



**HAL**  
open science

## Modélisation dynamique d'un véhicule à pile à combustible

Denis Candusso, Elisabeth Rullière, Pierre Baurens, Jean-Philippe Poirot,  
Pascal Schott

► **To cite this version:**

Denis Candusso, Elisabeth Rullière, Pierre Baurens, Jean-Philippe Poirot, Pascal Schott. Modélisation dynamique d'un véhicule à pile à combustible. 5ème colloque Véhicules électriques et hybrides (C-VELEC) - Enjeux technologiques et perspectives, Jun 2002, Grenoble (38000), France. pp.121-132. hal-04517858

**HAL Id: hal-04517858**

**<https://hal.science/hal-04517858v1>**

Submitted on 26 Mar 2024

**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.

# Modélisation dynamique d'un véhicule à pile à combustible

Denis CANDUSSO  
Elisabeth RULLIERE  
Laboratoire d'Electrotechnique de Grenoble  
INPG/UJF - CNRS UMR 5529  
ENSIEG BP 46  
38402 Saint Martin d'Hères Cedex France  
Candusso@leg.ensieg.inpg.fr

Pierre BAURENS  
Jean-Philippe POIROT  
Pascal SCHOTT  
CEA Grenoble, DRT – DTEN/SCSE  
17 rue des Martyrs  
38054 Grenoble Cedex 9 France  
Baurens@cea.fr

## 1. Introduction

Aux côtés de l'électricité, l'hydrogène pourrait devenir dans les années à venir un vecteur énergétique majeur. Par l'intermédiaire des piles à combustible (PAC), les transports constituent un domaine potentiel pour l'utilisation d'hydrogène comme source d'énergie. Parmi ces convertisseurs d'hydrogène en énergie électrique, la technologie PEM (pile à membrane échangeuse de protons) répond le mieux pour le moment aux contraintes de la propulsion automobile du fait notamment de sa température basse de fonctionnement (environ 80°C) et de son électrolyte solide.

La complexité croissante des chaînes de traction nécessite de plus en plus l'utilisation de techniques de modélisation et de simulation pour le développement et l'optimisation des systèmes. Nous présentons dans cet article un outil destiné à la simulation d'un véhicule à PAC, dans lequel la pile est hybridée par un dispositif tampon de stockage de l'énergie, constitué de supercondensateurs. Les simulations effectuées montrent l'intérêt de disposer d'un système de stockage tampon à bord d'un véhicule à PAC pour amortir les pics de puissance et améliorer le rendement global du système. L'originalité de l'outil développé réside dans le fait que le modèle du groupe électrogène à pile à combustible (GE à PAC) est dynamique.

## 2. Description du véhicule

La masse du véhicule électrique simulé est fixée à une tonne.

La chaîne de traction se compose d'un groupe motopropulseur (moteur électrique associé à son convertisseur) et d'une source hybride. La source hybride se compose :

- d'un GE à PAC ; la puissance brute du stack vaut 30kW,
- d'un élément tampon de stockage d'énergie pouvant fournir environ 5kW pendant une dizaine de secondes,
- de hacheurs permettant le contrôle de la tension du bus continu.

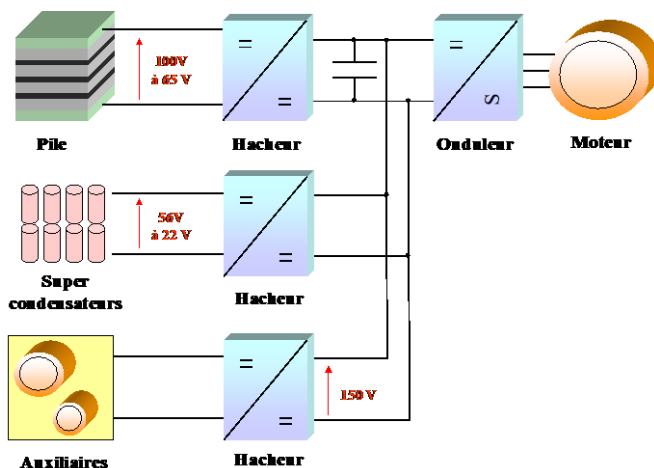


Fig. 1:  
Architecture électrique de  
la chaîne de traction

Le convertisseur permettant d'élever la tension de la PAC est un hacheur parallèle. Le convertisseur servant d'interface entre le module de supercondensateurs et le bus continu est un hacheur élévateur réversible en courant.

### 2.1. Description générale du GE à PAC [1]

Le GE est bâti autour d'une pile d'une puissance maximale de 30kW, comportant une centaine de cellules. L'hydrogène est stocké sous forme gazeuse. Le système est conçu pour fonctionner à basse pression (autour de 1.5 bars). L'humidification et le refroidissement de la pile sont effectués par une injection d'eau liquide dans le circuit d'air en entrée de pile. Les pressions à la cathode et à l'anode sont constantes. Le débit d'air entrant à la cathode est régulé en boucle ouverte par une consigne de vitesse donnée au compresseur en fonction du courant délivré par la pile et d'une stœchiométrie fixée. Côté hydrogène, on travaille en sortie fermée avec purge. Le débit d'hydrogène entrant à l'anode est déterminé par la consommation de la pile et par le débit de purge.

La dynamique du GE est essentiellement limitée par le compresseur.

Le rendement du GE à PAC est maximal pour les fonctionnements à charge partielle. Aux très faibles charges, la consommation des auxiliaires fait baisser fortement le rendement.

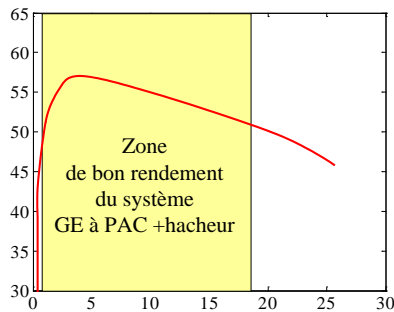


Fig. 2: Allure du rendement du système [%]  
GE à PAC + hacheur  
en fonction de la puissance brute [kW]

### 2.2. Description du dispositif tampon de stockage de l'énergie

Un module de 28 supercondensateurs (module 56V – 100F du type Epcos) est utilisé [2].

### 2.3. Description du modèle global

Le modèle du système véhicule, implanté sous Simulink, est construit suivant une approche de type 'forward-facing' ou 'downstream'. Le bloc 'commande' correspond aux pédales d'accélération et de frein. La consigne de couple moteur est donnée par un correcteur de type proportionnel.

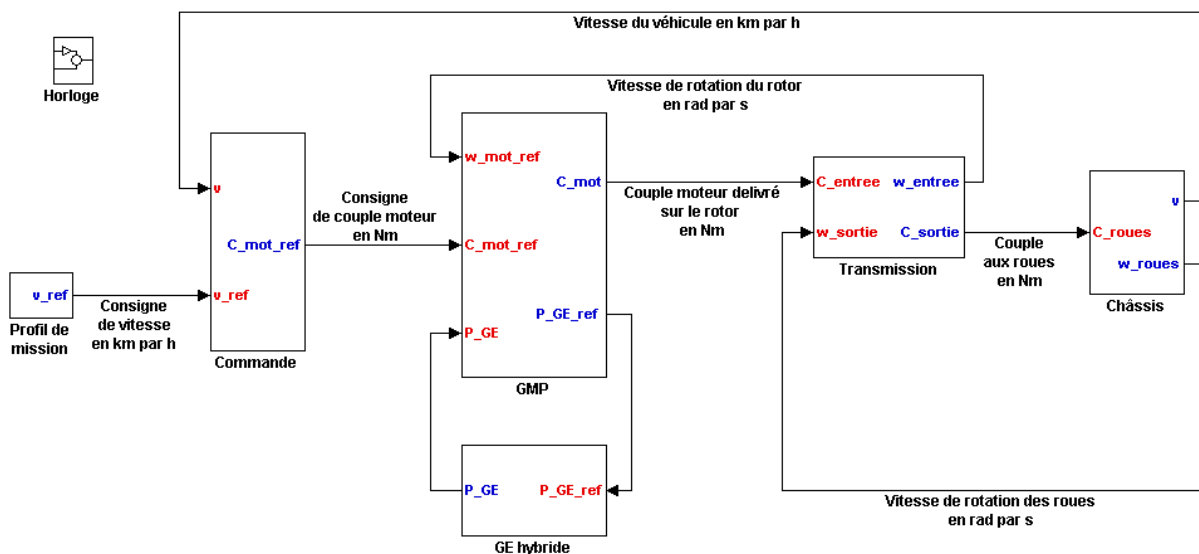


Fig. 3 : niveau 1 du modèle de la chaîne de traction

Les modèles utilisés pour chacun des sous-systèmes sont les suivants.

Le modèle du GE à PAC a été développé par le CEA [1,3].

Pour les supercondensateurs, un modèle ‘deux branches’ [4] est utilisé, avec une valeur de capacité variant en fonction de la tension.

Les convertisseurs ont été modélisés par un gain en faisant intervenir l’évaluation des pertes dans les composants actifs (IGBT) et passifs (L,R). Une modélisation du comportement thermique des interrupteurs permet de calculer les températures. Différentes limitations de courant, de tension ont été introduites de façon à ce que les supercondensateurs, les convertisseurs aient des points de fonctionnement réalistes.

Un modèle quasi-statique construit à partir d’une cartographie de moteur a été utilisé pour le GMP. La limitation du courant dans la machine est prise en compte. L’inertie du moteur est ramenée sur l’axe des roues, au sein du sous-système ‘Châssis’. Un modèle dynamique de machine à courant continu ou de moteur DC brushless peut éventuellement être substitué au modèle quasi-statique. La transmission est modélisée par un rapport de réduction et un rendement. Enfin, dans le sous-système ‘châssis’, les forces et frottements (dus au roulement, à la résistance de l’air...) qui s’exercent sur le véhicule sont pris en compte dans l’écriture de la relation fondamentale de la dynamique.

La tension du bus continu (150V) est prise constante pour éviter l’ajout d’une boucle de régulation de tension qui aurait pour effet de ralentir la simulation.

### 3. Résultats sur un profil de mission donné

La stratégie de commande mise en œuvre permet de répartir la demande de puissance entre le GE à PAC et les supercondensateurs [5,6,7]. Elle consiste d’une part à faire fonctionner, autant que possible, le GE à PAC à charge partielle, dans une gamme de puissance correspondant à un bon rendement. D’autre part, on fait également en sorte de maintenir un certain état de charge des supercondensateurs. Une simulation a été réalisée sur un cycle de roulage d’une durée de 330s. Le GE à PAC fournit constamment de la puissance et la stratégie de commande fait que le GE à PAC ne fonctionne pas à faible charge (c’est à dire en dessous d’une puissance de 1kW), sauf au démarrage. Les paramètres relatifs à la stratégie de commande n’ont ici volontairement pas été choisis de façon optimale. Ce choix de paramètres permet en effet de placer par exemple les supercondensateurs en limite de plage de tension de fonctionnement et de mieux observer alors les effets des différentes boucles de régulation.

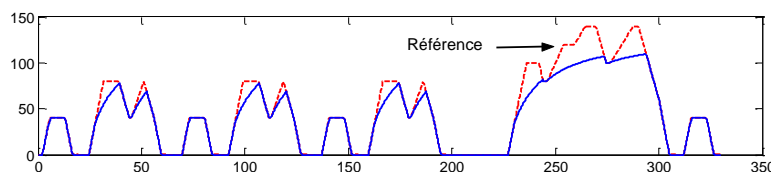


Fig. 4 : Vitesse du véhicule [km/h]

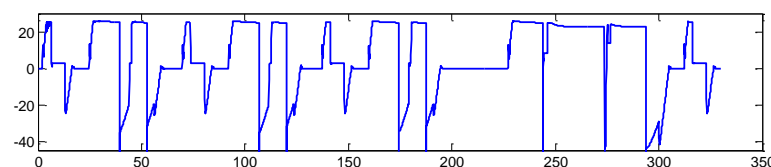


Fig. 5 : Puissance GMP [kW]

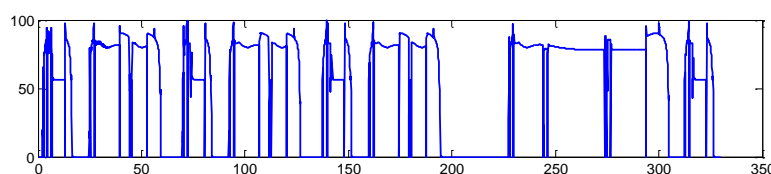


Fig. 6 : Rendement GMP

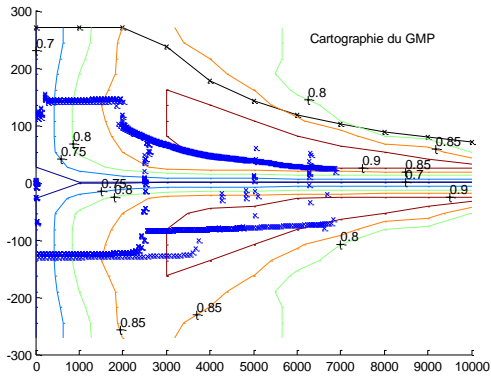


Fig. 7 :  
Lieux des points de fonctionnement  
du GMP sur le cycle  
dans le plan couple [Nm], vitesse [tr/min]

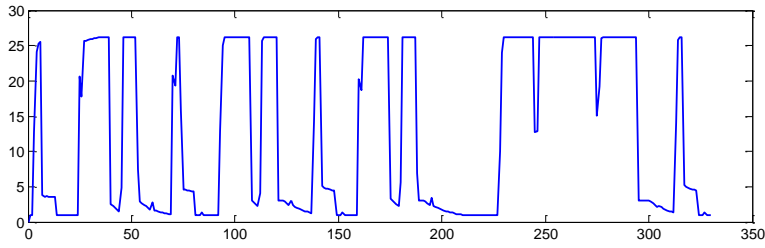


Fig. 8 :  
Puissance brute PAC  
[kW]

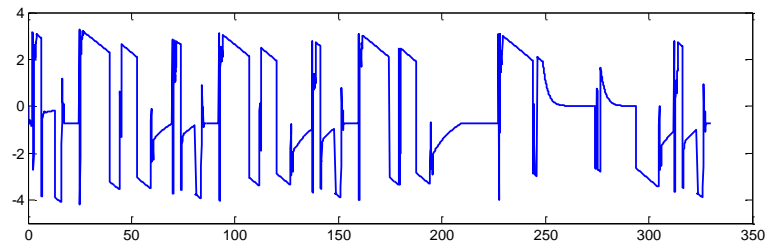


Fig. 9 : Puissance  
supercondensateurs  
[kW]

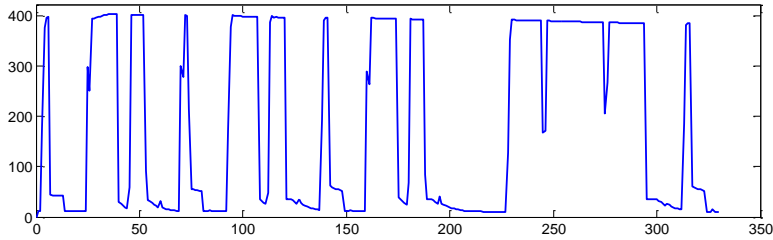


Fig. 10 :  
Courant PAC  
[A]

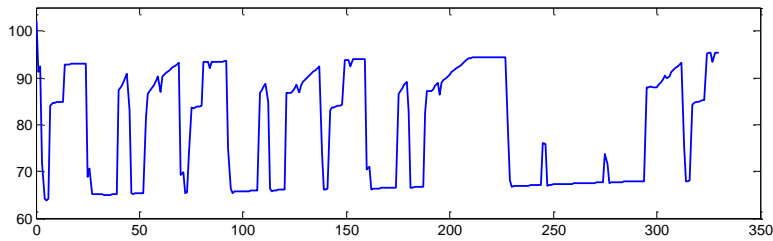


Fig. 11 :  
Tension PAC  
[V]

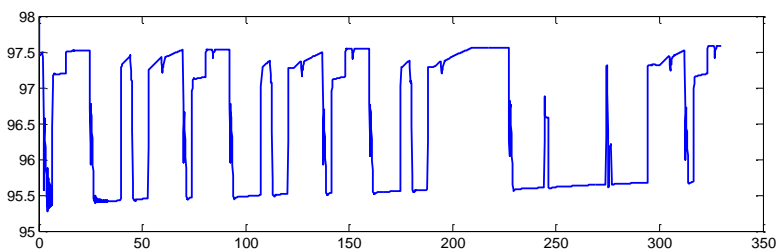


Fig. 12 :  
Rendement du hacheur  
lié à la PAC  
[%]

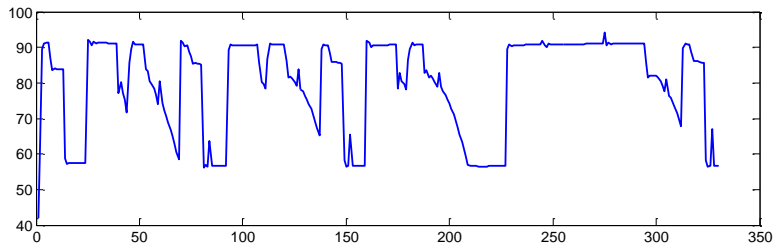


Fig. 13 :  
Quotient [%] :

$$\frac{\text{Puissance nette GE à PAC}}{\text{Puissance brute PAC}}$$

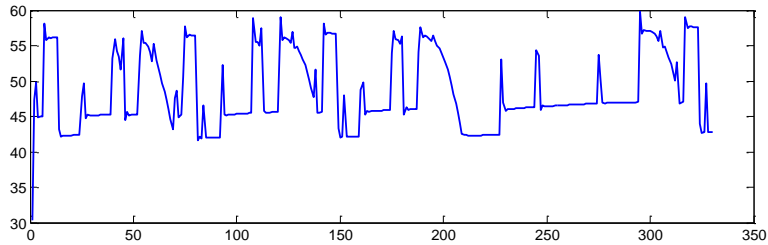


Fig. 14 :  
Rendement du GE à PAC  
(hacheur compris)  
[%]

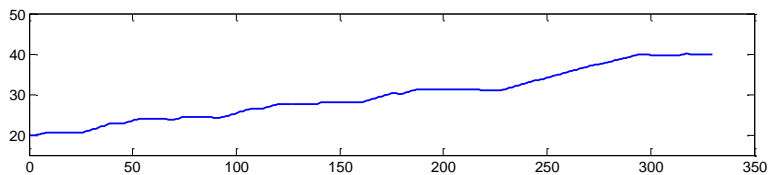


Fig. 15 :  
Température moyenne  
de pile [°C]

On observe sur la figure 15 la montée en température de la pile. Le régime permanent n'est atteint qu'après plusieurs cycles de fonctionnement.

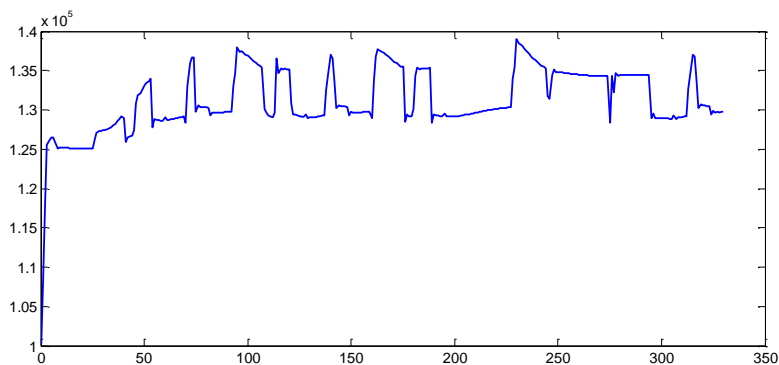


Fig. 16 :  
Pression moyenne  
à la cathode  
[Pa]

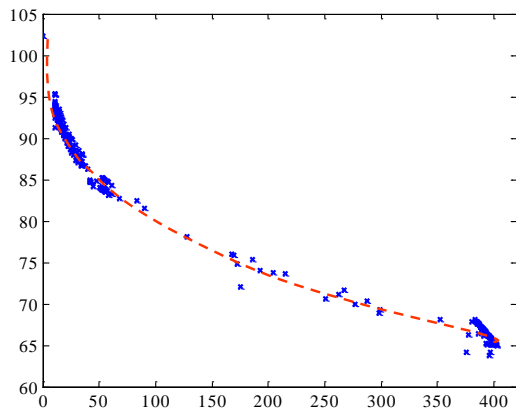


Fig. 17 : courbe de polarisation dynamique  
Tension [V] en fonction du courant [A]  
Points de fonctionnement de la PAC

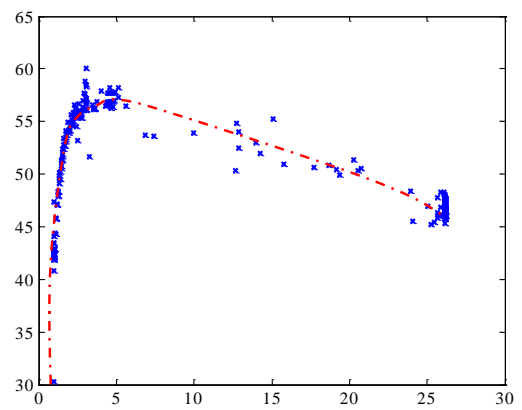


Fig. 18 : Rendement du système [%] :  
GE à PAC + hacheur  
en fonction de la puissance brute [kW]

On constate, à la vue de la figure 18, que le choix des paramètres relatifs à la stratégie de gestion de l'énergie pourrait être optimisé, de façon à ce que l'ensemble GE à PAC - hacheur ne fonctionne qu'à des charges supérieures à 2 ou 3kW, pour lesquelles le rendement est meilleur.

La tension aux bornes du module de supercondensateurs évolue entre 22V et 56V. Ces tensions correspondent respectivement à des états de charge des condensateurs de 50 et 100%. Le courant de charge ou de décharge des supercondensateurs est limité ici à 100A.

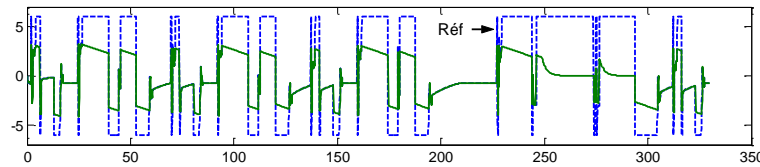


Fig. 19 : Puissance délivrée par les supercondensateurs [kW]

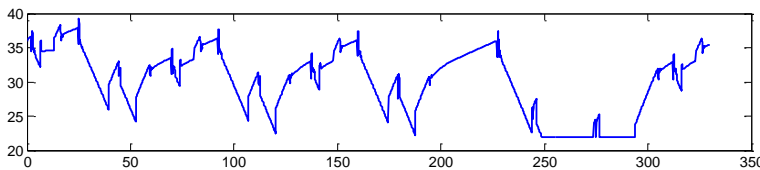


Fig. 20 : Tension aux bornes des supercondensateurs [V]

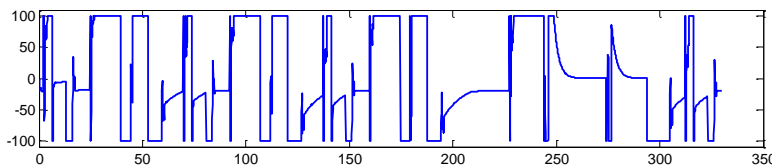


Fig. 21 : Courant délivré par les supercondensateurs [A]

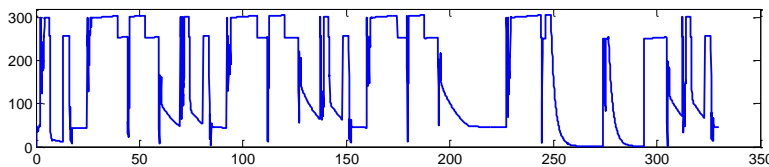


Fig. 22 : Pertes dans les interrupteurs [W]

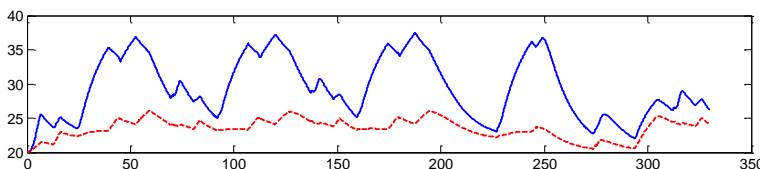


Fig. 23 : Températures des interrupteurs (semelle) [°C]

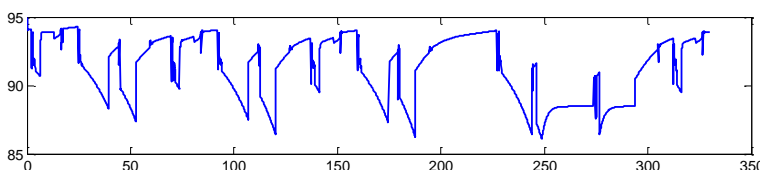


Fig. 24 : Rendement du hacheur [%]

#### 4. Cas particulier du démarrage

Le courant de consigne de la PAC est déterminé de façon à ce que la tension aux bornes de celle-ci ne soit pas inférieure à 65V. En effet, il est en particulier nécessaire de limiter le courant demandé à la PAC pendant la phase de démarrage lorsque la pression cathodique (côté air) n'est pas suffisamment élevée et que le courant demandé à la PAC par le GMP est élevé.

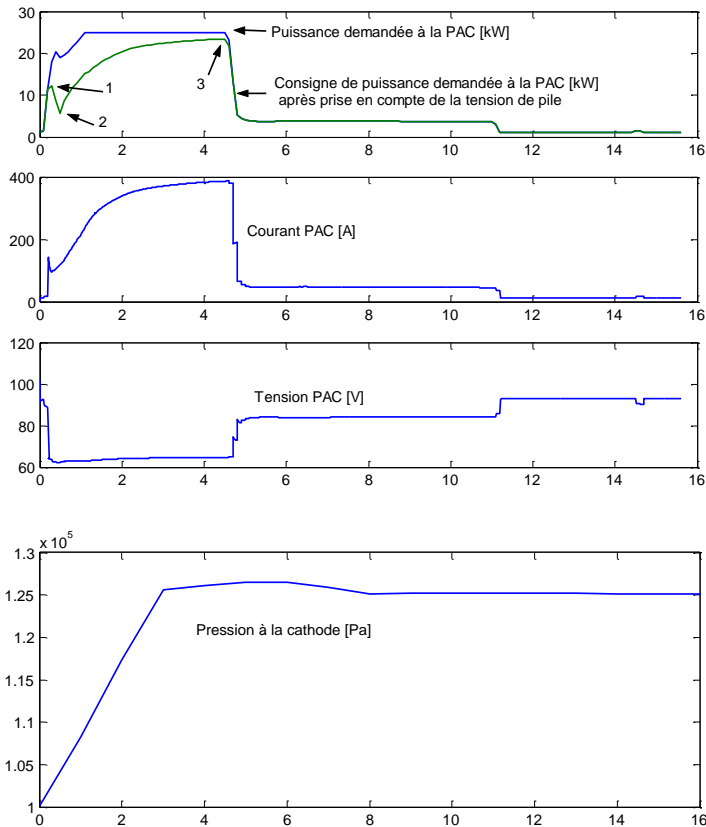


Fig. 25 : Evolution du courant, de la tension de pile, de la pression cathodique (air)

Pendant cette phase du démarrage, les supercondensateurs fournissent autant de puissance qu'ils le peuvent.

## 5. Conclusion

Dans le cas étudié, l'hybridation permet la récupération de l'énergie au freinage, facilite le démarrage, permet d'éviter au GE à PAC de fonctionner à très faible charge. Malgré une complexité accrue de l'architecture électrique et des lois de gestion de l'énergie, l'hybridation peut aussi améliorer la dynamique de puissance de la source d'énergie grâce au faible temps de réponse des supercondensateurs, qui peuvent prendre en charge les transitoires de puissances rapides et lisser les variations de puissances demandées au GE à PAC. Le dispositif de stockage tampon étant relativement léger, le surplus de masse embarqué n'est pas trop pénalisant. D'autre part, dans les conditions les moins favorables - état de charge des supercondensateurs à l'état bas - le GE à PAC est de taille suffisante pour assurer des performances convenables à la chaîne de traction et le conducteur n'est alors pas trop pénalisé.

## 6. Références

- [1] Pascal Schott, Jean-Philippe Poirot, Pierre Baurens  
Modélisation et simulation de la source d'énergie à pile à combustible du véhicule hydro-gen  
Colloque Piles à Combustible et Interfaces pour les transports – 9 et 10 novembre 2000  
Belfort

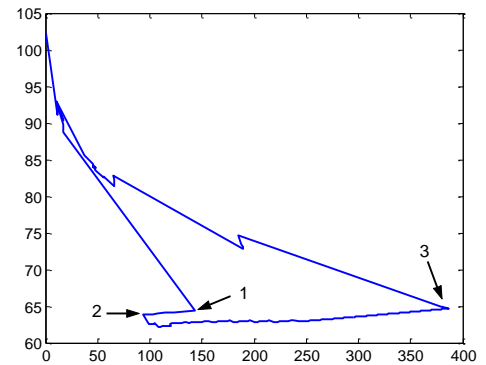


Fig. 26 : Courbe de polarisation en dynamique  
tension de pile [V] en fonction du courant [A]



- [2] EPCOS – Components on line  
<http://www.epcos.com>
  
- [3] Pierre Baurens, Jean-Philippe Poirot  
Simulation des piles à combustible (type PEMFC) et des groupes électrogènes à PAC dédiés à la traction électrique : les modèles Vp\_stack et Vp\_syst du CEA, des modèles de conception et de prédiction pour les industriels de la traction électrique  
C'VELEC 99 – Véhicule électrique et véhicule hybride, solutions actuelles et perspectives – 3 et 4 novembre 1999 Grenoble
  
- [4] L. Zubieta, R. Bonert  
IEEE-IAS'98 Conference, 1149-1154
  
- [5] Denis Candusso, Elisabeth Rullière, Jean-Paul Yonnet, Pierre Baurens  
Simulation d'un véhicule électrique à source hybride pile à combustible - éléments intermédiaires de stockage de la puissance  
Colloque Piles à combustible et interfaces pour les transports - 9 et 10 nov 2000 à Belfort
  
- [6] Denis Candusso, Elisabeth Rullière, Emmanuel Toutain  
A fuel cell hybrid power source for a small electric vehicle  
Universities' Power Engineering Conference - 12, 13 et 14 sept 2001 à Swansea UK
  
- [7] Denis Candusso, Elisabeth Rullière, Seddik Bacha  
Modelling of a fuel cell hybrid power source for a small electric vehicle  
Electric Vehicle Symposium 18 - du 20 au 24 oct 2001 à Berlin