

Récupération de l'énergie électrique produite par des piles à combustible microbiennes associées en série

Firas Khaled ^a, Olivier Ondel ^b et Bruno Allard ^a

^(a) Université de Lyon, Laboratoire Ampère, UMR CNRS, INSA de Lyon, France

^(b) Université de Lyon, Laboratoire Ampère, UMR CNRS, Université Claude Bernard Lyon, France

RESUME – Les Piles à Combustible Microbiennes (PCMs) produisent de l'électricité à partir de la dégradation de matières organiques par des bactéries. Les PCMs sont considérées comme des micro-génératrices faible tension et faible puissance. Pour récupérer l'énergie électrique produite, des architectures mettant en œuvre plusieurs piles seront préférées. L'association d'un grand nombre de PCMs individuelles offre des perspectives très intéressantes notamment au niveau de la production d'énergie électrique. Cela permet d'atteindre des niveaux de tension acceptables en sortie (alimentation de capteurs autonomes) et permet de mutualiser les puissances électriques de chaque cellule. L'association série d'un grand nombre de PCMs est un défi en soi à cause des couplages hydrauliques (lorsque les PCMs partagent le même substrat) et à cause des non-uniformités entre générateurs qui mènent à une association non-efficace. Les circuits d'équilibrage de tension peuvent être une solution pour compenser ces inhomogénéités. Ils peuvent améliorer l'efficacité de l'association et prévenir le phénomène d'inversion de tension. Cet article détaille plusieurs solutions basées sur l'utilisation de circuits d'équilibrage, permettant d'optimiser l'association série de plusieurs PCMs.

MOTS-CLES – Piles à combustible microbiennes, circuit d'équilibrage, rendement, récupération de l'énergie.

1. Introduction

Les combustibles fossiles ont soutenu l'industrialisation et la croissance économique des pays au cours du siècle passé. Cependant, dans les temps à venir, avec une demande énergétique qui ne cesse d'augmenter, il est clair qu'ils ne peuvent indéfiniment soutenir l'économie mondiale [1]. Sachant que l'utilisation massive des énergies fossiles, en plus de causer la diminution des réserves, est à l'origine d'une partie de la pollution.

L'enjeu énergétique actuel est de trouver une source d'énergie capable de remplacer les ressources fossiles en plus d'être propre et renouvelable. C'est là les critères essentiels qui ont permis le développement des énergies renouvelables.

Les Piles à Combustible Microbiennes sont un très bon exemple de sources qui entrent dans la problématique du grappillage d'énergie. Les PCMs se posent au carrefour de ces deux problématiques énergétiques et environnementales, en permettant de transformer directement l'énergie chimique contenue dans des composés organiques (biomasse) en énergie électrique. Le fonctionnement d'une pile à combustible microbienne est similaire à celui d'une pile normale. Elle se compose de deux électrodes : une cathode et une anode (Fig. 1). Les électrons produits par la dégradation de la matière organique sont transportés par un circuit externe vers la cathode qui contient un oxydant. On utilise de préférence l'oxygène de l'air comme accepteur d'électrons au niveau de la cathode.

2. Caractéristiques électriques des PCMs

La caractéristique électrique statique d'une PCM est une représentation tension/courant en régime permanent. Elle peut être enregistrée à l'aide d'un resistorstat (résistances variables) [2]. Cette courbe peut être représentée différemment pour exprimer la puissance délivrée par la PCM en fonction de son courant de sortie.

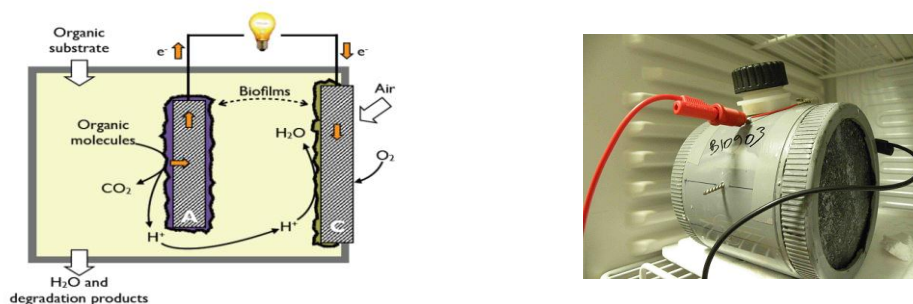


Figure 1. Schéma de principe (à gauche) et photo (à droite) d'une PCM à cathode-air

Des PCMs à chambre unique de 0.7 L ont été construites de façon similaire basées sur l'état de l'art existant et ont été optimisées pour la production d'énergie électrique [3]. Par la suite, nous travaillerons sur l'association de 2 PCMs en série mais l'étude est généralisable à n PCMs. Pour modéliser le fonctionnement lors d'une association série, nous avons créé une différence importante entre 2 PCMs en connectant une des deux PCMs (PCM₂) à une charge pendant une journée. Cela peut simuler un manque de combustible ou de l'absence d'activité bactérienne dans la PCM₂. La Fig. 2 présente les courbes de polarisation et de puissance pour ces 2 PCMs. On constate une différence notable entre les deux caractéristiques des PCMs.

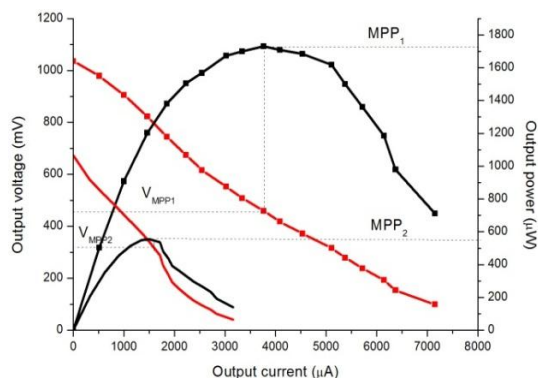


Figure 2. Caractéristiques statiques expérimentales des PCM₁ et PCM₂

3. Gestion de l'énergie de plusieurs PCMs connectées en série

Plusieurs associations de PCMs peuvent être envisagées. En parallèle, l'intérêt principal est d'additionner les courants. De façon alternative, l'association série prend avantage de la pluralité des PCMs pour élever les tensions à des niveaux acceptables (alimentation de captures autonomes). En revanche divers problèmes peuvent engendrer des limitations dans la récupération d'énergie. La variabilité dans la construction des PCMs limite aussi la récupération d'énergie. Les circuits d'équilibrage de tension peuvent améliorer l'efficacité de l'association et peuvent prévenir des phénomènes d'inversion de tension. Les circuits d'équilibrage sont traditionnellement utilisés pour les batteries [4], afin de prolonger leur durée de vie, les supercondensateurs [5], ou les cellules photovoltaïques pour améliorer la récupération de l'énergie. Une étude bibliographique sur ces circuits a été faite. Le principal inconvénient pour les circuits d'équilibrage passif est qu'ils ont un mauvais rendement [6]. Les méthodes qui utilisent des inductances ou des transformateurs ont un faible rendement en raison de pertes par commutations et de pertes magnétiques [6]. Des convertisseurs d'énergie peuvent également être utilisés pour l'équilibrage des cellules. Bien que ces convertisseurs aient un rendement acceptable, ils sont coûteux et complexe. Le circuit 'Switched-capacitor' (SC) ne nécessite que des commutateurs, des condensateurs et un unique oscillateur (dans le but de créer une fréquence de commutation nécessaire aux switches) [7]. Le circuit SC offre donc de bonnes perspectives pour optimiser l'association de PCMs.

3.1 Association des PCMs sans circuit d'équilibrage

Les caractéristiques statiques des PCMs associées en série sont présentées sur la Fig. 3 (en rouge). Au point de puissance maximale, appelé MPP, la tension de chaque PCM est différente, ce qui conduit à un point de fonctionnement non optimal comme le montre la Fig. 3a. Pour des valeurs élevées de courant, les tensions V_1 et V_2 se séparent, pour aboutir finalement à une valeur négative de V_1 comme représenté à la Fig. 3b. Ce phénomène est décrit comme 'inversion de la tension'. Le rendement pour cette configuration au MPP est défini par l'équation 2 où P_{OUT} représente la puissance des PCMs associées et $\sum P_{MPP}$ la somme des MPP pour les PCMs. Dans notre exemple, il est d'environ 75%.

$$\eta = P_{OUT} / \sum P_{MPP} * 100 \quad (2)$$

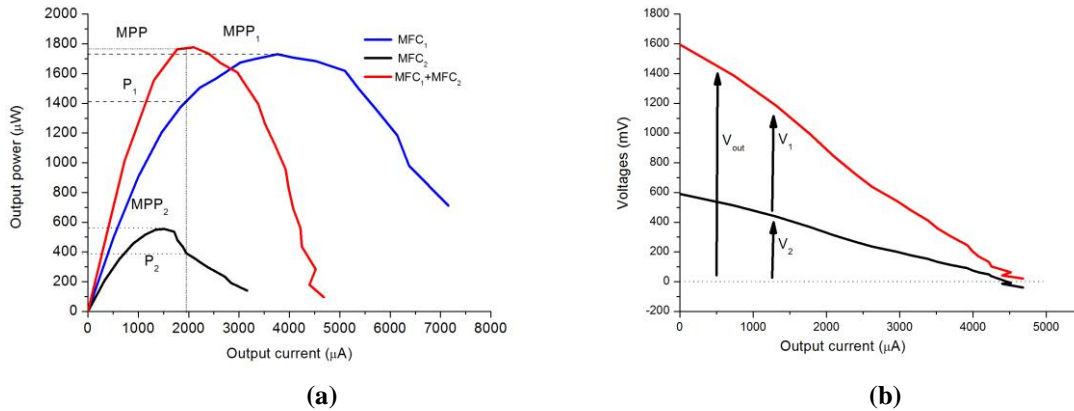


Figure 3. Courbe P-I pour PCM₁, PCM₂ et les 2 PCMs associées (a) et courbe V-I (b)

3.2 Association des PCMs avec circuit d'équilibrage "Switched-Capacitor"

Dans cette méthode, une capacité C_{12} est alternativement connectée en parallèle avec PCM₁ et PCM₂ à une fréquence F_s , (Fig. 4). Le circuit "Switched-Capacitor" (SC) transfère l'énergie de la PCM la plus forte vers la PCM la plus faible pour équilibrer les tensions des différentes cellules dans l'association.

Le circuit a été réalisé en utilisant des switches 0.45Ω QUAD SPDT ANALOG. La Fig. 5 présente les courbes de polarisation et de puissance des PCMs associées en série avec le circuit d'équilibrage SC à une fréquence de commutation de 10KHz et une capacité C_{12} de 500μF. Le rendement de l'association avec circuit d'équilibrage SC, calculé à l'aide de l'équation 2, est d'environ 90%.

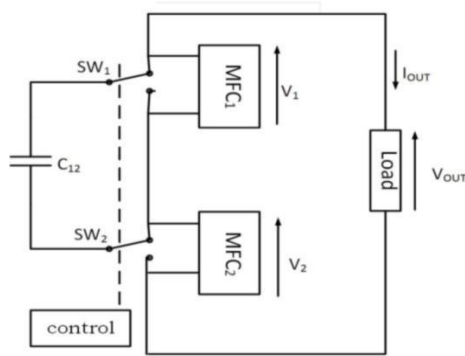


Figure 4. Schéma du circuit SC

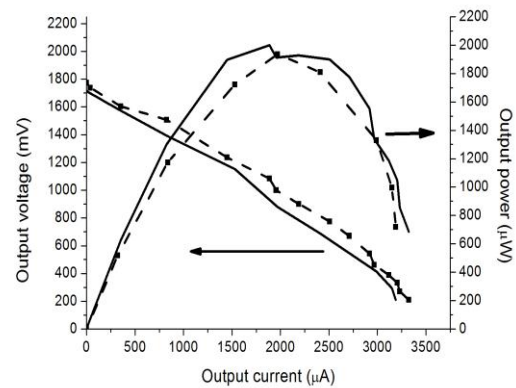


Figure 5. Courbes P-I et V-I expérimentales (discontinue) et simulées (continue) pour les PCMs associées avec circuit SC

3.3 Association des PCMs avec circuit d'équilibrage "Switched-PCMs"

Le modèle électrique d'une PCM comporte une capacité [8]. Cette capacité peut être utilisée pour réaliser l'équilibrage des PCMs. La méthode "Switched-PCMs" (S-PCMs) suppose que les PCMs sont connectées en série et en parallèle alternativement à une fréquence F_s , comme le montre la Fig. 6. Le circuit a été réalisé en utilisant des switches ISL54050. Le rendement de l'association avec ce circuit est d'environ 83%. La Fig. 7 présente les courbes de polarisation et de puissance des PCMs associées en série avec le circuit d'équilibrage S-PCMs.

3.4 Discussion

Les pertes dans le circuit SC ne sont pas trop élevées parce que les interrupteurs sont traversés par le courant d'équilibrage, qui lui-même, n'est pas très élevé (300μA). Alors que dans la méthode S-PCMs, les interrupteurs sont traversés par le courant des PCMs (quelques mA) ce qui conduit à des pertes importantes. Le circuit SC nécessite $2n$ interrupteurs pour une association de n PCMs et $(n-1)$ condensateurs d'équilibrage. Le tableau I présente les résultats des différentes méthodes utilisées. Le circuit SC est le circuit d'équilibrage le plus efficace. Son efficacité atteint plus de 90% au MPP.

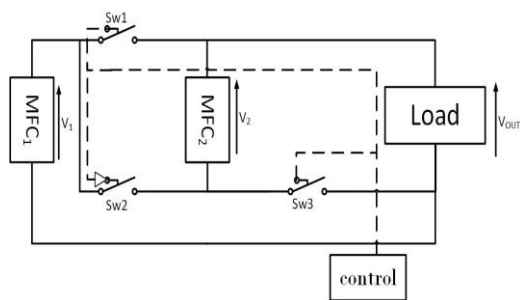


Figure 6. Schéma du circuit SC

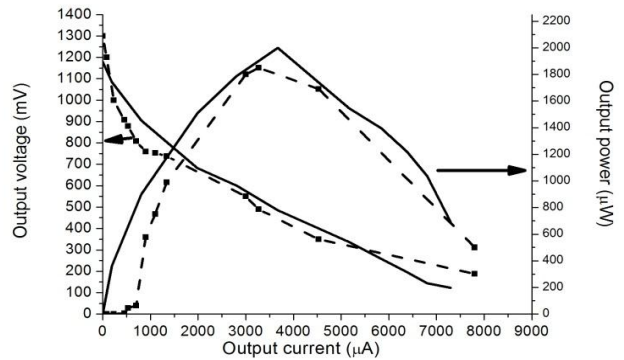


Figure 7. Courbes P-I et V-I expérimentales (discontinue) et simulées (continue) pour les PCMs associées avec circuit S-PCMs

Tableau 1. Comparaison des résultats des différents circuits d'équilibrage

	V_{oc} [mV] *	MPP [μ W]	η [%]
Association optimale	1736.1	2255.9	100
Association sans équilibrage	1610.5	1735.2	75.9
Association avec SC	1715	2041.2	90.5
Association avec S-PCMs	1305	1876.9	83.2

* V_{oc} : tension en circuit ouvert

4. Conclusion

La dispersion dans les caractéristiques des PCMs est un problème qui peut influencer sur l'efficacité de l'association en série. Les circuits d'équilibrage de tension permettent d'optimiser efficacement l'association série des PCMs. Dans notre article, deux circuits d'équilibrage sont étudiés, réalisés et testés. Le circuit SC transfère l'énergie de la PCM la plus forte vers la PCM la plus faible pour équilibrer les tensions des différentes cellules. Tandis que le circuit S-PCMs utilise la capacité interne des PCMs pour équilibrer leurs tensions. Les deux circuits sont capables d'empêcher l'inversion de la tension. Le circuit SC permet d'obtenir de très hautes performances. Ce circuit d'équilibrage offre une solution efficace à faible coût pour augmenter la production d'énergie des PCMs dans les usines de traitement des eaux usées ou en bio-piles.

5. Références

- [1] A. K. Shukla, P. Suresh, S. Berchmans and A. Rajendran, "Biological fuel cells and their applications", Current Science, 2004, vol 87.
- [2] Degrenne, N., Ledezma, P., Bevilacqua, P., Buret, F., Allard, B., Greenman, J., and Ieropoulos, I. A. (2012b). "Bi-directional Polarisation Method for Studying Microbial Fuel Cell Dynamic Performance", Bioresource tech.
- [3] J. Middaugh, S. Cheng, W. Liu, and R. Wagner, How to make cathodes with a diffusion layer for single-chamber microbial fuel cells, http://www.engr.psu.edu/ce/enve/logan/bioenergy/pdf/Cathode_093008.pdf, (2006).
- [4] B. Y. G. Altemose, "Batteries and Fuel Cells Achieving cell balancing for lithium-ion batteries," Electronic Products, pp. 21-22.
- [5] Diab, Y., Venet, P., & Rojat, G. (2006). Comparison of the different circuits used for balancing the voltage of supercapacitors: Studying performance and lifetime of supercapacitors. In Proceeding of the 2nd European Symposium on Super Capacitors & Applications.
- [6] Dorin V. Cadar, Dorin M. Petreus and Toma M. Patarau, "An Energy Converter Method for Battery Cell Balancing," IEEE 33rd International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE), pp. 290-293, 2010.
- [7] C. Pascual, "Switched capacitor system for automatic battery equalization", US Patent No. 5,710,504,1998.
- [8] Khaled, F. Ondel, O. Allard, B. Degrenne, N., "Electrical Model and Experimental Characterization of Microbial Fuel Cells", 5th Conference on Fundamentals and Development of Fuel Cells in Karlsruhe, Germany, 2013.