



**HAL**  
open science

## Modélisation, contrôle et simulation d'un système pile à combustible destiné à une application stationnaire

Denis Candusso, Ianko Valero, Aurélien Walter, Seddik Bacha, Elisabeth Rullière

### ► To cite this version:

Denis Candusso, Ianko Valero, Aurélien Walter, Seddik Bacha, Elisabeth Rullière. Modélisation, contrôle et simulation d'un système pile à combustible destiné à une application stationnaire. Colloque Génie Electrique, Vie et Qualité (GEVIQ 2002), Jun 2002, Marseille (13), France. pp.139-144. hal-04517256

**HAL Id: hal-04517256**

**<https://hal.science/hal-04517256>**

Submitted on 22 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, contrôle et simulation d'un système pile à combustible destiné à une application stationnaire

Denis Candusso, Ianko Valero, Aurélien Walter  
Seddik Bacha, Elisabeth Rullière

Laboratoire d'Electrotechnique de Grenoble  
UMR 5529 INPG/UJF – CNRS  
ENSIEG BP 46  
38402 Saint Martin d'Hères Cedex France  
Email : candusso@leg.ensieg.inpg.fr

**Résumé** – Dans cet article, nous nous intéressons au mode de connexion, via une interface électronique de puissance, d'une pile à combustible (PAC) au réseau basse tension. La topologie étudiée est basée sur l'association hacheur élévateur - onduleur de tension à MLI.

Les modèles du groupe électrogène à PAC, les modèles des convertisseurs et du réseau sont explicités. Pour la PAC, un modèle statique a été utilisé ; sa courbe de polarisation (tension de pile en fonction du courant) est calculée à partir d'une relation semi-empirique liant la densité de courant, les pressions en oxygène et hydrogène, la température du stack. Quant aux convertisseurs, les modèles topologiques et moyens ont été mis en œuvre de façon à pouvoir d'une part effectuer les réglages, observer le comportement du système durant les transitoires et en régime permanent, et d'autre part étudier les effets des perturbations hautes fréquences. Deux algorithmes ont été développés pour faire fonctionner le groupe électrogène à PAC, suivant les besoins, soit à son maximum de puissance, soit à son rendement maximum.

L'onduleur triphasé est commandé grâce à deux boucles de contrôle imbriquées. La première régule le courant au moyen d'un correcteur résonnant. La seconde est basée sur un contrôle des puissances active et réactive dans le repère de Park. Les simulations ont été réalisées avec le solveur Matlab-Simulink.

**Mots clés:** pile à combustible, électronique de puissance, commande, modélisation, simulation

## I. INTRODUCTION

Ces dernières années, des projets expérimentaux de générateurs à pile à combustible, d'une puissance de 250kW environ, visant à produire de l'électricité ainsi que de la chaleur ont vu le jour en Europe (Chelles, Berlin...). Ce développement s'explique par le fait que les verrous technologiques concernant les PAC sont levés petit à petit mais aussi par la prise en compte croissante des considérations environnementales (réduction des émissions de CO<sub>2</sub> par exemple), par l'apparition d'une législation nouvelle plus favorable à la production décentralisée d'énergie. D'autres facteurs encore peuvent jouer en faveur de la PAC comme la recherche de l'indépendance et de la diversification énergétique, l'intérêt offert par la cogénération, la possibilité de découpler dans le temps consommation et production d'électricité à partir d'énergies renouvelables (éolien).

## II. TOPOLOGIE

La structure retenue associe un groupe électrogène à pile à combustible (GE à PAC), un hacheur élévateur et un onduleur de tension [2].

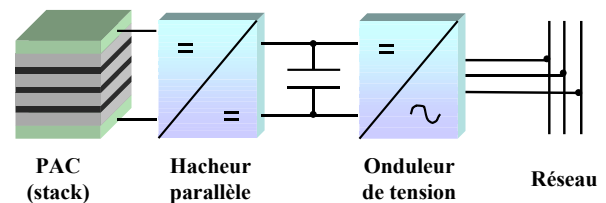


Figure 1. Topologie

Le hacheur élévateur permet d'élever la tension de pile et de contrôler la tension du bus continu. L'onduleur triphasé permet quant à lui de générer des courants sinusoïdaux triphasés.

## III. MODELISATION

### A. Pile à combustible

Un GE à PAC se compose d'une pile et des éléments auxiliaires permettant le fonctionnement de cette dernière. La fonction du groupe électrogène est de convertir une énergie de combustion en une énergie électrique [6]. La pile retenue dans notre application est une pile à membrane échangeuse de protons (Proton Exchange Membrane Fuel Cell) d'une puissance brute de 330kW. Ce type de pile 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.

La PAC se présente sous la forme d'un empilement de cellules, communément appelé stack. Chaque cellule comporte une anode et une cathode. La courbe de polarisation est une image du rendement de tension de la cellule.

Les différentes pertes dont les cellules sont le siège sont les suivantes. Les pertes d'activation tout d'abord 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 elles 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.

Le modèle utilisé ici est statique ; cela signifie que le circuit électrique équivalent de la PAC correspond à une source de tension mise en série avec une résistance.

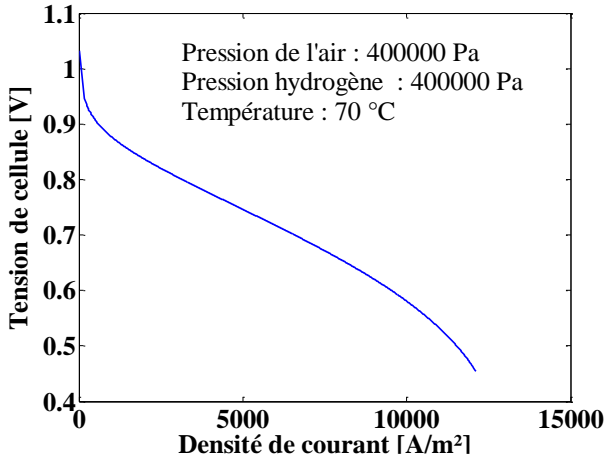


Figure 2. Exemple de courbe de polarisation [7]

La différence de potentiel  $V$  aux bornes d'une cellule est donnée par l'équation:

$$V = E - V_{act} - R I \quad (1)$$

$E = E_0 + \frac{RT}{2F} \ln(P_{H_2} \cdot P_{O_2}^{1/2})$  correspond au potentiel thermodynamique de la réaction (équation de Nernst).  $E_0$  est le potentiel de référence de la réaction ; il varie en fonction de la température. A  $T=298K$  et  $P=1E5Pa$ ,  $E_0 = 1,23V$ .

Le terme  $V_{act}$  correspond aux chutes de tension (ou surtensions) d'activation [V].

Le terme  $R I$  exprime la chute de tension due à la résistance de la membrane et des électrodes.

La puissance maximale du stack est de 330kW. Sa tension varie entre 600V (à vide) et 300V. La consommation des auxiliaires (compresseur, pompe...) est calculée en fonction de la puissance délivrée par le stack [3].

### B. Le Hacheur élévateur

Le hacheur élévateur permet de réaliser l'adaptation de tension entre la tension de PAC  $E$  et le bus continu  $V_0$ .

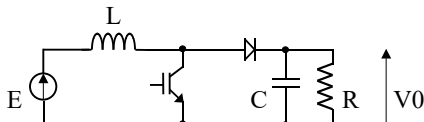


Figure 3. Circuit électrique du hacheur élévateur

Le modèle topologique ou instantané du hacheur nous est donné par le système d'équations suivant:

$$\begin{cases} L \frac{di}{dt} = E - V_0(1-u) \\ C \frac{dV_0}{dt} = i(1-u) - \frac{V_0}{R} \end{cases} \quad (2)$$

La fonction de commutation notée  $u$  vaut soit 0, quand l'interrupteur est commandé à l'ouverture, soit 1 quand l'interrupteur est commandé à la fermeture.

Le modèle moyen du hacheur est obtenu en remplaçant la variable  $u$  par le rapport cyclique  $\alpha$ , qui prend une valeur comprise dans l'intervalle  $[0,1]$ .

Le contrôle du courant est effectué grâce à un correcteur de type hystérésis. La largeur de bande de ce dernier (10A) et la valeur de l'inductance  $L$  (10mH) ont été choisies de manière à ce que la fréquence maximale de commutation de l'interrupteur (technologie IGBT) ne dépasse pas 4kHz. Quant à la valeur du condensateur  $C$  (1mF), elle est choisie de manière à ce que l'ondulation de la tension sur le bus continu ne soit pas trop importante.

Une tension de bus  $V_0$  de 1500V a été choisie de façon à assurer une poursuite idéale des courants de référence.

### C. L'Onduleur

Les courants de phase  $i_1$ ,  $i_2$  et  $i_3$  sont contrôlés au moyen d'un onduleur de tension fonctionnant en MLI (modulation de la largeur d'impulsion) à une fréquence de 4kHz.

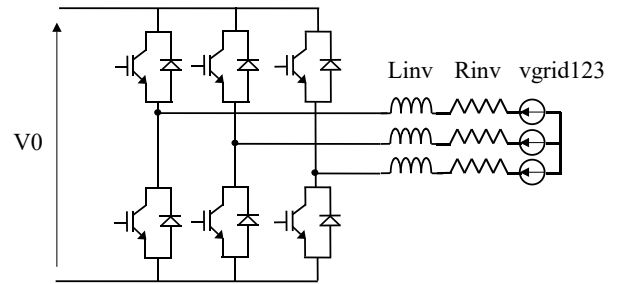


Figure 4. Onduleur

Les courants de phase sont calculés grâce à la relation (3):

$$\begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \end{bmatrix} = \frac{1}{R_{inv} + s L_{inv}} \left( \frac{V_0}{6} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} v_{grid1} \\ v_{grid2} \\ v_{grid3} \end{bmatrix} \right) \quad (3)$$

avec  $u_1, u_2, u_3 = \pm 1$ .

$V_{grid}$  est la valeur efficace de la tension réseau (230V),  $R_{inv}$  et  $L_{inv}$  sont respectivement la résistance et l'inductance d'une phase ( $L_{inv} = 10 \text{ mH}$ ,  $R_{inv} = 0,1\Omega$ ).

La figure 5 représente le contrôle du transfert de puissance. Les courants de référence sont calculés dans le repère  $dq$  par une boucle externe, à partir des puissances active et réactive de consigne.

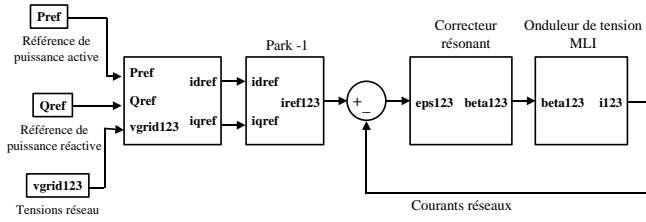


Figure 5. Diagramme du contrôle de transfert de puissance

Les courants de référence, dans le repère dq, sont calculés de la manière suivante :

$$i_{dref} = \frac{P_{ref} V_d - Q_{ref} V_q}{3(V_d^2 + V_q^2)} \quad (4)$$

$$i_{qref} = \frac{Q_{ref} V_d + P_{ref} V_q}{3(V_d^2 + V_q^2)} \quad (5)$$

Le point de fonctionnement de la pile étant fixé (courant délivré constant), la puissance active de référence de l'onduleur  $P_{ref}$  est calculée en asservissant la tension du bus continu à 1500V, à l'aide d'un correcteur de type PI.

Dans les boucles de courant, le correcteur utilisé est un correcteur de type résonant. Ce correcteur possède une fonction de transfert dont le module est très élevé à la fréquence de 50Hz, et faible pour toutes les autres fréquences (figure 7).

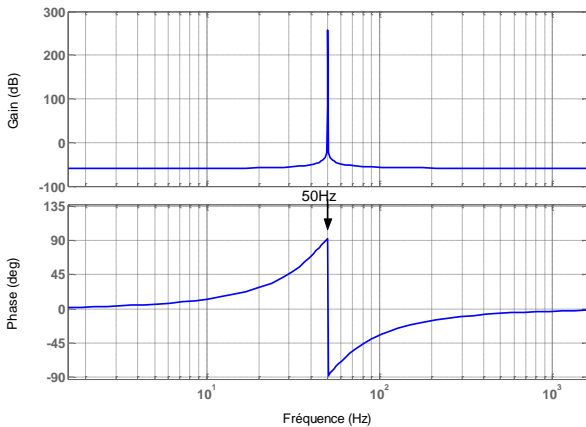


Figure 7. Diagramme de Bode du correcteur résonant

Si  $C_1(s)$  représente la fonction de transfert du correcteur, la fonction de transfert simplifiée du système en boucle fermée  $S(s)$  peut s'écrire:

$$S(s) = \frac{C_1(s)A(s) \frac{V_0}{2}}{1 + C_1(s)A(s) \frac{V_0}{2}} \quad (6)$$

avec  $A(s) = \frac{1}{R_{inv} + s L_{inv}}$

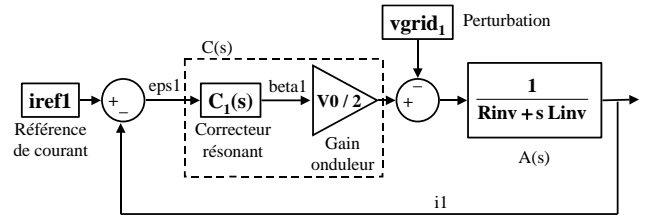


Figure 6. Schéma simplifié de la boucle de courant

À la fréquence de 50Hz, le système bouclé présente un gain unitaire et une phase nulle (figure 8).

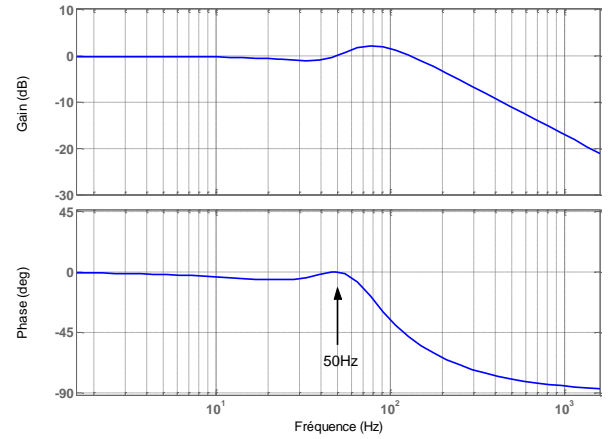


Figure 8. Diagramme de Bode de l'asservissement de courant en boucle fermée

Vue de la perturbation, la fonction de transfert du système s'écrit:

$$D(s) = \frac{-A(s)}{1 + C_1(s)A(s) \frac{V_0}{2}} \quad (7)$$

$D(s)$  tend vers zéro pour  $f = 50\text{Hz}$  ; les effets du signal de perturbation, dont la fréquence est proche de 50Hz, sont ainsi fortement amoindris.

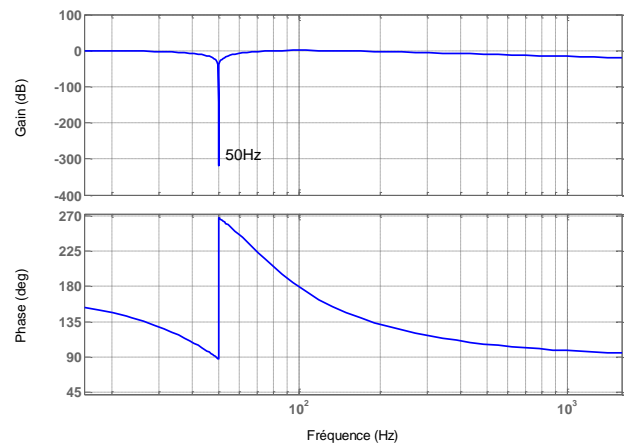


Figure 9. Diagramme de Bode de l'asservissement de courant vu de la perturbation

La fonction de transfert  $C(s)$  est la suivante:

$$C(s) = C_1(s) \frac{V_0}{2} = \frac{c_0 + c_1s + c_2s^2}{\omega_p^2 + s^2} \quad (8)$$

Les coefficients  $c_0$ ,  $c_1$  et  $c_2$  sont calculés grâce à la méthode de Naslin [9]. Le polynôme caractéristique  $\Delta$  permettant de dimensionner le correcteur est issu de l'équation (6):

$$\Delta(s) = c_0 + c_1s + c_2s^2 + (R_{inv} + L_{inv}s)(\omega_p^2 + s^2) \quad (9)$$

Les coefficients  $c_0$ ,  $c_1$  et  $c_2$  sont calculés par identification du polynôme  $\Delta$  à celui de Naslin, qui est d'ordre trois:

$$\begin{cases} c_0 = L_{inv} \omega_0^3 \alpha^3 - R_{inv} \omega_p^2 \\ c_1 = L_{inv} \omega_0^2 \alpha^3 - L_{inv} \omega_p^2 \\ c_2 = L_{inv} \omega_0^2 - R_{inv} \end{cases} \quad (10)$$

avec:  $\omega_p = 2 \times \pi \times 50$ ,  $\omega_0 = \frac{2.2}{\pi} \omega_p$ ,  $\alpha = 2$

#### D. Réseau

Le réseau (230V – 50Hz) est modélisé par un réseau idéal (source de tension triphasée parfaite) mis en série avec une résistance ( $R_{grid} = 135m\Omega$ ) et une inductance ( $L_{grid} = 2.4mH$ ). Ces deux derniers éléments modélisent un câble souterrain connecté à un transformateur 400V – 20kV, lui même relié au réseau.

### IV. STRATEGIE DE COMMANDE DE LA PAC

On cherche à faire délivrer à la pile une puissance constante. Le point de fonctionnement de la PAC peut être choisi de manière à ce que la PAC délivre toute sa puissance ou bien encore de manière à ce qu'elle fonctionne à son point de meilleur rendement. La figure 10 représente le rendement du groupe électrogène en fonction de la puissance nette délivrée par le GE à PAC [3, 4] et le tableau I explique comment le point de fonctionnement correspondant au rendement maximal du système est atteint.

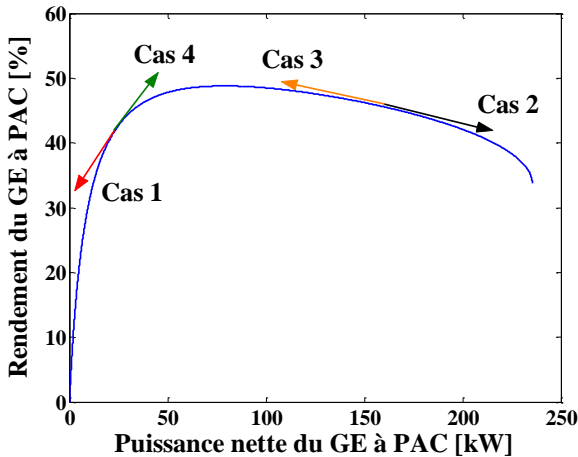


Figure 10. Rendement du groupe électrogène

TABLEAU I  
RECHERCHE DU RENDEMENT MAXIMAL

	$\frac{dP_{GE \rightarrow PAC}}{dt}$		
		< 0	> 0
$\frac{d\eta_{GE \rightarrow PAC}}{dt}$			
< 0		Augmenter i (Cas 1)	Diminuer i (Cas 2)
> 0		Diminuer i (Cas 3)	Augmenter i (Cas 4)

Dans le but de tester la topologie définie plus haut et la commande des différents convertisseurs, un profil de fonctionnement test est défini:

- A) La tension du réseau augmente de 20%,
- B) Les pressions d'hydrogène et d'oxygène décroissent,
- C) La consigne de puissance réactive donnée à l'onduleur augmente de 0 à 100kVAR.

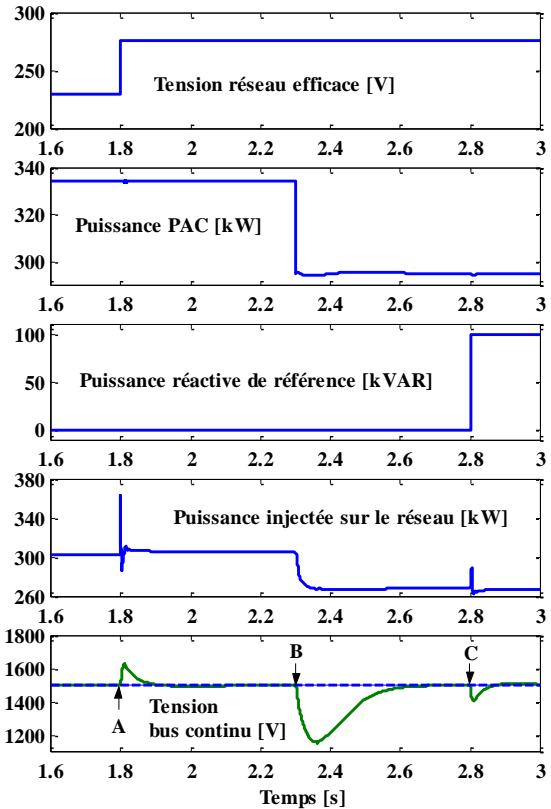


Figure 11. Contrôle de la tension du bus continu

La simulation a été faite ici avec un réseau triphasé idéal. La réponse du système aux différentes perturbations s'effectue en 0,2s environ.

### V. INTERACTION ENTRE LE RESEAU ET LA PAC

Deux types de connexion au réseau sont envisagés.

### A. Connexion directe au réseau

Dans ce cas, les courants de sortie de l'onduleur peuvent être régulés au moyen d'un correcteur résonnant.

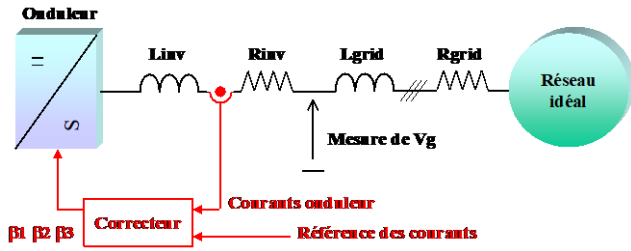


Figure 12. Schéma de la connexion directe

### B. Connexion au réseau via un filtre LC

Dans ce cas, un filtre est inséré entre l'onduleur et le réseau. La tension de sortie est contrôlée. Cette configuration permet de réduire les harmoniques hautes fréquences, dus au découpage, sur les courants de phase (Igrid) et sur la tension de sortie (Vg).

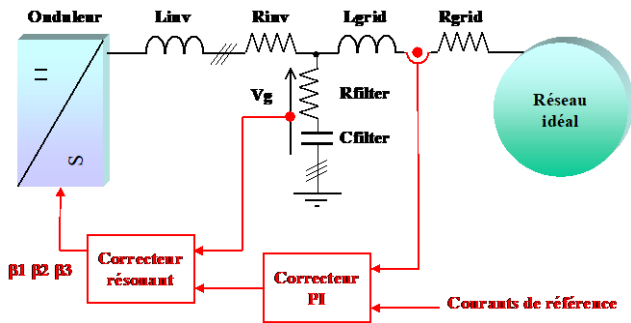


Figure 13. Connexion au réseau via un filtre LC

Le dimensionnement du filtre, composé de l'inductance  $L_{inv}$  et de la résistance  $R_{filter}$ , s'effectue en prenant en compte des considérations de coût et en cherchant à minimiser la puissance réactive. La valeur choisie pour la capacité  $C_{filter}$  est  $800\mu F$ .

$$f_c = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{L_{inv} C_{filter}}} = 184 \text{ Hz} \quad (11)$$

La résistance  $R_{filter}$  en série avec  $C_{filter}$  permet d'introduire un amortissement. Une valeur de  $3\Omega$  correspond à un bon compromis entre le besoin d'atténuer les oscillations et la nécessité d'avoir une bonne qualité du spectre de la tension  $V_g$ . Cette valeur permet en outre de conserver un rendement convenable dans le circuit. Dans la réalité, un couplage des condensateurs en triangle permettrait de réduire par trois la valeur des capacités dimensionnées ci-dessus.

Le courant délivré au réseau est régulé au moyen d'un correcteur type PI. Quant au contrôle de la tension de sortie de l'onduleur, il peut également être effectué au moyen d'un correcteur de type résonnant.

### C. Comparaison entre les deux types de connexion au réseau

Dans le but de calculer le taux de distorsion harmonique total (THD) des courants envoyés sur le réseau ainsi que le

THD de la tension de sortie ( $V_g$ ), les simulations sont effectuées avec les modèles topologiques.

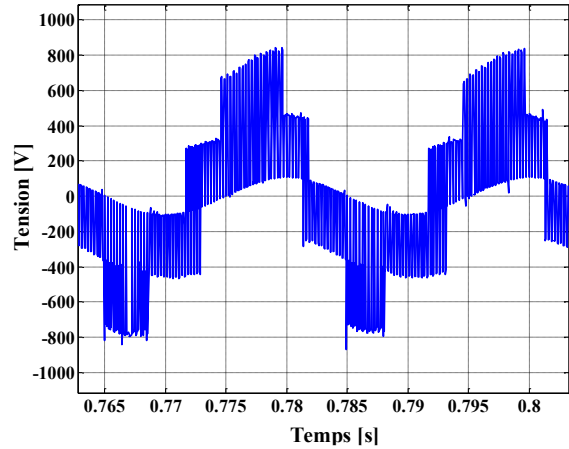


Figure 14. Allure de la tension  $V_g$  dans le cas d'une connexion directe au réseau

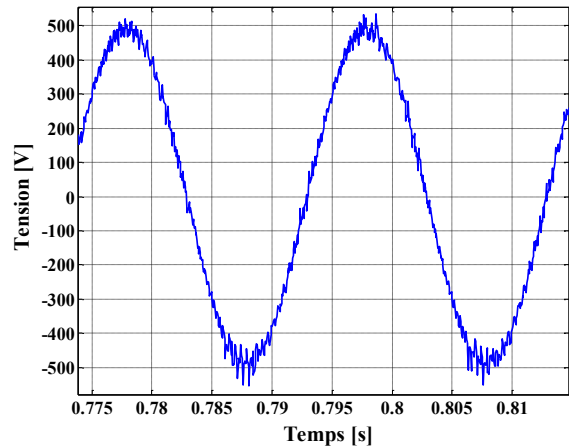


Figure 15. Allure de la tension  $V_g$  dans le cas d'une connexion au réseau via un filtre LC

Les figures 16 et 17 présentent l'analyse fréquentielle d'une tension de phase, sans filtre et avec filtre.

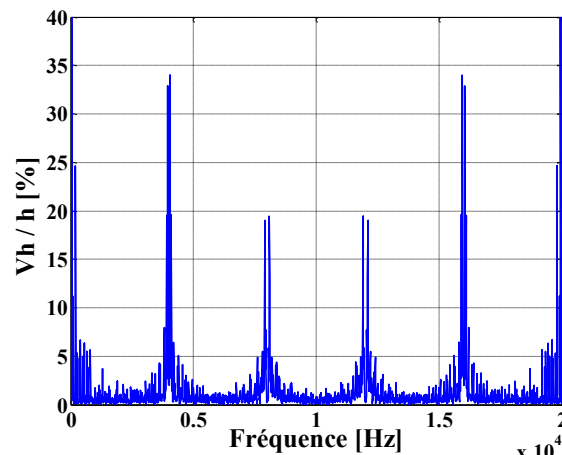


Figure 16. Spectre fréquentiel de la tension  $V_g$  dans le cas d'une connexion directe au réseau

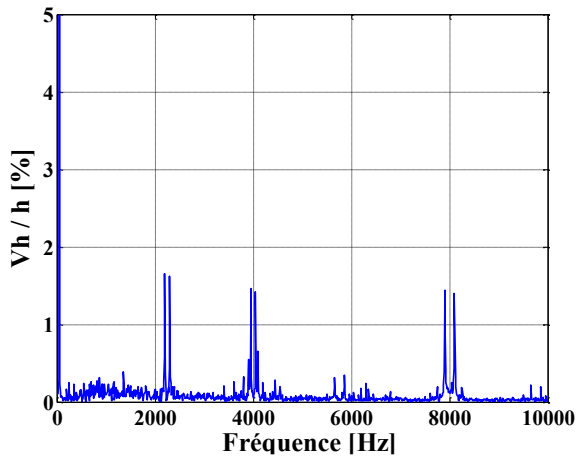


Figure 17. Spectre fréquentiel de la tension  $V_g$  dans le cas d'une connexion au réseau via un filtre

Les résultats de l'analyse fréquentielle sont récapitulés dans le tableau II.

TABLEAU II  
VALEURS DES THD DU COURANT ET DE  $V_g$

	THD Courant réseau	THD Tension $V_g$
Connexion sans filtre	6%	80%
Connexion avec filtre	1%	5%

On constate à la vue du tableau II qu'il est indispensable d'insérer un filtre entre l'onduleur et le réseau pour pouvoir respecter les normes NF-EN 50160 (THD inférieur à 8%).

## VI. CONCLUSION

L'outil de simulation développé permet d'étudier, d'un point de vue commande, la structure parallèle d'interfaçage de la PAC avec le réseau. Celle-ci, ainsi connectée, peut être utilisée par exemple comme source d'appoint destinée à délivrer de la puissance sur un réseau faible. Elle pourrait également servir à assurer la compensation d'harmoniques présents sur le réseau, dus à une charge non linéaire. Dans cet article, l'accent a été mis sur la commande des convertisseurs (hacheur et onduleur). Nous avons ainsi montré qu'il était particulièrement intéressant d'utiliser des correcteurs de

type résonnant pour asservir les grandeurs sinusoïdales. Ce type de correcteur possède en effet un très bon comportement à la fois en asservissement et en régulation. Nous avons également montré que la présence d'un filtre, entre le réseau et l'onduleur, est obligatoire si l'on souhaite respecter les normes relatives à la pollution harmonique.

Cet outil de simulation sert à présent de base au développement et à la commande d'autres topologies d'électronique de puissance constituant une alternative à celle étudiée ici.

## VII. REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier M. Frédéric Dumas de Schneider Electric Industrie SA.

## VIII. REFERENCES

- [1] A. Walter, "Modélisation de systèmes à piles à combustible", DEA INPG Génie Electrique – Grenoble, France, Sept. 2001
- [2] C. Rivas, A. Rufer, "PWM Current converter for electric energy production systems from fuel-cells", Swiss Federal Institute of Technology Lausanne, *EPE 2001 Graz*, Austria
- [3] D. Candusso, E. Rullière, P. 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* – Nov. 2000 Belfort, France - pp. 145-152
- [4] D. Candusso, E. Rullière, E. Toutain, "A fuel cell hybrid power source for a small electric vehicle", *Universities' Power Engineering Conference* - Sept 2001 Swansea, UK
- [5] D. Candusso, E. Rullière, S. Bacha, "Modelling of a Fuel Cell Hybrid Power Source for a small Electric Vehicle", *18th Electric Vehicle Symposium* – Oct. 2001 Berlin, Germany
- [6] J. Larminie, A. Dicks, "Fuel cell systems explained", Ed. Wiley
- [7] C. Michelland, Rapport de stage DEA Génie Electrique, Schneider Electric 2000
- [8] L. Zubieta, R. Bonert, *IEEE-IAS'98 Conference*, 1149-1154
- [9] J. P. Hautier, X. Guillaud, F. Vandecasteele, M. Wulveryck "Contrôle de grandeurs alternatives par correcteur résonnant", *Revue Internationale de Génie Electrique*, Vol. 2, n°1, 1999