



HAL
open science

Simulation d'un véhicule électrique à source hybridée pile à combustible - éléments intermédiaires de stockage de la puissance

Denis Candusso, Elisabeth Rullière, Jean-Paul Yonnet, Pierre Baurens

► To cite this version:

Denis Candusso, Elisabeth Rullière, Jean-Paul Yonnet, Pierre Baurens. Simulation d'un véhicule électrique à source hybridée pile à combustible - éléments intermédiaires de stockage de la puissance. Colloque Piles à combustible et interfaces pour les transports, Nov 2000, Belfort, France. pp.145-152. hal-04521831

HAL Id: hal-04521831

<https://hal.science/hal-04521831v1>

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.

SIMULATION D'UN VEHICULE ELECTRIQUE A SOURCE HYBRIDEE PILE A COMBUSTIBLE ELEMENTS INTERMEDIAIRES DE STOCKAGE DE LA PUISSANCE

Denis CANDUSSO * - Elisabeth RULLIERE * - Jean-Paul YONNET * - Pierre BAURENS **

* 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

** CEA Grenoble - Direction des Technologies Avancées
DEM/SPCM
17 rue des Martyrs, 38054 Grenoble Cedex 9 France
Baurens@cea.fr

Résumé : Les études réalisées par le LEG sur la modélisation des différents éléments de chaînes de traction de véhicules électriques à batteries (moteurs, convertisseurs électriques...) et sur l'association batteries – supercondensateurs, via un convertisseur permettant de gérer les échanges d'énergie entre ces différents éléments de stockage, ont servi de base aux travaux actuellement menés sur le véhicule à pile à combustible. Dans cet article, nous souhaitons montrer que le dimensionnement électrique de chacun des composants de la chaîne de traction est fortement conditionné par celui de ses voisins et qu'une simulation globale de la chaîne constitue un outil précieux d'aide à la décision. Un autre but poursuivi consiste à présenter l'intérêt d'hybrider la source d'énergie.

Mots clés : pile à combustible, supercondensateurs, moteur DC brushless, simulation.

1. INTRODUCTION

Les différents types de batteries de traction utilisés jusqu'à présent dans les véhicules électriques n'ont pas donné à ces derniers un niveau de performance et une autonomie suffisants leur permettant de rivaliser avec les véhicules thermiques. Face aux normes antipollution toujours plus contraignantes, visant à limiter notamment l'émission de gaz à effet de serre, une nouvelle filière énergétique a fait son apparition, celle des groupes électrogènes à pile à combustible (GE à PAC).

L'approche par modélisation et simulation de la chaîne de traction s'avérait déjà nécessaire lors du développement des véhicules électriques à batteries, en particulier lorsque la source était hybridée (batteries – supercondensateurs par exemple). Elle permettait en effet de tester différentes architectures de la chaîne et de tenir compte des conditions d'utilisation du véhicule [1]. La simulation devient incontournable du fait de la présence de composants très innovants dans le GE à PAC.

Le travail que nous avons entrepris consiste dans un premier temps à modéliser, finement et séparément, chacun des éléments électriques de la chaîne de traction (moteur, convertisseurs, supercondensateurs) à partir des lois physiques qui les régissent. De ces modèles sont issus, dans un second temps, des modèles simplifiés, quasi-statiques. Pour le GE à PAC, nous avons recours en première approche à un modèle très simple, qui nous permet néanmoins de prédire qualitativement sur un cycle de roulage les grandeurs électriques mises en jeu dans la pile. Grâce au logiciel ADVISOR, l'assemblage des différents modèles simplifiés permet d'obtenir, pour l'ensemble de la chaîne, une simulation dont la durée reste raisonnable.

Dans cet article, nous présenterons un exemple de ce travail ; l'application envisagée associe un GE à PAC avec un lot de supercondensateurs pour alimenter un véhicule de puissances moyenne et maximale d'environ 2 et 10kW respectivement. Les moteurs considérés sont du type moteurs à courant continu sans balai (DC brushless). Nous avons porté une attention particulière à la définition de la loi de commande de leurs onduleurs de manière à optimiser le rendement des moteurs tant en mode traction qu'en mode freinage. Une stratégie de gestion de l'énergie entre la PAC et les supercondensateurs est proposée.

Nous concluons sur les perspectives à venir.

2. DESCRIPTION DU VEHICULE

Notre véhicule se compose principalement d'un châssis, d'un groupe motopropulseur (moteurs et onduleurs) et d'une source d'énergie hybridée (GE à PAC et supercondensateurs). Sa masse totale est comprise entre 250 et 300kg. Le véhicule est destiné à une utilisation urbaine, caractérisée par le cycle de roulage suivant.

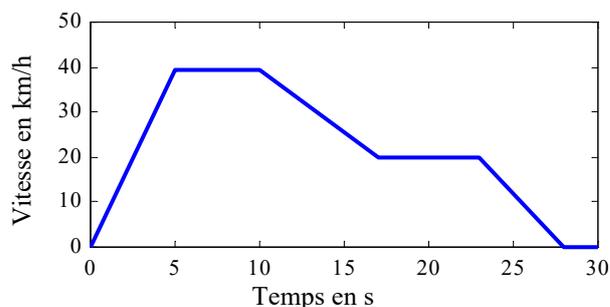


Figure 1 : Profil de mission

Un véhicule dont la source d'énergie se compose d'un GE à PAC et de dispositifs intermédiaires de stockage de la puissance (supercondensateurs, batteries au plomb...) est un véhicule de type hybride série. Essentiellement deux configurations de la chaîne de traction sont envisageables. Elles diffèrent suivant que la tension aux bornes de l'onduleur du moteur est imposée directement par la pile ou par le dispositif intermédiaire de stockage. L'élément dont la variation de tension à ses bornes sera la plus faible sera placé directement aux bornes de l'onduleur. De cette façon, la limite en courant du moteur et de l'onduleur sera moins souvent atteinte lors des pics de puissance. Dans le cas où des supercondensateurs sont utilisés, on préférera donc placer le GE à PAC directement aux bornes de l'onduleur.

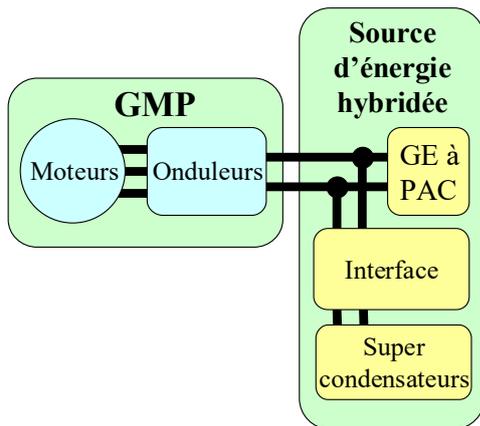


Figure 2 : Exemple d'architecture de la chaîne de traction

3. LES DIFFERENTS ELEMENTS DE LA CHAÎNE DE TRACTION ET LEUR MODELISATION

On ne s'intéressera dans cet article qu'au GMP et à la source hybridée. La modélisation du châssis du véhicule et la prise en compte des différentes forces à travers l'équation fondamentale de la mécanique (frottements dus au roulement, frottements aérodynamiques...) qui s'exercent sur celui-ci ne seront pas évoquées ici.

3.1. Le logiciel ADVISOR

ADVISOR (ADvanced VehIcule SimulatOR) est un logiciel dédié à l'analyse et à la simulation de chaîne de traction de véhicule conventionnels, électriques et surtout hybrides [2]. Il est développé par le NREL (National Renewable Energy Laboratory) dans le cadre d'un programme du département à l'énergie des Etats-Unis (DOE) et est utilisé à la fois par les constructeurs automobiles américains, des universités et d'autres organismes de recherche tels que PNGV, SAE, USCAR. Il permet d'évaluer les performances d'un véhicule (vitesse, accélération, consommation...) et de quantifier par exemple l'apport d'une stratégie de contrôle des échanges d'énergie entre les différents éléments d'une source hybridée. Le logiciel ADVISOR fonctionne dans l'environnement Matlab/Simulink.

Les composants de la chaîne de traction sont principalement modélisés de façon empirique à partir de

mesures effectuées en laboratoire. Des données peuvent être également obtenues grâce à des modèles plus complexes placés en régime permanent (couple et vitesse constants pour un moteur par exemple). Les modèles d'ADVISOR sont dits quasi-statiques car les résultats, issus de données collectées dans l'état stable, sont corrigés de façon à obtenir des effets transitoires lents, comme l'inertie dans le cas d'un moteur. Chaque composant est placé dans un état d'équilibre pendant une durée égale au pas de calcul (une seconde). ADVISOR a été développé comme un outil destiné à l'analyse et non pas à la conception ou au dimensionnement. Des phénomènes dont l'échelle de temps est inférieure à la seconde, tels que les vibrations physiques, les oscillations électriques ne peuvent être pris en compte.

3.2. Le groupe motopropulseur

Le groupe motopropulseur (GMP) se compose de deux moteurs-roues à courant continu sans balai et de leurs onduleurs de tension. Le rotor (inducteur) est muni d'aimants permanents (samarium-cobalt, ferrites, fer-néodyme-bore). La machine est triphasée.

3.2.1. Principe général de fonctionnement

L'onduleur est commandé à fréquence constante, en modulation de largeur d'impulsions (MLI). On fait alors varier le rapport cyclique pour contrôler le courant de sortie.

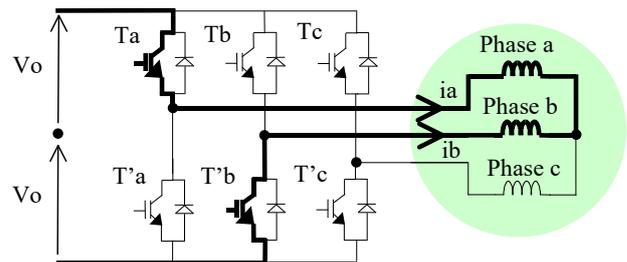


Figure 3 : Schéma de l'onduleur et du moteur Phases a et b alimentées

Les formes d'ondes sont obtenues en alimentant simultanément deux des trois phases de la machine. On définit des zones dans lesquelles les courants sont constants (six zones par période électrique). Les bras commandés sont sélectionnés en fonction de la position du rotor. Ainsi la fonction du convertisseur est elle équivalente à celle du collecteur d'une machine à courant continu. On ne régule que les deux phases dans lesquelles le courant est non nul.

3.2.2. Formes idéales des plat des forces électromotrices et des courants dans une machine « trapèze »

Les courants ont une forme de créneaux. Leur largeur vaut $2\pi/3$ rad électriques, tout comme celle du plat des forces électromotrices. A tout instant, on considère que seules deux phases du moteur sont parcourues simultanément par un courant. Le courant est alors nul dans la troisième phase. Le déphasage entre les fondamentaux des courants et des tensions est nul. Dans cette configuration, le couple est maximal.

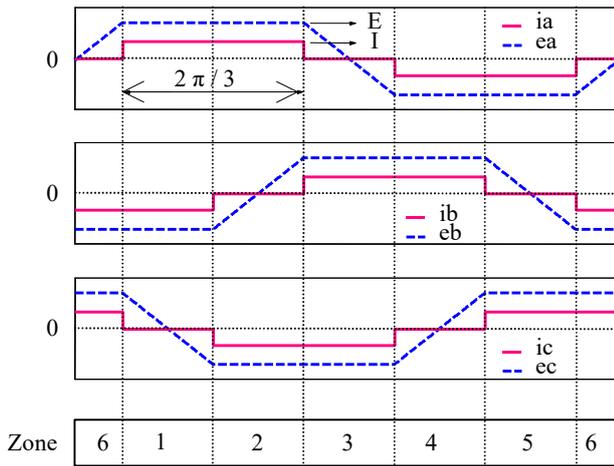


Figure 4 : Allure des fem, des courants dans les phases
Définition des six zones
dans lesquelles les courants sont constants

Dans la réalité, les courants n'ont pas tout à fait la forme de créneaux ; les inductances des enroulements ralentissent en effet leur montée et leur descente. Il existe donc un angle électrique de commutation pendant lequel les trois phases de la machine sont simultanément parcourues par un courant.

3.2.3 Commande de l'onduleur

Deux types de commande de l'onduleur sont généralement utilisés : la commande unipolaire et la commande bipolaire.

La commande bipolaire :

On utilise un seul régulateur de courant et, suivant la position du rotor, on sélectionne un courant statorique (celui qui ne commute pas ou bien celui qui s'établit par exemple) que l'on place en entrée du régulateur. Le régulateur de courant délivre une grandeur de commande β unique. A l'intérieur d'une zone, on commande simultanément deux bras de l'onduleur. Ceux-ci ont un fonctionnement complémentaire. Les deux transistors d'un même bras sont eux-mêmes commandés de façon complémentaire.

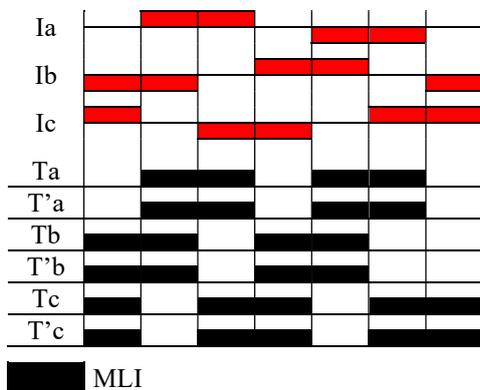


Figure 5 : Commande bipolaire

La commande unipolaire :

Comme pour la commande bipolaire, on utilise un seul régulateur de courant et, suivant la position du rotor, on

sélectionne un courant statorique que l'on place en entrée du régulateur. Le régulateur de courant délivre une grandeur de commande β unique. Deux bras de l'onduleur sont actifs à l'intérieur d'une zone mais le rapport cyclique d'un seul des deux bras varie. Le rapport cyclique de l'autre bras est alors imposé soit à 1, soit à 0 suivant le signe de β .

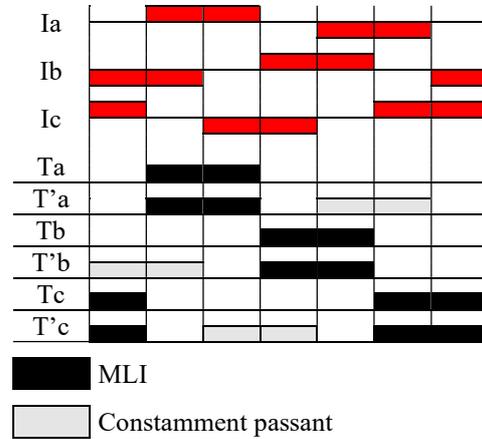


Figure 6 : Commande unipolaire

La commande unipolaire est utilisée en fonctionnement moteur car les interrupteurs commutent deux fois moins dans ce cas et le rendement de l'onduleur est meilleur. De plus, cette commande conduit à un angle de commutation plus petit à basse vitesse et donc à une oscillation de couple moins importante [3].

Lors du fonctionnement en frein par contre, la commande unipolaire n'est pas utilisable. Des distorsions importantes sont introduites au niveau des courants dans la machine et peu d'énergie est susceptible d'être récupérée lors des phases de freinage. La commande bipolaire lui sera alors substituée [4].

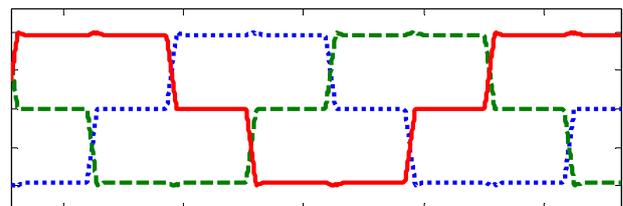


Figure 7 : Allure des courants dans la machine
Mode traction
Commande unipolaire

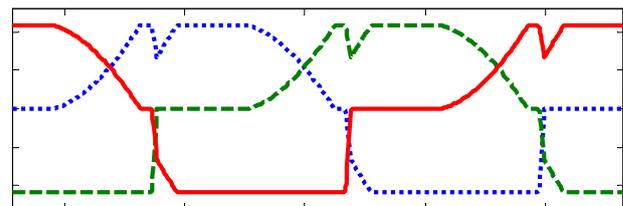


Figure 8 : Allure des courants dans la machine
Mode frein
Commande unipolaire

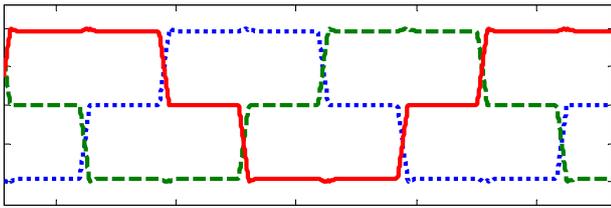


Figure 9 : Allure des courants dans la machine
Mode frein
Commande bipolaire

C'est un modèle dynamique de moteur DC brushless, développé sous Matlab/Simulink qui nous a permis de tracer les courbes d'intensité ci-dessus.

C'est également à l'aide de ce modèle que nous pouvons estimer les pertes du GMP et établir ainsi une cartographie de celui-ci. Dans le modèle quasi-statique proposé par ADVISOR, ces dernières sont alors prises en compte par le biais d'un tableau (2-D lookup table), indexé par la vitesse et le couple du rotor. Le modèle d'ADVISOR a été modifié de façon à prendre en compte le fait que les moteurs sont au nombre de deux dans notre véhicule.

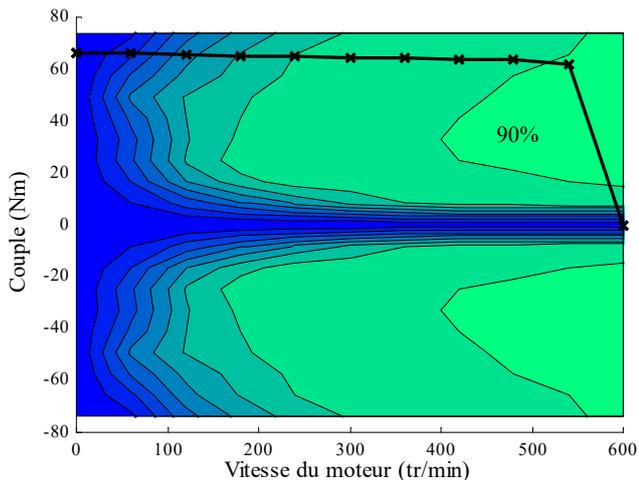


Figure 10 : Exemple de cartographie de moteur

3.3. La source d'énergie

La source d'énergie de notre véhicule est hybridée. Elle se compose d'un lot de supercondensateurs et d'un GE à PAC.

3.3.1. Intérêt de l'hybridation du GE à PAC

Le rendement d'un GE à PAC est maximal pour les fonctionnements à charge partielle et faible à pleine charge. Aux très faibles charges, la consommation des auxiliaires fait baisser fortement le rendement.

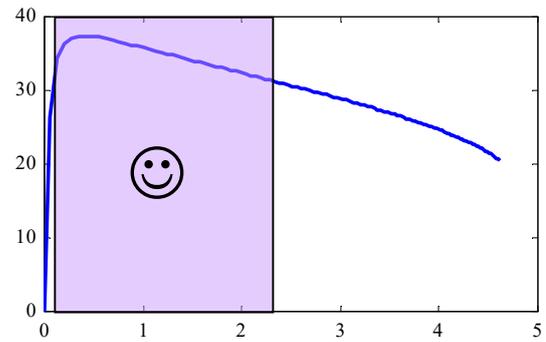


Figure 11 : Allure du rendement du GE à PAC [%]
en fonction de la puissance nette délivrée par le GE [kW]

L'hybridation par des dispositifs intermédiaires de stockage de la puissance (batteries, supercondensateurs...) permet de faire travailler le GE à PAC à charge partielle, et donc avec un bon rendement, une consommation moindre en hydrogène. L'hybridation permet en outre de réduire la taille de la pile et donc son coût. Autre avantage : l'énergie délivrée lors des phases de freinage peut être récupérée.

La puissance moyenne requise par le GMP sur le cycle de roulage de la figure est égale à environ 15% de la puissance maximale délivrée sur ce même cycle. Cela montre l'intérêt qu'il y a à découpler les sources fournissant les puissances moyenne et de pics.

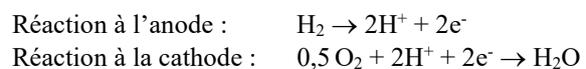
3.3.2. Le groupe électrogène à pile à combustible

Un GE à PAC se compose d'une pile et des éléments auxiliaires permettant son fonctionnement. La fonction du groupe électrogène est de convertir une énergie de combustion en une énergie électrique. La pile retenue dans notre application est une pile à membrane échangeuse de protons (Proton Exchange Membrane Fuel Cell) d'une puissance brute de 5kW. Elle présente l'avantage de fonctionner à basses températures, entre 30 et 90°C, d'avoir un électrolyte de type solide et de posséder une dynamique de puissance importante.

Le rendement d'un GE à PAC hydrogène-oxygène est le produit de divers rendements [5] [6] :

$$\eta_{\text{GE PAC}} = \eta_{\text{rév}} \times \eta_u \times \eta_f \times \eta_m \times \eta_s$$

■ $\eta_{\text{rév}}$ est le rendement énergétique maximal. Il correspond au rapport entre le travail maximal théorique fourni par une pile fonctionnant de manière réversible W_{max} et la variation d'enthalpie ΔH au cours de la réaction. Le travail fourni par une pile correspond au déplacement des ions et des électrons entre les deux niveaux de potentiel des électrodes. Ce travail est dit maximal lorsque les irréversibilités de la pile sont négligées et il est égal à la variation d'enthalpie libre ΔG au cours de la réaction.



$$\eta_{\text{rév}} = \frac{W_{\text{max}}}{\Delta H} = \frac{\Delta G}{\Delta H} = \frac{237}{285} = 83\%$$

à 25°C et si l'eau est obtenue sous forme liquide.

La tension maximale de la pile en circuit ouvert E_{\max} s'exprime alors par :

$$E_{\max} = \frac{\Delta G}{nF} = \frac{237.10^3}{2 \times 96500} = 1,23V$$

à 25°C et si l'eau est obtenue sous forme liquide.

n : nombre d'électrons échangés

F : charge d'une mole d'électrons (en C)

Cette tension maximale de la pile diminue lorsque la température augmente.

■ η_u est le rendement de tension. La tension d'une pile en fonctionnement est dans la réalité toujours inférieure à la tension E_{\max} , du fait de l'irréversibilité des réactions, de défauts d'alimentation en réactifs des électrodes et des résistances qui s'opposent au passage des charges électriques au sein de l'électrolyte et dans les électrodes. Si la pile fonctionne avec une force électromotrice de 0,7V, le rendement de tension sera :

$$\eta_u = \frac{0,7}{1,23} = 57\%$$

La courbe de polarisation, ou caractéristique tension-courant d'une cellule, constitue une image du rendement de tension.

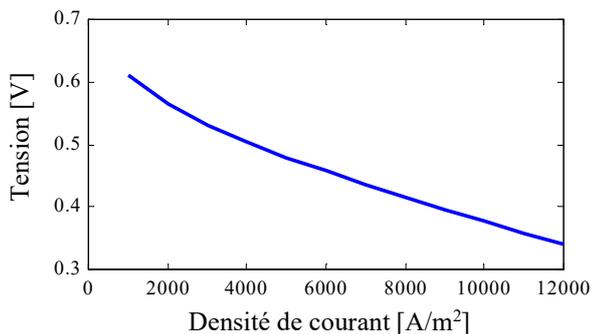


Figure 12 : Allure de la caractéristique tension-courant d'une cellule de la pile
Pression de l'air : 1,5 bar
Température : 70°C

Les pertes d'activation témoignent de la difficulté avec laquelle les échanges électroniques se réalisent au niveau de l'interface électrode-électrolyte. Ces pertes sont plus importantes à la cathode, lieu de la réduction de l'oxygène.

Les pertes ohmiques sont principalement localisées dans la membrane. Mais, aux fortes densités de courant, ce type de pertes devient également significatif dans les électrodes et à leur jonction.

D'autres limitations de potentiel, ou surtensions, sont dues à l'accumulation d'eau dans les pores des électrodes (noyage). La circulation des réactifs vers les sites de réaction s'en trouve gênée. D'autre part, dans la zone active, les gaz consommés sont dissous dans l'eau de l'électrolyte. Leur résistance à la diffusion doit être prise en compte pour de fortes consommations.

Dans notre modèle, la courbe de polarisation est fixée une fois pour toute, pour toute la durée d'une simulation et ne varie pas en fonction de paramètres tels que la pression et la température.

■ η_f est le rendement faradique. Il permet de tenir compte du fait que le nombre d'électrons effectivement obtenu par mole de combustible ou de comburant consommée n'est pas toujours conforme aux calculs théoriques. Du côté anodique, on considère généralement que deux électrons sont obtenus par mole d'hydrogène consommée et donc : $\eta_f = 1$.

■ η_m est le rendement de matière. Il est lié au taux de combustible fourni en excès à la pile pour prévenir tout déficit éventuel en réactifs susceptible de dégrader les performances. Le rendement de matière est habituellement proche de 95%.

■ η_s est le rendement du système. Une partie de la puissance brute délivrée par la pile est nécessaire au fonctionnement de ses auxiliaires (ventilateurs, circuit de refroidissement, valves...).

$$\eta_s = \frac{P_{\text{nette}}}{P_{\text{brute}}} = \frac{P_{\text{brute}} - P_{\text{aux}}}{P_{\text{brute}}}$$

Les principaux organes auxiliaires, qui vont consommer une partie de l'énergie brute délivrée par la pile, sont les suivants [7] :

- Un compresseur dont la fonction est d'amener de l'air à la cathode, à une pression de 1,5bar. Nous considérons que le rendement du compresseur est constant et qu'il est égal à 0,8. Le travail de compression (adiabatique) est calculé de la manière suivante :

$$W_{\text{compr}} = n R T \frac{\gamma}{\gamma - 1} \left(\left(\frac{P_1}{P_2} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}} - 1 \right)$$

où :

n est la quantité d'air compressé [mol/s]

P_1 la pression atmosphérique

$P_2 = 1,5\text{bar}$

$R = 8,314\text{J/mol/K}$

$T = 303\text{K}$

$\gamma = 1,4$

- Une pompe destinée à faire circuler le fluide (eau) dans le circuit de refroidissement de la pile (consommation : 25W).

- Un ventilateur situé sur le radiateur par lequel est évacuée la chaleur transportée par le circuit de refroidissement (14W).

On suppose que la pompe et le ventilateur sur le radiateur du circuit de refroidissement fonctionnent en permanence. Dans la réalité, ces auxiliaires se déclencheraient plutôt en thermostat suivant la température de la pile.

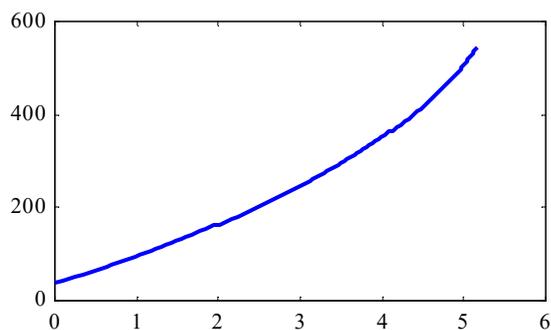


Figure 13 : Puissance absorbée par les auxiliaires [W] en fonction de la puissance brute délivrée par la pile [kW]

Le calcul de la consommation (en g/s) en hydrogène s'effectue à partir du courant débité par la pile :

$$\text{cons}_{\text{H}_2} = \frac{NIM_{\text{H}_2}}{2F}$$

N : nombre de cellules en séries

I : courant traversant les cellules (en A)

M_{H_2} : masse molaire du dihydrogène (2 g/mol)

F : charge d'une mole d'électrons (96500 C)

Dimensionnement de la pile

Les quatre principaux facteurs intervenant dans le dimensionnement de la pile sont :

- sa puissance maximale,
- sa courbe de polarisation,
- le nombre de cellules élémentaires mises en série,
- sa densité de puissance.

La puissance brute maximale délivrée par la pile est de l'ordre de 5kW.

La densité de courant à laquelle va opérer la pile lorsqu'elle fournira sa puissance maximale est ensuite choisie : 12000A/m², pour une tension de cellule valant 0.34V. La densité de puissance est donc de 408mW/cm² en ce point de fonctionnement. On en déduit la surface active totale de la pile :

$$S_{\text{active_totale}} = \frac{5}{408} = 1,225\text{m}^2$$

Le choix d'une tension de fonctionnement égale à 48V a été effectué de manière à limiter l'empilement de cellules dans la pile, pour des raisons technologiques et de coût. Cette tension peu élevée permet également de réduire le nombre de supercondensateurs à mettre en série. De plus, 48V est une tension standard pour les moteurs.

La tension fixe le nombre de cellules élémentaires N_{cellule} à mettre en série. On veut que, quel que soit le point de fonctionnement, la tension aux bornes de la pile ne soit pas inférieure à 48V de façon à ne pas atteindre la limite en courant du GMP, fixée à 100A. On a donc :

$$N_{\text{cellule}} = \frac{48}{0,34} \approx 140$$

Compte tenu du nombre relativement important de cellules, la pile pourra être scindée en deux ou trois stacks.

La surface active d'une cellule vaut donc :

$$S_{\text{active_cellule}} = \frac{1,225}{140} \approx 90\text{cm}^2$$

3.3.3. Les supercondensateurs

Les supercondensateurs ou condensateurs à double couche sont des dispositifs de stockage d'énergie intermédiaires entre les accumulateurs électrochimiques et les condensateurs diélectriques. Pour le même volume, la capacité des supercondensateurs est environ 100 fois plus élevée que celle des condensateurs diélectriques traditionnels. Ils peuvent avoir une puissance spécifique instantanée 100 fois plus élevée que celle des batteries, mais leur densité d'énergie est en contrepartie environ 20 à 50 fois plus faible. Ces supercondensateurs peuvent être utilisés de façon modulée. Ils fournissent une puissance de soutien et de pic pour les applications industrielles diverses et notamment pour améliorer les performances des véhicules électriques purs ou hybrides.

Les supercondensateurs développés par Maxwell-Matsushita-Siemens et basés sur la technologie des électrodes métal/carbone associées à un électrolyte organique non aqueux offrent une densité d'énergie et une densité de puissance pouvant atteindre respectivement 10Wh/kg et 10kW/kg. Leurs temps de décharge varient entre 0.3s et 60s. Quant à leur durée de vie, elle peut excéder 500000 cycles de charge et décharge. La faible tension maximale de 2.3V aux bornes d'un élément possédant une capacité de 2700F et une résistance interne de 0.85mΩ à 25°C implique que l'on soit souvent obligé de mettre un nombre important d'éléments en série dans le cas d'applications véhicule électrique. Il existe d'ailleurs un module intégrant 28 éléments de 2700F et délivrant une tension nominale de 56V. Ce module dispose d'un circuit électronique (Individual Cell Equalizer) destiné à l'équilibrage des tensions entre les différents éléments du module. Il permet d'éviter toute surtension aux bornes d'un élément et de ne pas décharger celui-ci en dessous de la moitié de sa tension nominale. 75% de l'énergie totale contenue dans un élément peut ainsi être récupérée [8].

Le dimensionnement du lot de supercondensateurs est effectué en fonction de l'importance et de la durée des pics de puissance qu'ils devront fournir (environ 6kW pendant quelques secondes).

Nombre de supercondensateurs : $48/2.3 \approx 20$

Capacité totale du lot : $2700/20 = 135\text{F}$

Résistance interne du lot : $0.001 \times 20 = 0.02\Omega$

Les supercondensateurs sont modélisés par une tension à vide mise en série avec une résistance interne.

4. GESTION DE L'ENERGIE

La stratégie mise en oeuvre 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 de manière à ce que le véhicule puisse, le plus souvent possible, être en mesure de soutenir une éventuelle accélération franche. Remarque : le fait de ne pas trop décharger les supercondensateurs permet en outre de limiter les pertes dans le convertisseur servant d'interface avec le GE à PAC.

Les supercondensateurs récupèrent l'énergie de freinage mais ils sont aussi rechargés par le GE à PAC. Celui-ci doit donc délivrer une puissance égale à la somme de deux puissances :

- celle requise par le GMP,
- une puissance additionnelle (positive ou négative) destinée à maintenir un état de charge des supercondensateurs proche de 75%.

Cette puissance additionnelle est déterminée comme suit :

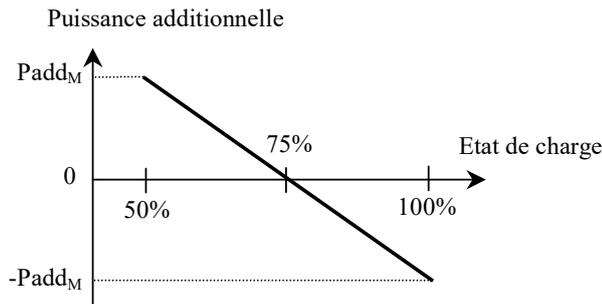


Figure 14 : Calcul de la puissance additionnelle

Ainsi, lorsque l'état de charge des supercondensateurs vaut 75%, le GE à PAC ne fournit de la puissance qu'au GMP.

Le choix de la variable P_{add_M} influe sur la consommation en hydrogène. Celle-ci sera d'autant plus basse que P_{add_M} sera moins élevée. Mais pour des faibles valeurs de P_{add_M} , le véhicule sera moins souvent capable de répondre à certaines attentes du conducteur (forte accélération par exemple).

5. SIMULATION

5.1. Première simulation

La simulation de la «Fig. 15» est effectuée sur deux cycles urbains successifs. L'état de charge final des supercondensateurs est égal à leur état de charge initial (70%). Les différents paramètres liés à la stratégie de gestion de l'énergie décrite ci-dessus ont été choisis de manière à ce que le GE à PAC fonctionne à charge partielle ($200W < P_{GE \text{ à PAC}} < 1500W$). Ce choix peut faire l'objet

d'une optimisation visant à réduire la consommation en hydrogène.

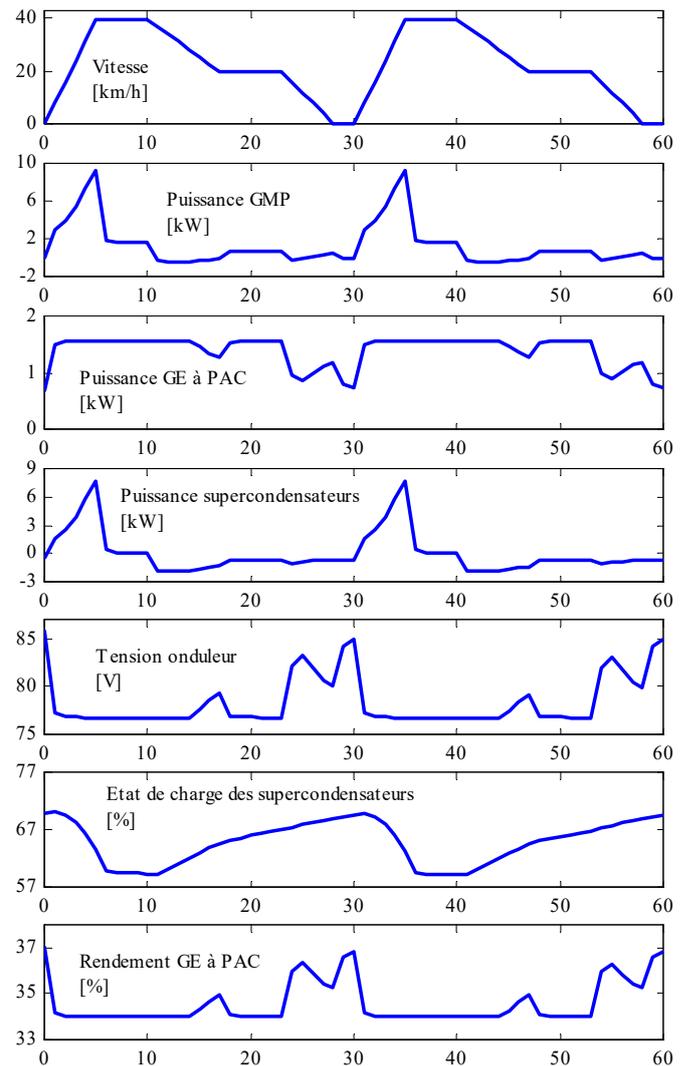


Figure 15 : Première simulation réalisée

La distance parcourue est de 374m et la consommation en hydrogène de 1,5g ($\Rightarrow 0,25\text{km/g}$).

5.2. Seconde simulation

Une seconde simulation est effectuée sur un profil de mission différent «Fig. 16».

L'état de charge initial des supercondensateurs n'étant que de 60%, lors de la première accélération, le GE à PAC est contraint de fonctionner quelques secondes à pleine puissance : le rendement du GE tombe alors à 21%. A cet instant, la tension aux bornes de l'onduleur est minimale (48V). Par la suite, le GE à PAC se remet à fonctionner à charge partielle. Une partie de la puissance qu'il délivre sert à recharger le lot de supercondensateurs. L'état de charge de celui-ci tend vers 75%, conformément à la stratégie de gestion de l'énergie choisie.

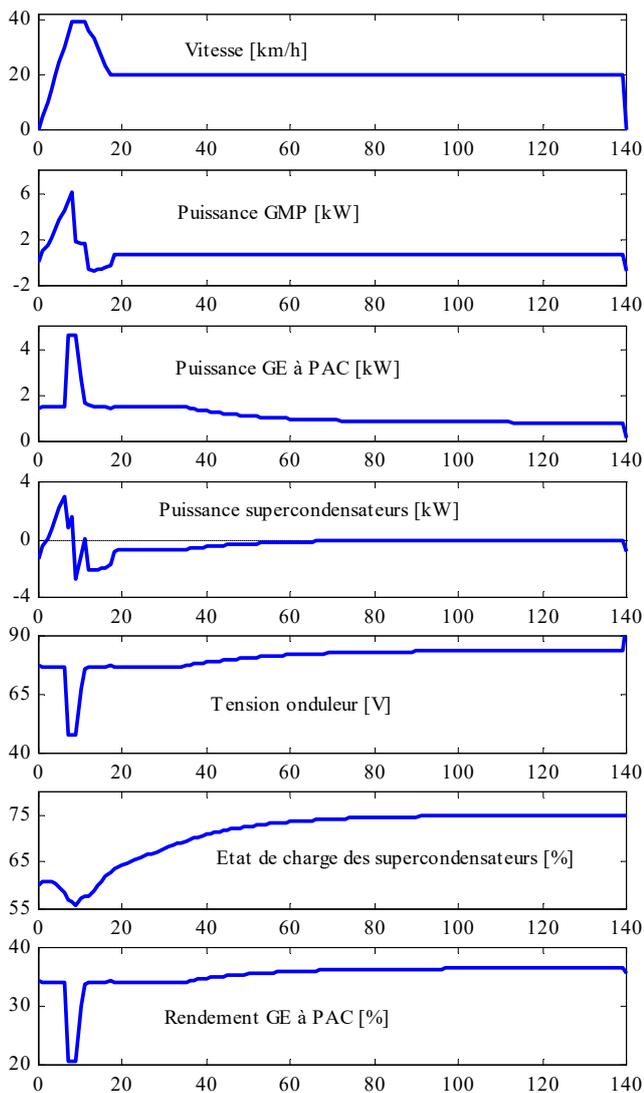


Figure 16 : Seconde simulation réalisée

6. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Le travail réalisé constitue une première étape dans le développement d'un outil d'aide à la conception de chaînes de traction de véhicule électrique à pile à combustible. Les résultats de simulation servent avant tout à montrer la faisabilité du projet et l'intérêt de la démarche choisie. Dans la suite de notre travail, nous souhaitons étudier d'autres architectures de chaînes de traction, constituant des alternatives à celle présentée dans cet article. Nous souhaitons aussi utiliser une modélisation plus fine du GE à

PAC, élaborée à partir de résultats donnés par des modèles basés sur la description de mécanismes élémentaires régis par les lois de la physique. Nous avons également pour objectifs de compléter la simulation par la modélisation du hacheur servant d'interface entre le GE à PAC et les supercondensateurs ainsi que d'optimiser la stratégie de gestion de l'énergie. Une validation sur banc de test devra finalement être effectuée.

7. REFERENCES

- [1] DENIS CANDUSSO
Le véhicule électrique multisources.
Rapport de DEA INPG, 1998
- [2] ADVISOR – Advanced Vehicle Simulator
National Renewable Energy Laboratory – DOE USA
<http://www.ctts.nrel.gov/analysis/>
- [3] CHRISTIAN MENU
Machines synchrones à fem trapézoïdales : autopilotage et contrôle de couple numériques. Etude et simulation de différentes stratégies de commande.
Thèse INPG, 1989
- [4] XINXIANG YAN, DEAN PATTERSON
Improvement of drive range, acceleration and deceleration performance in an electric vehicle propulsion system.
30th Annual IEEE - PESC 1999 - Volume2 - p638 à 643
- [5] MICHEL PRIGENT
Les piles à combustible, état du développement et des recherches en cours à l'aube de l'an 2000.
Institut français du pétrole, 1997
- [6] J.H. LEE, T.R. LALK
Modeling fuel cell stack systems.
Journal of Power Sources 75 (1998) 229-241
- [7] BRUCE LIN
Conceptual design and modeling of a fuel cell scooter for urban asia.
Thesis of Master of science in engineering
Princeton University, 1999
<http://www.spinglass.net/scooters/>
- [8] EMMANUEL ARNAUD
Dimensionnement, montage et mise en service d'un hacheur deux quadrants à IGBT pour le système de stockage d'énergie électrique d'un système d'entraînement hybride pour bus de transport urbain.
Rapport de DEA INPG, 1999