



Gestion Optimale de l'Energie d'un Système Multi-sources : Application au véhicule électrique

Mohamed Nacereddine Sid^{#1}, Hamza Alloui^{*1}, Khoudir Marouani^{#1} Mohamed Becherif^{#2}

¹Laboratoire Commande des Machines, Ecole Militaire Polytechnique (EMP), Bordj El Bahri, Alger, Algérie.

sidmednacer@hotmail.fr, alloui_hamza@yahoo.fr, marouani_khoudir@yahoo.fr

² UTBM, FCLab FR CNRS 3539, Femto-ST UMR CNRS 6174, 90010 Belfort, France

mohamed.becherif@utbm.fr

Résumé—Ce papier a pour objectif l'analyse et l'étude de la gestion des flux énergétiques dans un système hybride composé de deux sources : une Pile à Combustible de type PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cell) et un module de Supercondensateurs.

Les stratégies de gestion de l'énergie sont des algorithmes qui déterminent à chaque instant le partage de la demande en puissance entre les deux sources, où la Pile à Combustible présente la source principale et le module de Supercondensateurs joue le rôle d'une source auxiliaire.

Dans cet article une technique de gestion optimisée de l'énergie dans ce système hybride est présentée, dont l'état de charge du pack des supercondensateurs et la consommation de l'hydrogène de la pile à combustible font l'objectif principal d'optimisation. La modélisation et le dimensionnement de chacune des sources et du système hybride sont développés. Les résultats de simulation obtenus sous l'environnement ADVISOR de Matlab indiquent qu'il est possible de réaliser une gestion de l'énergie près du cas optimal sans connaître le cycle de conduite à priori. En plus de la minimisation de la consommation de l'hydrogène, cette stratégie réduit le dimensionnement de la pile à combustible et donc les coûts de production.

Mots clefs — Pile à Combustible, Supercondensateurs, Gestion de l'énergie, Optimisation, Véhicule hybride.

I. INTRODUCTION

Avec la croissance des problèmes environnementaux et le manque prévu des sources d'énergie pour les prochaines décennies il est important de trouver d'autres formes d'énergie plus efficaces et propres, les réservations globales de pétrole sont seulement suffisantes pendant environ 40 ans [1]. Cependant, l'économie globale augmente rapidement avec une augmentation subséquente de la consommation pétrolière, l'émission de CO₂ s'est développée énormément dans cette période. Ainsi, des réservations de pétrole donc seront probablement épuisées dans une période de temps beaucoup plus courte. Compte tenu de cette situation l'utilisation de l'hydrogène comme un des vecteurs énergétique idéal pour remplacer à long terme les énergies fossiles [1].

L'hydrogène est l'élément le plus abondant de notre univers, c'est un carburant non polluant et non toxique dont la combustion ne rejette que de l'eau. Il est léger et énergétique, sa densité d'énergie (120 MJ/kg) est élevée comparée à celle de l'essence (45 MJ/kg). Sa densité d'énergie volumique est en revanche plus faible, en effet un litre d'essence équivaut, sur le plan énergétique, à 4,6 litres d'hydrogène comprimé à 700 bars [2].

Le futur du transport soutenable est étroitement attaché au développement des véhicules électriques (VEs). En effet, les VE à hydrogène sont beaucoup silencieux, décapant et efficaces que des véhicules basés sur le moteur à combustion interne [3]. L'utilisation de l'hydrogène dans un véhicule roulant pose cependant des problèmes: la nécessité d'un système de stockage, les convertisseurs d'électronique de puissance et le choix du moteur de traction et en plus comment gérer la commande des flux énergétique dans ce système (fig. 1).

Cet article traite un système multi-source ayant la PàC comme source principale et un pack de supercondensateurs (SCs) comme source secondaire, dans lequel la PàC assure la demande de l'énergie permanente tandis que les SCs assurent l'accélération rapide et capturent l'énergie lors du freinage. Dans cet article nous avons développé des stratégies de répartition des puissances entre les deux sources électriques, afin de minimiser la consommation de l'hydrogène et réduire le dimensionnement de la source principale.

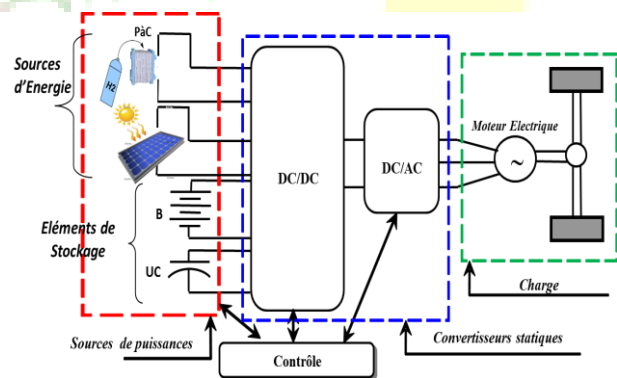


Fig.1 Système d'un véhicule électrique multi-sources.

II. MODELISATION DU SYSTEME HYBRIDE

A. Le modèle dynamique

La structure étudiée (Fig. 2) est constituée d'une PEMFC comme source principale d'énergie connectée à un convertisseur DC/DC élévateur et de SC comme source auxiliaire de puissance connectée à un convertisseur DC/DC buck-boost bidirectionnel en courant, un bus continu et une machine de traction.

V_{pac}, I_{pac}, L_{pac} et T_{pac} sont respectivement la tension, le courant, l'inductance et le transistor de la PàC, et V_{sc}, i_{sc}, L_{sc} et T_{sc} sont respectivement la tension, le courant, l'inductance et le transistor du



pack de SCs, V_{dc} , i_{dc} , C_{dc} la tension, le courant et la capacité du bus continu, R_L , L_L la résistance et l'inductance de la charge.

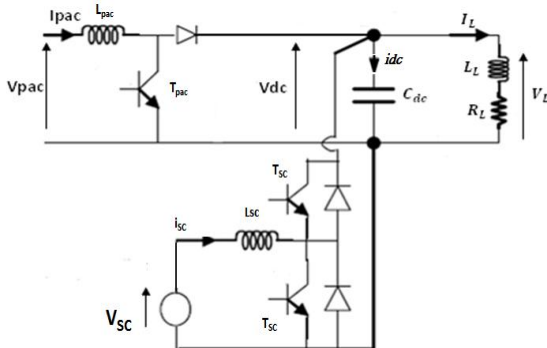


Fig.2 Le modèle électrique de la structure étudiée.

B. Le modèle statique de PEMFC

De nombreux travaux comme par exemple [8], [9] et [10] proposent un modèle statique décrivant la courbe de polarisation de la pile PEM (Figure 3) comme la somme de quatre termes : la tension théorique à vide E , la surtension d'activation V_{act} (ou chute d'activation : région 1), la surtension ohmique V_{ohm} (ou chute ohmique : région 2) et la surtension de concentration V_{conc} (ou chute de concentration : région 3).

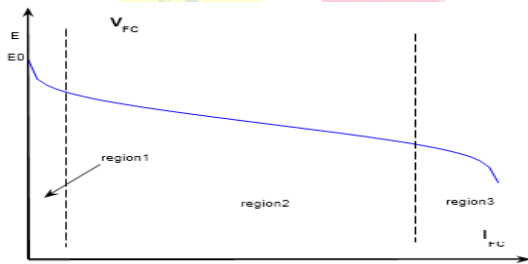


Fig.3 Caractéristique statique d'une PàC [7].

$$V_{FC} = E - A \cdot \log\left(\frac{i_{FC} + i_n}{i_0}\right) - R_m(i_{FC} + i_n) + B \log\left(1 - \frac{i_{FC} + i_n}{i_{Lim}}\right) \quad (1)$$

Ainsi $V_{FC} = f(i_{FC})$, où [11] :

E : la tension réversible sans pertes de la PàC.

E_0 : la tension mesurée à circuit ouvert.

i_{FC} : le courant de sortie de la PàC.

i_0 : le courant d'échange.

A : la pente de la droite de Tafel.

i_{Lim} : le courant limite.

B : une constante de transfert de masse.

i_n : le courant interne.

R_m : la résistance de la membrane et de contact.

C. Le modèle de supercondensateur

Le modèle des SCs se compose d'un condensateur idéal connecté en série avec une résistance (Fig. 4). Les valeurs de la capacité du condensateur C_{sc} et de la résistance R_{sc} interne sont supposées constantes. La tension à vide V_c du SC est l'image de son état de charge (SOC : state of charge). Des modèles avec plusieurs « branches RC » et des valeurs de capacité fonction de la tension du SC sont aussi proposés dans la littérature [7].

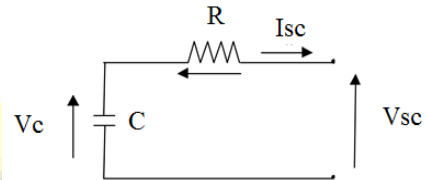


Fig.4 Modèle électrique d'un élément de SC.

Définissons la convention utilisée pour l'analyse de ce circuit. La puissance est définie par :

$$P_{SC} = V_{SC} \times I_{SC} \quad (2)$$

La convention utilisée est :

$P_{sc} > 0$ en traction (décharge du pack de SC).

$P_{sc} < 0$ en freinage (charge du pack es SC).

La tension aux bornes d'un SC est donnée par :

$$V_{SC} = V_c - R_{SC} I_{SC} \quad (3)$$

Comme la batterie, le condensateur se comporte comme un intégrateur de courant. La tension à vide SC V_c est calculée de la manière suivante :

$$V_c = V_c(0) - \frac{1}{C} \int_0^t I_{SC}(u) du \quad (4)$$

L'énergie contenue dans le SC E_{SC} est en fonction de sa tension à vide V_c . De ce fait, l'énergie maximale E_{SCmax} est obtenue pour la tension à vide maximale

V_{Cmax} :

$$E_{SC}(V_c) = \frac{1}{2} \cdot C \cdot V_c^2 \quad (5)$$

Par définition, l'état de charge SOC correspond au rapport entre l'énergie contenue dans le SC et l'énergie maximale admissible :

$$SOC = \frac{E_{SC}(t)}{E_{SCmax}} \quad (6)$$

III. STRATEGIES DE GESTION OPTIMISEE DES FLUX ENERGETIQUES

Le problème de la gestion de l'énergie dans un véhicule hybride, consiste à trouver la meilleure répartition de la puissance entre les différentes sources. Plusieurs critères de performance peuvent intervenir dans le choix de cette répartition ; le critère le plus utilisé est la consommation de combustible (carburant pour les moteurs thermiques, hydrogène pour les PàCs,...). Ce critère est appelé aussi la fonction coût [1], autre critère de performance est faire réduire le dimensionnement de la source principale (la PàC), dans un premier lieu on va introduire les objectives des gestions de l'énergie proposées dans ce papier.



Le rendement et la consommation d'hydrogène d'une PEMFC (Fig. 5) indique clairement qu'il y a une zone où le rendement est maximale et la consommation est très réduite, l'objectif principal de la stratégie de gestion de l'énergie (SGE) est de réduire au minimum une fonction de coût J , une expression mathématique qui représente la consommation d'hydrogène durant le temps [12] :

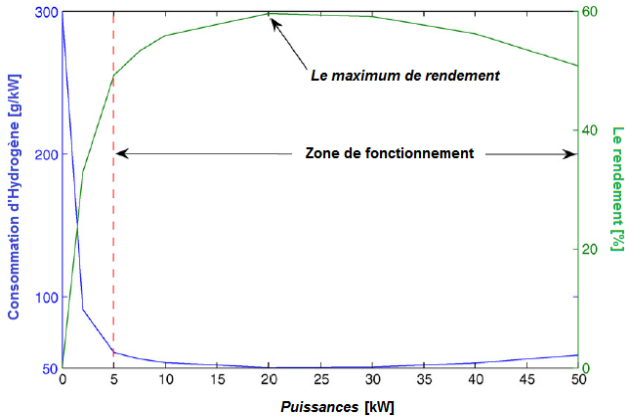


Fig.5 Rendement et consommation d'Hydrogène d'une PEMFC en fonction de puissance [12].

La SGE doit déterminer la valeur optimale de la puissance de système PàC $P_{pac}(t)$, et de la puissance de système de stockage d'énergie $P_{sc}(t)$ afin de réduire au minimum la fonction de coût $J(x)$.

$$J(x) = \sum_{k=0}^{N_c} F(X(k))\Delta T. \quad (7)$$

Où $N_c = t_c / \Delta T$ est la durée de cycle de conduite, supposons que la constante du temps $\Delta T = 1s$, et $F(X(k))$ est la consommation d'hydrogène peut être exprimée en fonction de la puissance nette livrée par la pile P_{pac} [13] :

$$Cons_{H_2}(t) = \frac{N_{cell} I_{pac} M_{H_2}}{2F}. \quad (8)$$

Le dimensionnement des éléments constitutifs du système hybride impose des limites maximales et minimales sur les puissances échangées et les niveaux d'énergies pouvant être atteints. Ces limites forment les contraintes d'inégalité exprimées comme suit :

$$P_{pac,min} \leq P_{pac}(k) \leq P_{pac,max} \quad (9)$$

$$\Delta P_{pac,taux\ de\ chute} \leq \frac{dP_{pac}(k)}{dt} \leq \Delta P_{pac,taux\ d'\acute{e}lévation} \quad (10)$$

$$SoC_{min} \leq SoC(k) \leq SoC_{max} \quad (11)$$

$P_{pac,max}$ et $P_{pac,min}$ sont respectivement les puissances minimale et maximale fournies par la PàC et SoC_{max} et SoC_{min} les états de charge maximal et minimal pouvant être atteints par l'élément de stockage.

Le temps de réponse de la PàC est grand par rapport à d'autres sources d'énergies, par conséquent, elle ne supportera pas certaines pentes de puissance de charge (accélération). Pour remédier à ce problème, la pile fournira une puissance dont la pente maximale ne dépassera pas une valeur à déterminée. (À l'élévation $\Delta P_{taux\ d'\acute{e}lévation}$ et à la chute $\Delta P_{taux\ de\ chute}$ de la pente de puissance).

La première stratégie basée sur la caractéristique rendement-consommation-puissance qui est un des caractéristiques les plus appropriées d'une PàC (fig. 5), un diagramme qui montre comment le rendement change avec la puissance délivrée. On suppose que les points de fonctionnement de la PàC sont commandés, ainsi les paramètres externes tels que la température ambiante n'ont aucune influence dans le rendement. La première stratégie proposée dans ce travail est une stratégie quasi-suivie de la charge où la PàC est actionnée dans une zone avantageuse où le rendement est en haut. Dans ce cas-ci, la zone de fonctionnement est contrainte entre une limite inférieure ($P_{pac,inf}$) et une limite supérieure ($P_{pac,sup}$). La limite supérieure est imposée par la puissance maximum que la pile peut fournir (c.-à-d., $P_{pac,sup} = P_{pac,max}$), tandis que la limite inférieure est déterminée selon la courbe de rendement. Comme mentionné avant, le rendement d'une PàC à la basse puissance est dû très pauvre à la puissance parasite. Grâce à la limite inférieure, la SGE évite cette défavorable zone [12].

Cette stratégie accorde la priorité que la PàC doit toujours délivrée la puissance au bus continu comme elle présente la source d'énergie primaire et son convertisseur a le meilleur rendement donc moins de pertes par rapport au convertisseur de puissance du SSE, et le SSE lui-même.

Dans la fig. 6, il est représenté comment déterminer les points d'opération de la PàC. Cependant, la transition entre les points de fonctionnement est limitée par les taux maximum, ainsi, finalement :

$$P_{pac}(k) = \begin{cases} P_{pac}(k-1) + \Delta P_{pac,taux\ d'\acute{e}lévation} \Delta T, & \text{si } \Delta P_{pac}(k) \leq \Delta P_{pac,taux\ d'\acute{e}lévation} \\ P_{pac}(k-1) + \Delta P_{pac,taux\ de\ chute} \Delta T, & \text{si } \Delta P_{pac}(k) \geq \Delta P_{pac,taux\ de\ chute} \end{cases} \quad (12)$$

$$\text{Où } \Delta P_{pac}(k) = P_{pac}(k) - P_{pac}(k-1) \quad (13)$$

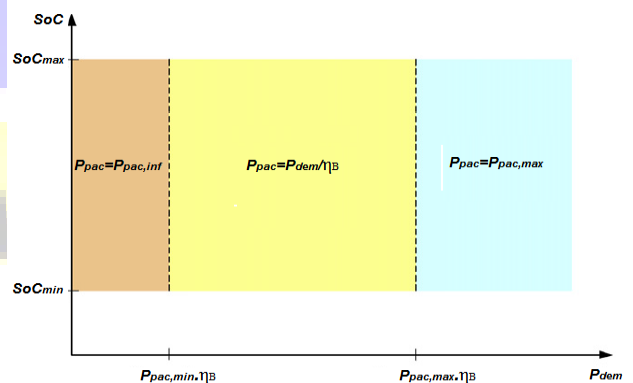


Fig.6 Points d'opération de la PàC pour la stratégie basée la caractéristique du rendement.



La deuxième stratégie basée sur la caractéristique du rendement de la PàC est une stratégie qui actionne cette dernière de préférence dans ses points de rendement maximum afin d'améliorer la consommation d'hydrogène, bien que le point final de fonctionnement de la PàC soit déterminé ait basé sur la demande réelle de puissance et l'état de charge du SSE.

La fig. 7 indique les points de fonctionnement de la PàC en fonction du $SoC(k)$ et de la puissance $P_{dem}(k)$ de charge. De la même manière que dans la stratégie précédente, la transition entre les points de fonctionnement est réalisée selon les contraintes dynamiques de la pile (le taux maximum de puissance de chute et le taux maximum de puissance comme indiqué précédemment dans (12).

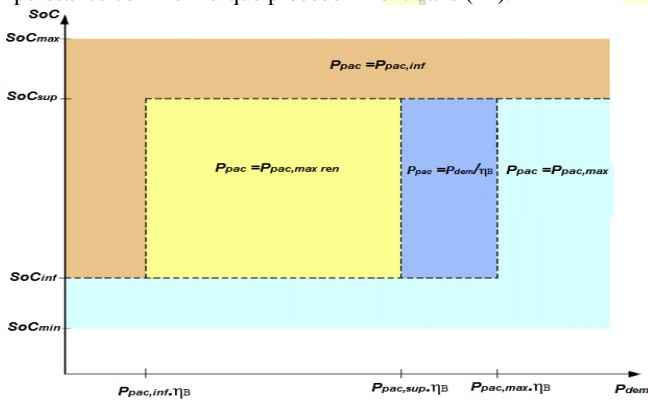


Fig.7 Points d'opération de la PàC pour la stratégie améliorée basée sur la caractéristique du rendement.

Dans la troisième stratégie (basée sur la programmation non linéaire) un problème d'optimisation avec des contraintes linéaires est résolu à chaque prélèvement d'une période ΔT où une fonction de coût non-linéaire, qui représente la consommation d'hydrogène, est réduite au minimum.

Le problème peut être mis dans la forme :

$$\min_x J(x) \text{ Objectif pour que } H(x) = 0 \text{ et } G(x) \leq 0 \quad (14)$$

Où le vecteur X représente :

$$X = \begin{bmatrix} P_{pac}(k) \\ P_{sc}(k) \end{bmatrix} \quad (15)$$

La fonction coût $J(x)$ représente la consommation d'hydrogène dans la PàC :

$$J(x) = F(P_{pac}(k)) \quad (16)$$

Où :

$$F(P_{pac}(k)) = ConsH_2(P_{pac}(k))P_{pac}(k)\Delta T \quad (17)$$

Le $P_{pac}(k)$ est limité en sa valeur maximum et minimum, et dans le taux maximum d'élévation et le taux de chute, ainsi :

$$P_{pac,max}(k) = \max \left[P_{pac,sup}; P(k-1) + \Delta P_{pac,taux\ de\ chute} \right] \quad (18)$$

$$P_{pac,min}(k) = \min \left[P_{pac,inf}; P(k-1) + \Delta P_{pac,taux\ d'\acute{e}lévation} \right] \quad (19)$$

D' autre part, $P_{sc}(k)$ est limité à sa valeur maximum ou minimum selon le $SoC(k)$ réel. Le $SoC(k)$ est limité :

$$SoC_{min} \leq SoC(k) \leq SoC_{max} \quad (20)$$

Ainsi :

$$k_{sc}(SoC(k) - SoC_{max}) \leq P_{sc} \leq k_{sc}(SoC(k) - SoC_{min})$$

$$\text{Avec : } k_{sc} = \frac{k \cdot E_{SC,max}}{R_{sc} \cdot C_{sc}}$$

Où R_{sc} et C_{sc} sont la résistance interne et la capacité des SCs,

$E_{SC,max}$ L'énergie maximale contenue dans le SSE et k est une constante dépend de leur technologie particulière.

IV. RESULTATS DE SIMULATION

Les stratégies énoncées ont été examinées par simulation utilisant ADVISOR (Advanced Vehicle Simulator) : est un logiciel de simulation de véhicules conventionnels ou hybrides sur des cycles normalisés il a été développé par le NREL : National Renewable Energy Laboratory, ADVISOR a été distribué gratuitement via le site Internet du NREL, entre 1998 et 2003. ADVISOR utilise l'environnement MATLAB et le contrôle de Simulink pour les simulations) [15] [16] avec un modèle d'un système hybride consistant dans le véhicule décrit dans le tableau 1, muni d'une PàC et un SSE avec les principaux paramètres énumérés dans le tableau 2. Le pack du SCs est dimensionné afin d'accomplir la condition suivante d'accélération : le véhicule (avec des une masse totale de 1400 Kg) doit être capable d'accélérer de 0 à 96,5 km/h dans 10 s avec une PàC de 15-kW.

D'autre part, les paramètres de la puissance sont ajustés afin de maximiser l'économie et l'exécution de carburant selon la stratégie et le cycle particuliers. Leurs valeurs sont montrées dans le tableau 3.

Tableau 1 : Paramètres du véhicule.

Paramètre	Symbol	Valeur
Poids de véhicule	M	1400 Kg
Surface frontale	S	2 m ²
Coefficient aérodynamique	Cx	0.335
Coefficient de frottement de la roue	Cr	0.009
Masse volumique de l'aire	ρ	1.2 Kg.m ⁻³
Constante de gravité	g	9.8 m.s ⁻²

Tableau 2 : Composants du système hybride.

Paramètre	Symbol	Valeur
le nombre des SCs	N_{sup}	130
La masse de module de SC	M_{mod}	0.408 Kg
Énergie spécifique du SCs	$E_{SC,spec}$	6 Wh Kg ⁻¹
Puissance spécifique du SCs	$P_{SC,spec}$	2.5 kW Kg ⁻¹
Énergie maximale du SCs	$E_{SC,max}$	318.2 Wh
Puissance maximale du SCs	$P_{SC,max}$	132.6 kW
Etat de charge maximal	SoC_{max}	1
Etat de charge minimal	SoC_{min}	0.2
Etat de charge supérieur	SoC_{sup}	0.9



Le 3^{ème} Séminaire International sur les Energies Nouvelles et Renouvelables

The 3rd International Seminar on New and Renewable Energies

Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables,
Ghardaïa - Algérie 13 et 14 Octobre 2014



Etat de charge inférieur	SoC_{inf}	0.3
Puissance maximale du PàC	$P_{pac,max}$	15 kW
Puissance de taux d'élévation	$\Delta P_{taux\ d'élévation}$	600 W s ⁻¹
Puissance de taux de chute	$\Delta P_{taux\ de\ chute}$	-900 W s ⁻¹
Le rendement maximal	$\eta_{pac,max}$	0.6
Puissance de PàC en max de rendement	$P_{pac,max\ de\ rendement}$	6 kW
Le rendement du Boost	η_B	0.95
Le rendement du Buck-Boost.	$\eta_{B/B}$	0.95
Le rendement du SSE.	η_{SC}	0.99

Tableau 3 : Paramètres de puissances utilisés

La stratégie de gestion de l'énergie	$P_{pac,sup}$ (kW)	$P_{pac,inf}$ (kW)
Basée sur la caractéristique du rendement MEPT	1	15
MEPT Améliorée	1	12
Basée sur la programmation non-linéaire	2	15

Les stratégies ont été examinées sur quatre cycles de conduite standard :

The New European Driving Cycle (NEDC), the Urban Dynamometer Driving Schedule (UDDS), the Federal Test Procedure (FTP), the Highway Fuel Economy Test (HWFET).

Pour illustrer le comportement des stratégies proposées, les résultats de simulation correspondant au cycle NEDC sont montrés : les puissances demandées, du PàC et du SSE, et l'évolution du SoC(t) dans le SSE sont au fig. 8 pour la stratégie basée sur la caractéristique du rendement MEPT, aux figs. 10 et 11 pour la stratégie améliorée et aux figs. 12 et 13 pour la stratégie basée sur la programmation non-linéaire.

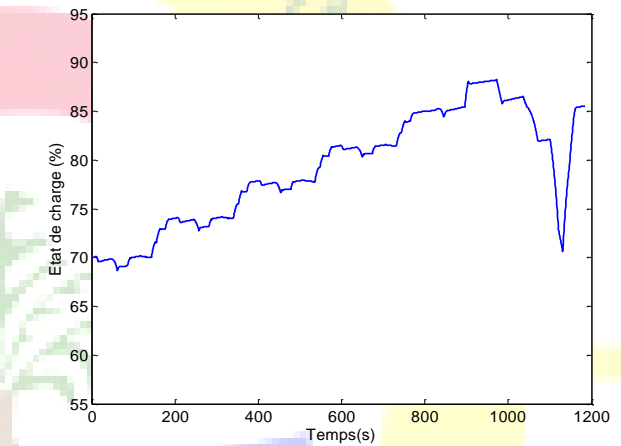
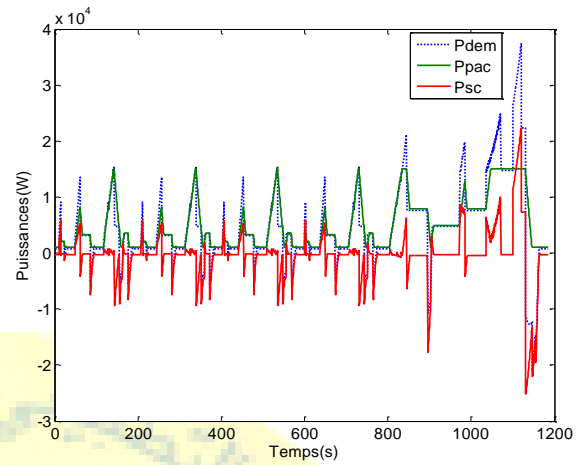


Fig.8 La vitesse de véhicule avec la référence, Les puissances échangées et l'évolution de l'état de charge pour la stratégie basée sur la caractéristique du rendement.

Effectuons un zoom du temps de 960 à 1180 s pour la clarté.

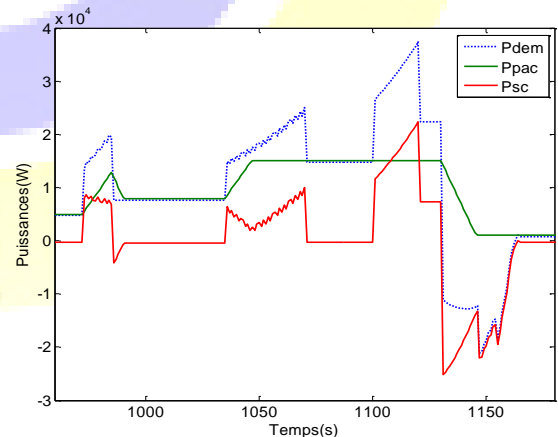
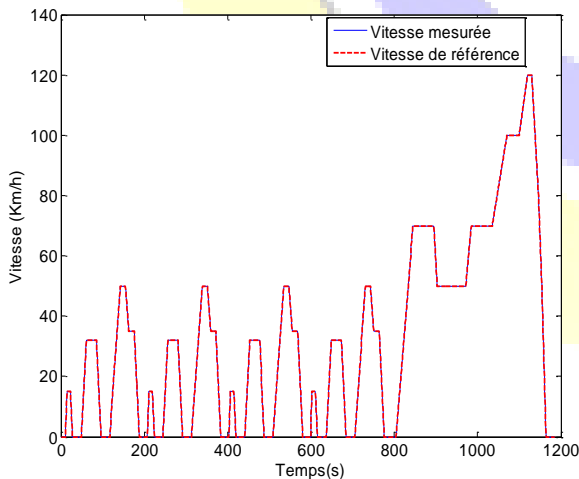


Fig.9 Les puissances échangées (960 à 1180s) pour la stratégie basée sur la caractéristique du rendement.



Le 3^{ème} Séminaire International sur les Energies Nouvelles et Renouvelables

The 3rd International Seminar on New and Renewable Energies

Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables,
Ghardaïa - Algérie 13 et 14 Octobre 2014

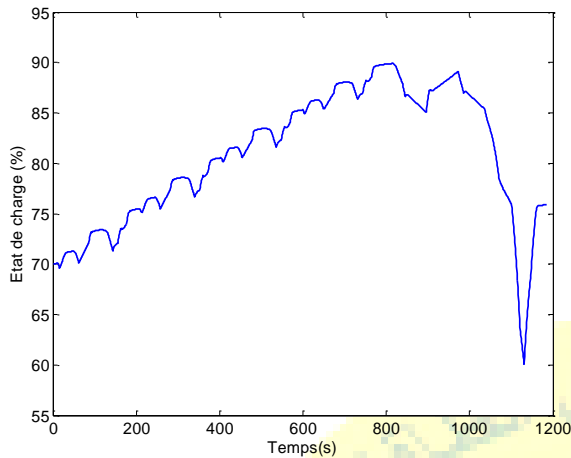


Fig.10 L'évolution de l'état de charge pour la stratégie améliorée basée sur la caractéristique du rendement.

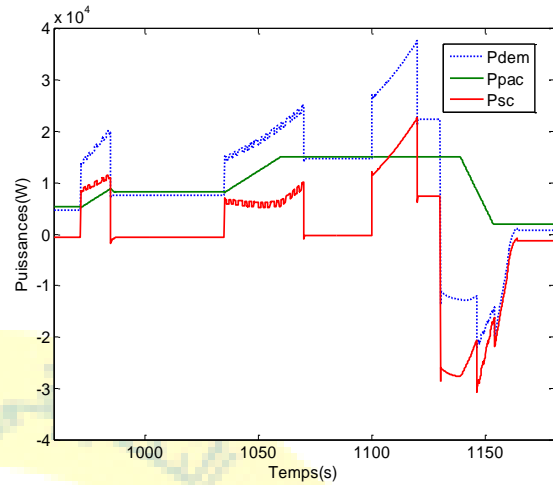


Fig.13 Les puissances échangées (960 à 1180s) pour la stratégie basée sur la programmation non-linéaire.

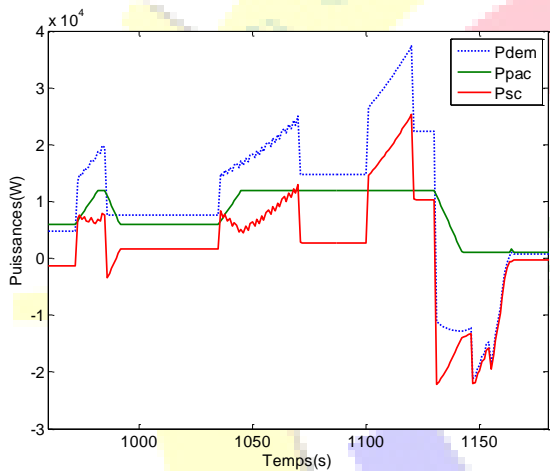


Fig.11 Les puissances échangées (960 à 1180s) pour la stratégie améliorée basée sur la caractéristique du rendement.

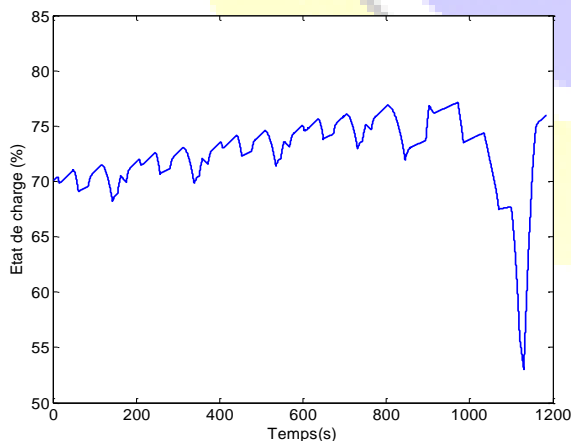


Fig.12 L'évolution de l'état de charge pour la stratégie basée sur la programmation non-linéaire.

Une analyse comparative des stratégies pour les quatre cycles, en termes de consommation d'hydrogène par cycle, est montrée dans fig. 14. Le comparatif est fait en ce qui concerne le cas optimal où la consommation est minimale. Le procédé proposé pour évaluer cette consommation est fondé sur les hypothèses suivantes :

- La capacité de stockage dans le SSE est suffisante pour récupérer toute l'énergie disponible au freinage.
- Le frein de frottement n'est pas utilisé pendant le cycle entier.
- La température du PàC a déjà atteint sa température nominale de fonctionnement au début du cycle (démarrage à chaud).
- La puissance demandée par les auxiliaires est supposant constante et de valeur de 700 W.

L'analyse de l'économie d'hydrogène dans fig. 14 prouve que les trois stratégies ont une bonne exécution comparée au cas sans hybridation. La stratégie basée sur la programmation non-linéaire contrainte donne la meilleure exécution dans tous les cas ; cependant, l'exécution est semblable aux deux stratégies basées sur la caractéristique du rendement. D' autre part, comparé au cas sans hybridation, les résultats montrent l'économie considérable d'hydrogène fonctionnant sur les cycles NEDC, UDDS, et FTP. Au contraire, le fonctionnement sur HWFET l'économie est exigu. Ce dernier un de sa caractéristique est que la décélération moyenne est sensiblement inférieure (-0.22 ms^{-2}) que la correspondance aux autres cycles (NEDC: -0.79 ms^{-2} ; UDDS: -0.58 ms^{-2} ; FTP: -0.58 ms^{-2}). Ces résultats suggèrent que les stratégies atteignent les objectifs d'une manière satisfaisante quand on aura une énergie lors des phases de freinage. Il est remarquable qu'il soit possible de rencontrer la puissance de charge dans les quatre cycles de conduite avec PàC de 15-kW, ce qui est sensiblement inférieur à PàC de 37.5-kW qui est nécessaire si aucune hybridation n'est présente. Cet avantage serait traduit dans une réduction des coûts de production et de la consommation d'hydrogène.

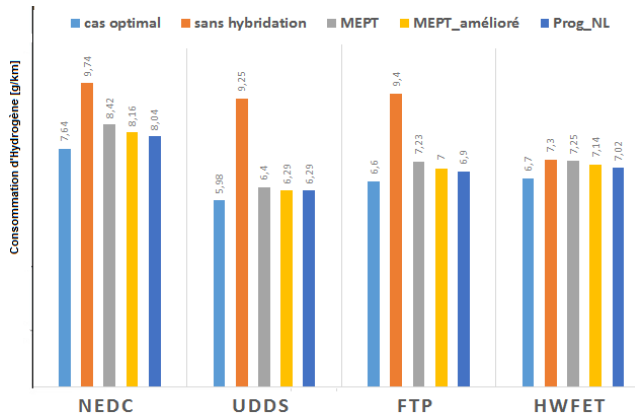


Fig.14 Comparaison de la consommation d'hydrogène (g/Km) des stratégies proposées.

V. CONCLUSION

Dans ce travail, des stratégies de gestion de l'énergie pour les véhicules hybrides à PàC ont été énoncées. Les objectifs de ces SGEs ont été développés et trois stratégies ont été proposées. Ces stratégies sont basées sur la connaissance de la caractéristique de rendement. La première stratégie est une stratégie quasi-suivie de la charge dans laquelle la PàC est actionnée dans une zone avantageuse où son rendement est maximal tandis que la deuxième stratégie sollicite la PàC de préférence dans son point de rendement maximum afin d'améliorer l'économie d'hydrogène. Dans la troisième stratégie, un problème d'optimisation avec des contraintes linéaires est résolu à chaque période de prélèvement, où une fonction de coût non-linéaire, qui représente la consommation d'hydrogène est réduite au minimum. Les SGEs ont été évaluées dans un environnement de simulation en utilisant quatre cycles de conduite standards, Les résultats montrent qu'il est possible de bien réduire la consommation d'hydrogène dans une gamme de 17%. Ceci est réalisé lorsque la PàC fonctionne dans une zone avantageuse. Pour une évaluation technico-commerciale, les consommations d'hydrogène sont comparées à deux références, la première sans hybridation où la PàC est la seule source d'énergie, et la deuxième c'est le cas optimal avec la consommation minimale où le cycle de conduite est connu à priori.

REFERENCES

[1] A. NEFFATI, "Stratégies de gestion de l'énergie électrique d'un système multi-source : décision floue optimisée pour véhicule électrique hybride," *Thèse de Doctorat*, Université de Toulouse III Paul Sabatier, pp. 1-2, 2013.

[2] J. LACHAIZE, "Etude des stratégies et des structures de commande pour le pilotage des systèmes énergétiques à Pile à Combustible (PàC) destinés à la traction," *Thèse de Doctorat*, L'institut National Polytechnique de Toulouse, pp. 12-13, 2004.

[3] C. C. Chan, A. Bouscayrol, & K. Chen C., "Electric, hybrid, and fuel cell vehicles: architectures and modeling," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. Vol. 59 no 2, pp. 589-598, 2010.

[4] I. VALERO EXPOSITO., "Interfaçage et contrôle commande de piles à combustible pour applications stationnaires et transport," *Thèse de Doctorat*, Laboratoire d'Electrotechnique de Grenoble, pp. 17-19, 2004.

[5] M. BECHERIF., "Modélisation, commandes non linéaires et gestion de l'énergie des systèmes multisources-multistockages," *HDR*, Université de Franche-Comté, pp. 30-19, 2011.

[6] J.F. Fauvarque. "Présentation générale des supercondensateurs à double couche électrochimique," dans Journées d'Etudes sur les Supercondensateurs, Paris, France, Février 1998.

[7] P. Barrade, A. Rufer., "The use of supercapacitors for energy storage in traction systems," dans IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, Paris, Octobre 2004.

[8] J. M. Corrêa, F. A. Farret, L. N. Canha et M. G. Simoes, "Simulation of fuel-cell stacks using a computer-controlled power rectifier with the purposes of actual high-power injection applications ", *IEEE Trans. on Industrial Applications*, vol. 39, n° 4, pp. 1136 - 1142 , 2003.

[9] I. Sadli, P. Thounthong, J-P. Martin S. Raël et B. Davat, "Behaviour of a protons exchange membrane fuel cell (PEMFC) supplying a low voltage static converter ", 2nd France Deutschland Fuel Cell Conference (FDFC2004), Belfort (France), 2004.

[10] M.Y. El-Sharkh, A. Rahman, M. S. Alam, P. C. Byrne, A. A. Sakla, et T. Thomas, "A dynamic model for a stand-alone PEM fuel cell power plant for residential applications ", *Journal of Power Sources*, vol. 138, n° 1-2, pp. 199-204, 2004.

[11] M.BECHERIF, "Passivity-Based Control Of Hybrid Sources: Fuel Cell And Battery", 11th IFAC Symposium on control in Transportation (CTS'06), Netherland, 2006.

[12] D. Feroldi, M. Serra & J. Riera, "Energy Management Strategies based on efficiency map for Fuel Cell Hybrid Vehicles," *Journal of Power Sources*. Vol. 190, pp. 387-401, 2009.

[13] W. HANKACHE, "Gestion Optimisée de l'Énergie Électrique d'un Groupe Électrogène Hybride à Pile à Combustible," *Thèse de Doctorat*, Université de Toulouse, pp. 36-41, 2008.

[14] J. Larminé & A. Dicks, *Fuel Cell Systems Explained*, John Wiley & Sons, Chichester: 2003, pp 34.

[15] T Markel, A Brooker, T Hendricks, V Johnson, K Kelly, B Kramer, M O'Keefe, S Sprik, K Wipke, "ADVISOR: a systems analysis tool for advanced vehicle modeling," *Journal of Power Sources*. Vol. 110, pp. 255-266, 2002.

[16] K. Wipke, M. Cuddy, S. Burch, "ADVISOR 2.1: a user-friendly advanced powertrain simulation using a combined backward/forward approach," *IEEE Transactions on Vehicular Technology* 48 pp 1751-1761.1999.