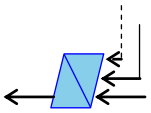
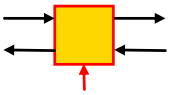
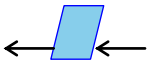
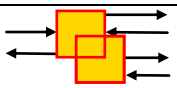
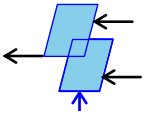
[23] G. Paganelli, G. Ercole, A. Brahma, Y. Guezennec, et G. Rizzoni, « General supervisory control policy for the energy optimization of charge-sustaining hybrid electric vehicles », *JSAE Rev.*, vol. 22, n° 4, p. 511‑518, oct. 2001.

[24] A. Sciarrettaet L. Guzzella, « Control of hybrid electric vehicles », *IEEE Control Syst.*, vol. 27, n° 2, p. 60‑70, avr. 2007.

[25] J. T. B. A. Kessels, M. W. T. Koot, P. P. J. van den Bosch, et D. B. Kok, « Online Energy Management for Hybrid Electric Vehicles », *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 57, n° 6, p. 3428‑3440, nov. 2008.

[26] S. Kermani, « Gestion énergétique des véhicules hybrides : de la simulation à la commande temps réel », thèse de doctorat, Université de Valencienne et du Hainaut-Canbresis, 2009.

ANNEXE: ELEMENTS CONSTITUTIFS DE LA REPRESENTATION ENERGETIQUE MACROSCOPIQUE

	Source d'énergie		Accumulation d'énergie		Inversion avec asservissement
			Conversion mono-domaine		Inversion directe
	Capteur Obligation Optionnel		Couplage mono-domaine		Inversion d'un élément de couplage par pondération