



# **Alimentation d'une bobine supraconductrice par une pile à hydrogène**

Rafael-Antonio Linares-Lamus, Melika Hinaje, Kévin Berger

## **► To cite this version:**

Rafael-Antonio Linares-Lamus, Melika Hinaje, Kévin Berger. Alimentation d'une bobine supraconductrice par une pile à hydrogène. Jeunes Chercheurs en Génie Électrique (JCGE'2014) - SEEDS, Jun 2014, Saint-Louis, France. pp. 1-10, id. 35318. <hal-01000868>

**HAL Id: hal-01000868**

**<https://hal.science/hal-01000868v1>**

Submitted on 4 Jun 2014

**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.



HAL Authorization

# Alimentation d'une bobine supraconductrice par une pile à hydrogène

Rafael Antonio LINARES LAMUS, Melika HINAJE, Kévin BERGER

Université de Lorraine – Groupe de Recherche en Electrotechnique et Electronique de Nancy,  
2, avenue de la Forêt de Haye, 54516 Vandoeuvre-lès-Nancy, France  
[rafael-antonio.linares-lamus@univ-lorraine.fr](mailto:rafael-antonio.linares-lamus@univ-lorraine.fr)

**RESUME** – Les piles à combustible sont des convertisseurs électrochimiques d'énergie qui permettent la transformation de l'énergie chimique d'un combustible en électricité par une réaction d'oxydo-réduction. La tension d'une cellule élémentaire est généralement proche de 1 V en circuit ouvert et de l'ordre de 0,6 V dans des conditions nominales de production d'électricité. Les piles à combustible sont alors par essence des sources de basse tension, ainsi que pour les applications les plus pratiques, la gestion de l'alimentation est réalisée par des convertisseurs électroniques, ce qui permet en particulier d'augmenter la tension à des niveaux d'application habituels. Dans cet article, nous vous proposons d'utiliser cette basse tension pour une pile spécifique pour l'alimentation des bobines supraconductrices. À l'heure actuelle, ces demandes sont traitées avec l'utilisation de sources électroniques de puissance, présentant dans la plupart des cas, un énorme volume et/ou un rendement énergétique faible.

**ABSTRACT** – Fuel cells are electrochemical energy converters which allow transformation of the chemical energy of a fuel to electricity through oxide-reduction reaction. The voltage of an elementary cell is usually near 1 V in open circuit and around 0.6 V in nominal conditions of power generation. Fuel cells are then by essence low voltage sources, so that for most practical applications, power management is carried out by electronic converters, allowing in particular to rise the voltage to usual application levels. In this paper, we propose to take advantage of this low voltage for a specific application stack such as superconducting coils power supply. At present, such applications are dealt with the use of specific electronic power supplies, exhibiting in most cases a huge volume and/or a low energy yield.

**MOTS-CLES** – supraconductivité; bobine supraconductrice; densité de courant critique; source de courant contrôlée; pile à combustible court-circuitée.

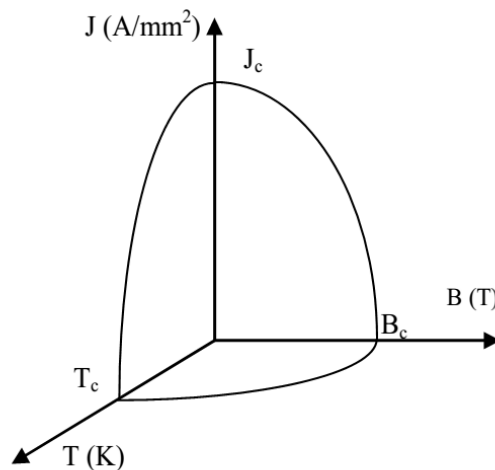
## 1. Introduction

Les piles à combustible sont des systèmes complexes qui peuvent être considérés comme sources électriques à faible tension. Des recherches préliminaires menées au GREEN (Groupe de Recherche en Electrotechnique et Electronique de Nancy) avec une pile à combustible à membrane monocellule, soit en court-circuit ou comme un système hybride avec supercondensateurs déchargés, pourraient attester le comportement comme une source de courant [1], dans lequel le courant est directement contrôlé par le débit d'hydrogène. Ce mode de fonctionnement impose que la tension de la cellule soit bien en dessous du seuil recommandé par le fabricant de la cellule. Le document vise à étudier ce mode de fonctionnement qui permet la production de courant de très haute qualité, c'est à dire sans oscillations et sous une tension très faible pour alimenter des bobines supraconductrices [2-3].

### 1.1 Une courte introduction aux fils supraconducteurs

En 1911 Kammerling Omnes a découvert par hasard la supraconductivité. Dans l'étude d'un échantillon de mercure à basse température, la mesure de la résistivité a chuté à 4,15 K. La deuxième caractéristique a été découverte en 1933 par Meissner et Ochsenfeld, c'est le diamagnétisme parfait.

Depuis ces premières découvertes, de nombreux matériaux ont été désignés pour devenir supraconducteurs. Néanmoins, il a fallu attendre le début des années 60 pour avoir une utilisation en génie électrique. Le supraconducteur à basse température NbTi a été découvert par Matthias Kunzler, à une faible température de 4,2 K. Ensuite, à la fin des années 1980, ont été découverts par Muller Berdnoz les supraconducteurs à haute température critique HTS, ceux-ci pouvant fonctionner à la température de l'azote liquide. La supraconductivité est seulement possible sous certaines conditions de température, de champ magnétique et de densité de courant. Les trois paramètres critiques  $T_c$ ,  $H_c$ ,  $J_c$ , peuvent être représentés dans un espace tridimensionnel comme sur la figure 1, où ils définissent une surface critique. Sous la surface, le matériau est à l'état supraconducteur et au-dessus, il est à l'état normal. Une autre propriété intéressante des supraconducteurs est leur densité de courant critique très élevée, il peut atteindre  $3000 \text{ A/mm}^2$ .



**Figure 1 : Surface Critique.**

Après la découverte de la supraconductivité, le principal problème est de savoir comment construire du fil supraconducteur. Le premier fil a été fait avec niobium-titane NbTi [4]. Pour de nombreuses raisons de stabilité thermique et électromagnétique, il est fait de filaments de NbTi d'un diamètre inférieur à 20 micromètres en alliage de cuivre ou plus généralement dans une matrice de cuivre. Le nombre de filaments peut être très élevé, Dans les années 90 un fil supraconducteur de 0,2 mm de diamètre a plus de 200 000 filaments supraconducteurs à l'intérieur.

Lorsque les supraconducteurs à haute température sont découverts [5], il est compliqué de fabriquer du fil car ces supraconducteurs ne sont pas métalliques, ils sont céramiques. Donc, nous avons deux façons de produire ces fils supraconducteurs. Le premier processus consiste à placer de la poudre dans un tube métallique. Ce processus est habituel pour des fils supraconducteurs BSCCO et MgB2. Dans ce cas, un fil est composé de plusieurs filaments (moins de cent dans une matrice d'argent). Dans le deuxième processus le fil est réalisé par dépôt de vapeur chimique des supraconducteurs sur un substrat. Ces procédés sont utilisés pour le fil supraconducteur YBCO. Dans cet article, nous avons utilisé un fil supraconducteur BSCCO fait par Zenenergy en Allemagne. Ces fils peuvent être utilisés dans l'azote liquide avec de bonnes propriétés, mais en fait, leurs propriétés sont meilleures à plus basse température. Par conséquent, de nombreuses applications utilisent les supraconducteurs à haute température entre 20 K. et 40 K.

Concernant les supraconducteurs, il y a beaucoup de lois constitutives, comme la loi d'Ohm pour les conducteurs classiques, qui doit relier le champ électrique à la densité de courant dans les supraconducteurs [6]. Nous présenterons deux lois: le modèle de Bean et la loi  $J^n$ . Le modèle de Bean est le représentant le plus simple des supraconducteurs à basse température critique. Dans ce modèle, le courant dans le supraconducteur ne peut prendre que deux valeurs de densité de courant critique et une valeur nulle:  $J = \pm J_c$  ou  $J = 0$ . Le second modèle est plus adapté aux supraconducteurs à haute température critique. La loi reliant la densité de courant du champ électrique est la suivante:

$$\mathbf{e}(\mathbf{J}, \mathbf{B}, T) = E_c \left( \frac{\|\mathbf{j}(\mathbf{B}, T)\|}{J_c} \right)^n \frac{\mathbf{j}(\mathbf{B}, T)}{\|\mathbf{j}\|} \quad (1)$$

Où  $J_c$  est la densité de courant critique pour une valeur arbitraire du champ électrique critique  $E_c$ . Cette valeur de la densité de courant critique, si elle n'est pas la même que dans la définition précédente, est appelée densité de courant critique d'ingénierie. La valeur du champ électrique critique est généralement choisie à 1 microvolt par mètre.

La figure 2 présente le comportement du champ électrique en fonction de la densité de courant, en relation avec les modèles considérés. La caractérisation des matériaux supraconducteurs permet de trouver la relation entre le champ électrique et la densité de courant. Le principe de mesure est très simple et consiste à mesurer la tension aux bornes d'un échantillon supraconducteur qui transporte du courant. Pour cela nous avons utilisé une alimentation spécifique faite par American Magnetics pour les applications en supraconductivité. Cette alimentation peut atteindre 300A@±4V [7] et un nanovoltmètre 2182A/E de Keithley pour la mesure d'une très faible tension aux bornes de l'échantillon supraconducteur.

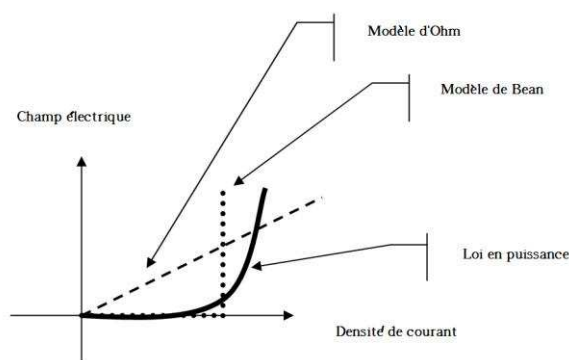


Figure 2 : Loi d'Ohm équivalent des supraconducteurs.

La figure 3 présente un exemple du ruban supraconducteur BSCCO utilisé dans la bobine. Sa caractérisation électrique est donnée pour différents champs magnétiques appliqués, figure 4.



Figure 3 : Échantillon du ruban supraconducteur (BSCCO2212) et image de la bobine supraconductrice utilisée dans l'expérience

Longueur : 24mm ---- Prise de tension : 8mm ---- Température 30 K

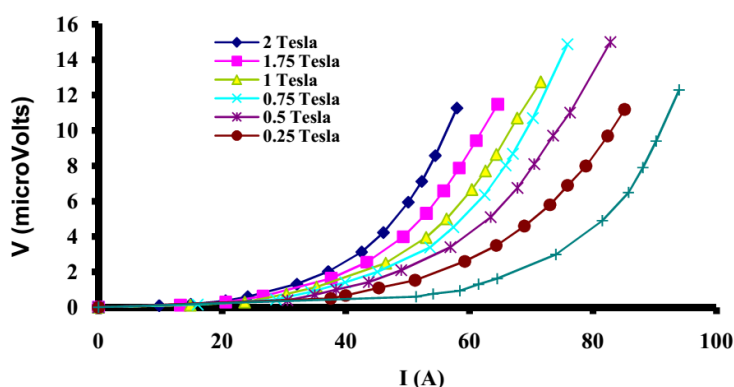


Figure 2 : Caractérisation du ruban supraconducteur.

## 1.2 Caractéristique de la Pile à combustible

Les piles à combustible à membrane sont constituées de deux compartiments d'électrodes séparés par une membrane de polymère électrolyte, empêchant le transport de gaz et d'électrons. Comme le montre la Fig. 5, les deux électrodes sont collées sur les côtés de la membrane, formant l'ensemble membrane-électrodes (MEA) d'une cellule individuelle. Les protons générés par oxydation de l'hydrogène avec de l'eau migrent vers la cathode à travers la membrane (qui présente le plus souvent une forte affinité pour l'eau) à l'anode, et ceci participe à la réduction de l'oxygène dans l'eau. Les piles

à combustible peuvent être caractérisées par la variation de la tension disponible avec la densité de courant délivrée. Cette variation dépend de plusieurs paramètres de fonctionnement tels que la température, [8] la pression [9], les débits de réactifs [10-11], l'humidification de la membrane [12], et également de la conception de la pile à combustible [13-14].

La figure 6 présente la courbe de polarisation typique d'une cellule unique comprenant la tension de circuit ouvert (OCV) et la zone de travail [15]. Le point de fonctionnement nominal est d'environ 0,6 V à 0,4-0,8 A.cm<sup>-2</sup>. Avec ces caractéristiques électriques de la bobine supraconductrice, nous souhaitons exploiter la dernière zone de la courbe de polarisation (pertes de concentration).

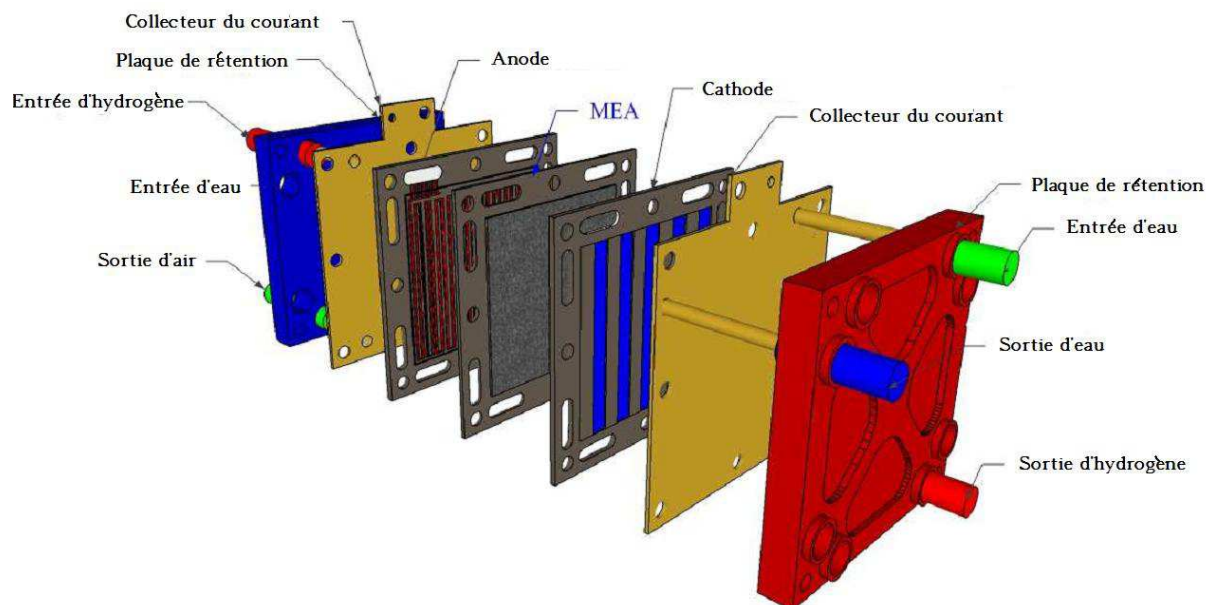


Figure 5 : Pile à combustible monocellule PEM refroidie à l'eau.

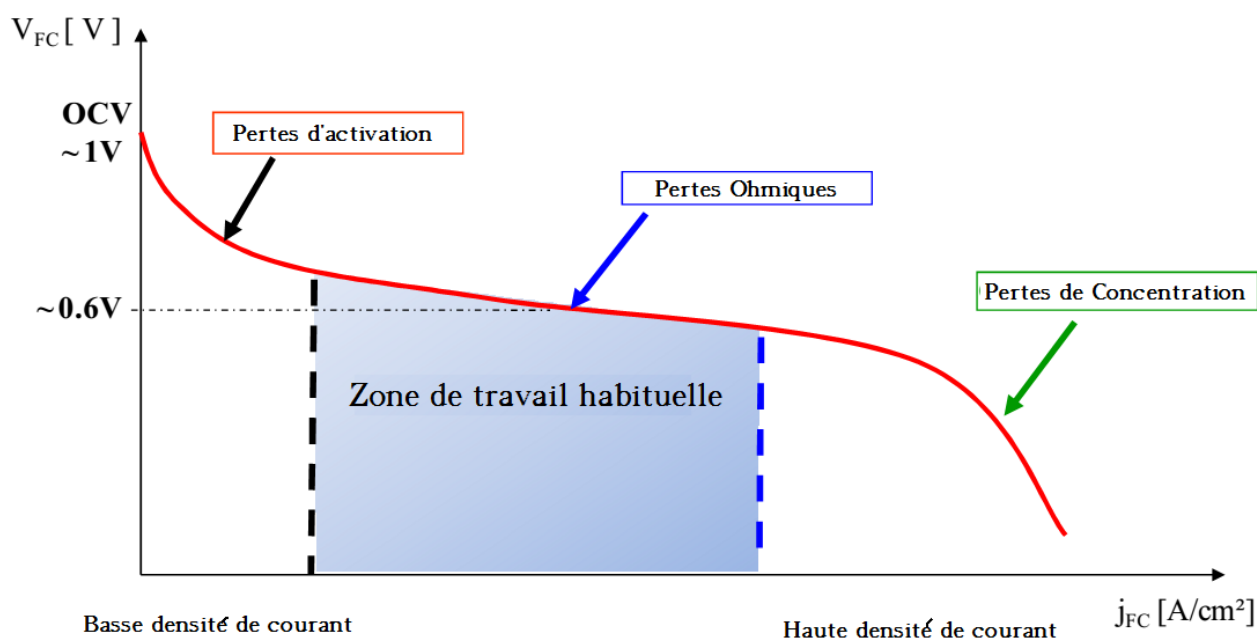


Figure 6 : Courbe de polarisation de la pile à combustible monocellule.



## 2. Expérimentation avec une pile à combustible monocellule PEM connectée à une bobine supraconductrice

### 2.1 Banc d'essai

Le banc d'essai est composé d'un seul système de pile à combustible (source) et d'une bobine supraconductrice (charge). La pile à combustible monocellule est une membrane d'échange de protons de 100 cm<sup>2</sup> de surface active fabriquée par UBZM (Allemagne). L'Hydrogène pur et sec est fourni à partir de cylindres à l'entrée de l'anode et l'air sec ou humide à l'entrée de la cathode.

Une carte électronique "temps réel" (dSPACE® carte DS1104) est utilisée en combinaison avec l'environnement mathématique de Matlab Simulink® pour toutes les fonctions de contrôle nécessaires, telles que le paramétrage (flux d'entrée de gaz, la pression de sortie, l'humidité de l'air, et courant de charge), la mesure de stockage, le conditionnement et l'arrêt de sécurité. Comme on peut le voir sur la Fig. 7, un système de refroidissement maintient la température constante de la pile à combustible. L'humidité de l'air peut être réglée par un système CEM (d'évaporation contrôlée et mélange), ce système de vaporisation peut remplacer les barboteurs habituels qui sont moins précis et surtout ne permettent pas la régulation de l'humidité. Les flux de gaz d'entrée sont calculés par rapport à un courant de référence  $I_{ref}$ , qui peut être réglé par un signal externe (dans le cas d'une alimentation adaptée en courant), comme suit:

$$\begin{cases} d_{H_2} = \frac{I_{ref}}{2F} \cdot \frac{RT_0}{P_0} \cdot \zeta_a \cdot 1000 \cdot 60 \\ d_{air} = \frac{I_{ref}}{4F} \cdot \frac{RT_0}{P_0} \cdot \frac{1}{0.21} \cdot \zeta_c \cdot 1000 \cdot 60 \end{cases} \quad [L.min^{-1}], \quad (2)$$

Avec  $\zeta_a$ ,  $\zeta_c$  coefficients stœchiométriques anodiques et cathodiques,  $T$ ,  $T_0 = 273$  K and  $P_0 = 1.013 \cdot 10^5$  Pa.

Les conditions de fonctionnement sont réglées de manière à obtenir la tension de la pile à combustible monocellule aussi faible que possible (moins de 0,3 V), à un courant donné, ce qui correspond à un fonctionnement dans la cellule source de courant.

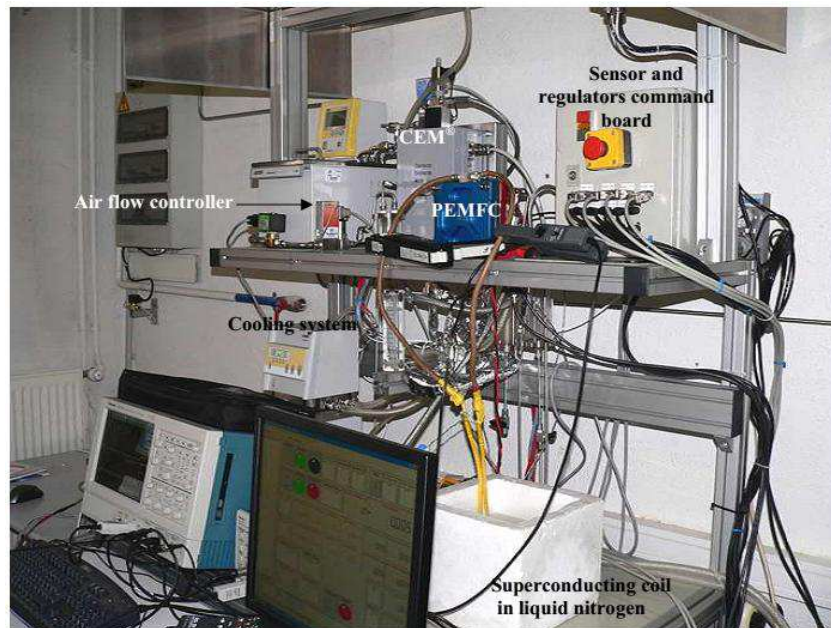


Figure 7 : banc d'essai pour la monocellule.

Comme nous pouvons le voir dans la figure. 8, la bobine supraconductrice est refroidie au moyen d'azote liquide. Comme expliqué ci-dessus, à partir de maintenant, la résistance de la bobine est nulle.

Par conséquent, dès que la pile à combustible fonctionne seule, celle-ci va être court-circuitée. L'objectif est de rendre la pile à combustible opérationnelle en tant que source de courant, c'est-à-dire bien en dessous de la tension de seuil comme le montre la figure 9. Ce mode de fonctionnement particulier a été étudié en [1].

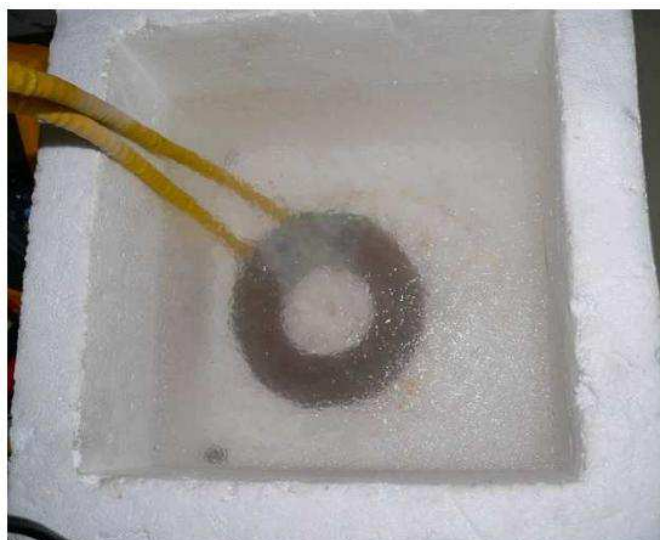


Figure 8 : Bobine supraconductrice refroidie par l'azote liquide.

Tableau 1. Caractéristiques de la bobine et du ruban.

Paramètres	Value
Épaisseur du ruban	0.2 mm
Largeur du ruban	4.0 mm
Courant critique du ruban	42 A@77K à champ propre
Nombre de spires de la bobine	208
Diamètre extérieur de la bobine	115 mm
Diamètre intérieur de la bobine	60 mm
Inductance de la bobine	4 mH
Courant critique de la bobine	18 A@77K

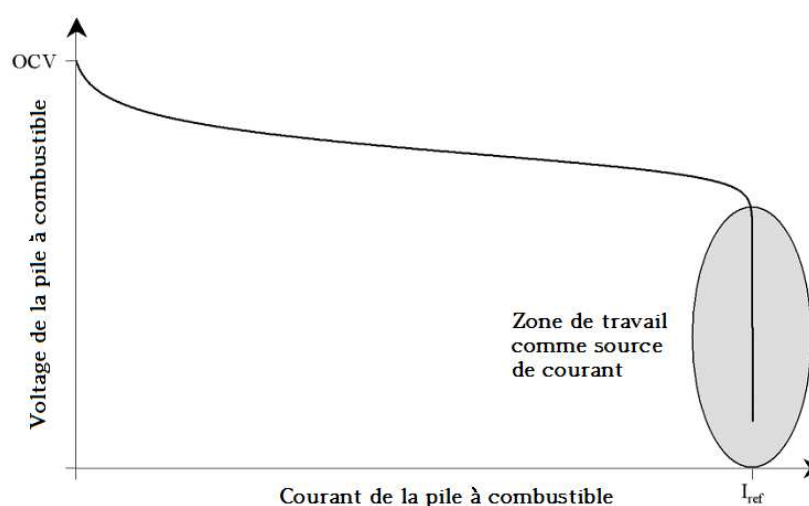


Figure 9 : Courbe de polarisation y compris la zone où la monocellule fonctionne comme une source de courant commandée par le débit d'hydrogène fixé par  $I_{ref}$ .

## 2.2 Conditions de fonctionnement des piles à combustible

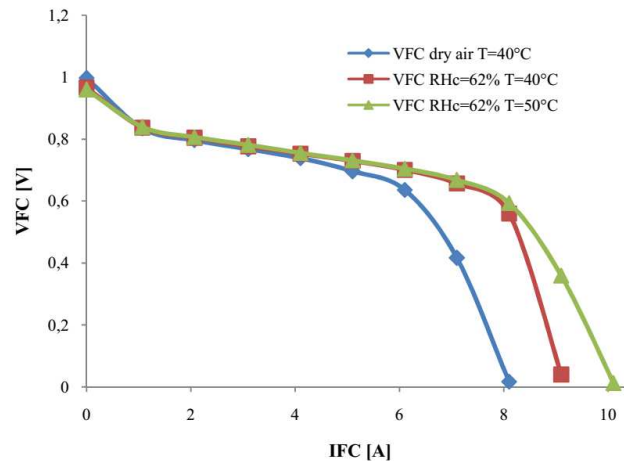
Tout d'abord, des expériences seront menées afin d'établir l'état de fonctionnement optimal de la pile à combustible comme seule source de courant. A cet effet, les courbes de polarisation sont tracées pour différentes valeurs de l'humidité de l'air relative et la température de la pile à combustible (Tableau 2 et la Figure 10).

Régler le courant de référence à l'anode 10A et coefficient stœchiométrique,  $\zeta_a$ , à 1 signifie que le courant de pile à combustible ne peut pas dépasser 10A. En fait, comme une partie du carburant n'est pas consommée, le courant est un peu inférieur à 10A, comme indiqué sur la figure 10.

À un courant donné, la tension de la pile à combustible doit être la plus petite donc il semble que la monocellule doit être alimentée par de l'air sec et sa température régulée à 40 ° C.

**Tableau 2. Conditions d'opération.**

Paramètre	Symbole	Valeur	Unité
Référence de courant (2)	$I_{ref}$	10	A
Coefficient stœchiométrique de l'anode(2)	$\zeta_a$	1	
coefficient stœchiométrique de la cathode (2)	$\zeta_c$	6	
La température de la pile à combustible	T	40-50	°C
Humidité relative de l'anode	$RH_a$	0%	-
humidité relative de la cathode	$RH_c$	0 - 62 %	-
Pression de sortie de l'anode	$P_A^{OUT}$	$1.013 \cdot 10^5$	Pa
Pression de sortie de la cathode	$P_C^{OUT}$	$1.013 \cdot 10^5$	Pa



**Figure 10 : Courbes de polarisation à différentes conditions de fonctionnement.**

## 2.3 Résultats expérimentaux de la bobine supraconductrice alimentée par une monocellule à combustible PEM

### 2.3.1 Caractérisation de la bobine supraconductrice

En tenant compte des résultats de la section précédente pour les conditions de fonctionnement (tableau 3), la pile à combustible est connectée à la bobine supraconductrice, dont les caractéristiques sont données dans le tableau 1.

**Tableau 3. Conditions d'opération de la pile à combustible comme source de courant.**

Paramètre	Symbole	Valeur	Unité
Référence de courant (2)	$I_{ref}$	4 – 20	A
Coefficient stœchiométrique de l'anode(2)	$\zeta_a$	1	
coefficient stœchiométrique de la cathode (2)	$\zeta_c$	6	
La température de la pile à combustible	T	40	°C
Humidité relative de l'anode	$RH_a$	0%	-
humidité relative de la cathode	$RH_c$	0%	-
Pression de sortie de l'anode	$P_A^{OUT}$	$1.013 \cdot 10^5$	Pa
Pression de sortie de la cathode	$P_C^{OUT}$	$1.013 \cdot 10^5$	Pa



La figure 11 présente la comparaison entre les caractérisations de la bobine supraconductrice, quand elle est alimentée par une alimentation électrique spécifique pour la bobine supraconductrice (Magnetics américains [7]) ou par la pile à combustible PEM. On obtient les mêmes résultats, la pile à combustible fonctionne comme une source de courant comme prévu.

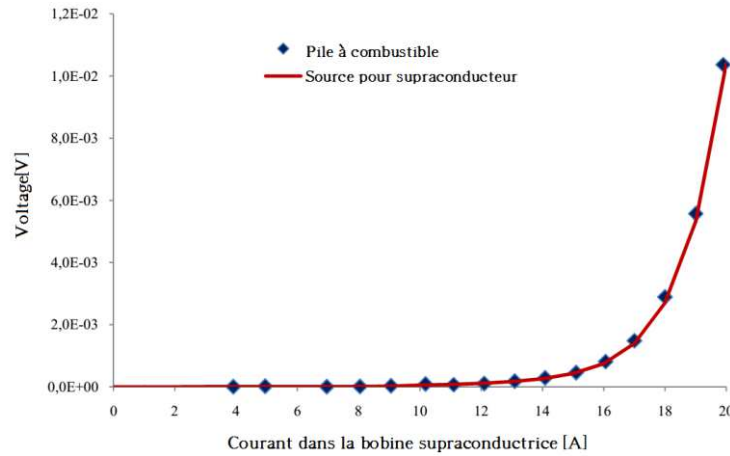


Figure 11 : Courbes de caractérisation de la bobine supraconductrice avec la pile à combustible comme source.

### 2.3.2 Courbe de polarisation de la pile à combustible

Dans la figure 12, la tension de la pile à combustible a été tracée pour différentes valeurs de courant. Comme on peut voir, la tension ne dépasse pas 0,1 V à 20 A. Une valeur plus petite de tension peut être mesurée car la pile à combustible est en court-circuit (résistance de la bobine supraconductrice est nulle).

Cet tension est due à la résistance du fil, estimée à 4mΩ. Par conséquent, elle est importante dans le choix des fils si l'on utilise la pile à combustible comme source de courant.

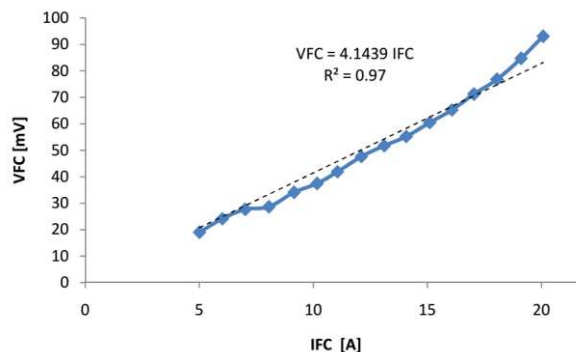
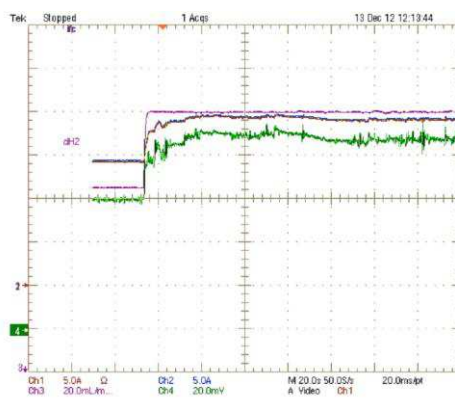


Figure 12 : Tension versus courant de la pile à combustible.

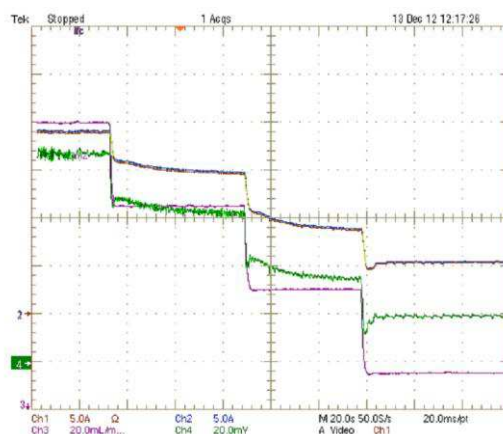
### 2.3.3 Comportement transitoire de la pile à combustible monocellule

Comme étudié dans [1], le courant de la pile à combustible est contrôlé par le débit d'hydrogène ( $\zeta_a = 1$ ) à travers  $I_{ref}$ . La figure 13 présente la variation temporelle de la vitesse d'écoulement d'hydrogène (Ch.3) et des formes d'onde de courant et de tension de la pile à combustible (ch2. et ch4. Respectivement). Un échelon de consigne du débit de l'hydrogène à partir de  $I_{ref} = 15A$  à  $I_{ref} = 20A$  conduit à un échelon de courant de pile à combustible à partir de 15A à 20A. Cette nouvelle consigne de courant est mis à jour depuis que le débit d'hydrogène est régulé autour  $I_{ref} = 20A$ .

Un profil de courant est réglé par le biais du débit d'hydrogène en diminuant le courant de référence à partir de 20A à 5A par pas de 5A. Les formes d'onde de courant de la pile à combustible et de la tension sont données dans la figure 14. Comme on peut le voir, la réponse transitoire est très lente, ce qui est principalement dû au régulateur de débit d'hydrogène, la régulation doit être améliorée. Toutefois, dans le cas d'applications de supraconducteurs, cela n'est pas préjudiciable.



**Figure 13 : Réponse en courant et tension à un échelon dans la consigne de flux d'hydrogène à partir de  $I_{ref} = 15$  A à  $I_{ref} = 20$ A (Ch. 2 courant de la pile à combustible, Ch. 3. vitesse de flux du  $H_2$ , Ch. 4. Tension de la pile à combustible)**



**Figure 14 : Démonstration du débit de courant commandé par l'hydrogène ( $I_{ref} = 20-15-10-5$ A) (Ch. 2. Courant de la pile à combustible, Ch.3. débit de  $H_2$ , Ch. 4. Tension de la pile à combustible).**

## 5. Conclusion

Dans cet article, nous avons démontré une nouvelle application de la pile à combustible PEM comme source de courant pour une bobine supraconductrice. En effet, on profite de sa faible tension et de la possibilité de contrôler son courant par le débit d'hydrogène. Par conséquent une bobine supraconductrice s'adapte à la dynamique lente de la pile à combustible. L'utilisation de la pile à combustible PEM en court-circuit nécessite une étude sur la modification de sa durée de vie, en étudiant par exemple le vieillissement dans les couches des catalyseurs et dans l'humidification.

Comme cela a été détaillé, si la pile à combustible monocellule fonctionne comme source de courant, l'alimentation en hydrogène est totalement consommée, donc, il faut s'attendre à ce que l'eau se condense rapidement dans la chambre de l'anode grâce à la forte diminution du débit de gaz. Le phénomène d'inondation est plus important près de la sortie, comme résultat de la faible densité de courant placée localement et la possibilité de lavage du catalyseur après un long temps de fonctionnement. L'examen de la distribution de densité de courant est nécessaire pour évaluer la faisabilité de la technique.

## Références

- [1] Hinaje M., Raël S., Caron J.-P., Davat B., An innovating application of PEM fuel cell: Current source controlled by hydrogen supply. *International Journal of Hydrogen Energy*, September 2012; 37 (17):12481-88.
- [2] Chikaraishi H., Takami S., Inoue T., Ise T., Niwa H., Haga T., Control system of dc power supplies for LHD superconducting coils. *Fusion Engineering and Design*, April 2008, 83 (2-3): 260-4.
- [3] Rummel T., Füllenbach F., Mönnich Th., Power supplies for the WENDELSTEIN 7-X stellarator. *Fusion Engineering and Design*, September 2003, 66-68: 1115-8.
- [4] Rogalla H., Kes P. H., 100 Years of Superconductivity, Taylor & Francis Inc.; 15 december 2011.

- [5] Melhem Z., High Temperature Superconductors (HTS) for Energy Applications, Woodhead Publishing Ltd; 21 december 2011.
- [6] Isaak Mayergoyz "Nonlinear Diffusion of electromagnetic fields, with applications to eddy currents and superconductivity". Academic press, San Diego, 1998.
- [7] <http://www.americanmagnetics.com>
- [8] Kandlikar S., G. Lu Z. Thermal management issues in a PEMFC stack- A brief review of current status. Applied Thermal Engineering, May 2009; 29 (7): 1276-80.
- [9] Santarelli M.G., Torchio M.F., Experimental analysis of the effects of the operating variables on the performance of a single PEMFC. Energy Conversion and Management, January 2007, 48 (1): 40-51.
- [10] Santarelli M.G., Torchio M.F., Cali M., Giaretto V., Experimental analysis of cathode flow stoichiometry on the electrical performance of a PEMFC stack. International Journal of Hydrogen Energy, May 2007, 32 (6): 710-6.
- [11] Kim S., Shimpalee S., Van Zee J.W., The effect of stoichiometry on dynamic behavior of a proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) during load change. Journal of Power Sources, September 2004, 135 (1–2): 110-21.
- [12] Kim S., Hong I., Effects of humidity and temperature on a proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) stack. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, May 2008, 14 (3): 357-64.
- [13] Cindrella L., et al Gas diffusion layer for proton exchange membrane fuel cells – A review. Journal of Power Sources, October 2009 ; 194 (1): 146-60.
- [14] Chen Y.-S., Peng H. Predicting current density distribution of proton exchange membrane fuel cells with different flow field designs. Journal of Power Sources, February 2011; 196 (4): 1992-04.
- [15] Kim J.-H. et al., An experimental analysis of the ripple current applied variable frequency characteristic in a Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell. Journal of Power Electronics, January 2011, 11 (1): 82-9.