



HAL
open science

Récupération de l'énergie électrique produite par les piles à combustibles microbiennes

Nicolas Degrenne, Bruno Allard, François Buret, Jean-Michel Monier

► To cite this version:

Nicolas Degrenne, Bruno Allard, François Buret, Jean-Michel Monier. Récupération de l'énergie électrique produite par les piles à combustibles microbiennes. 13ème EPF, Jun 2010, Saint-Nazaire, France. ⟨hal-00578528⟩

HAL Id: hal-00578528

<https://hal.science/hal-00578528v1>

Submitted on 21 Mar 2011

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

Récupération de l'énergie électrique produite par les piles à combustibles microbiennes

Nicolas Degrenne, Bruno Allard, François Buret, Jean-Michel Monier
Université de Lyon, Ecole Centrale, INSA Lyon, Laboratoire Ampère, CNRS UMR 5005
F-69134 Ecully Cedex, France

Les Piles à Combustibles Microbiennes (PCMs) produisent de l'électricité à partir de la dégradation de matière organique par des bactéries. Pour récupérer l'énergie électrique produite, des architectures mettant en jeu plusieurs piles seront préférées à des architectures basées sur une pile unique de taille importante. Par ailleurs la nécessité d'élever les tensions, de mutualiser les puissances et d'adapter la charge à la source passent par le choix et le dimensionnement d'une chaîne judicieuse de convertisseurs de puissance spécifiques (faible tension d'entrée et basse puissance) au sein d'un réseau de PCMs. Le nombre de micro-sources considérées conduit naturellement à envisager la cellularisation de la conversion avec mise en réseau série et/ou parallèle des convertisseurs. Une récupération efficace de l'énergie passe également par l'intégration de la fonctionnalité MPPT (Maximum Power Point Tracking) qui permet d'adapter la charge à la pile.

I. INTRODUCTION

Les énergies renouvelables présentent un caractère diffus qui complique leur exploitation par rapport aux énergies à haute densité. Les avancées en terme de gestion de l'énergie et en particulier dans le domaine de la conversion statique élargissent l'étendue des possibilités de grappillage vers des sources de plus en plus faibles (micro-sources). L'addition des énergies provenant d'un nombre important de sources élémentaires permet d'atteindre un niveau de puissance significatif.

Les Piles à Combustibles Microbiennes (PCMs) (fig.1) sont un très bon exemple de sources qui entrent dans la problématique du grappillage d'énergie. Elles produisent de l'électricité à partir de matière organique grâce à l'action de bactéries qui les dégradent (fig.2). La matière organique nécessaire peut être apportée par les eaux usées domestiques alimentant les stations d'épuration [1] ou par les déchets de certaines industries agro-alimentaires. Processus de production d'électricité et dépollution qui sont des enjeux majeurs vont donc de pair. Les eaux usées traversent la pile de part et d'autre et l'alimentent en continu. Les bactéries se développent en biofilms à la surface des électrodes. Les réactions d'oxydo-réduction associées au métabolisme des bactéries peuvent être exploitées pour produire de l'énergie électrique. Une réaction d'oxydation à l'anode produit des protons et des électrons. Les protons sont conduits à travers l'électrolyte vers la cathode sous l'influence du champ électrique interne. Les électrons s'écoulent à travers le circuit électrique externe. Protons et électrons participent à la réduction du dioxygène à la cathode [2].

La maîtrise du fonctionnement et de la technologie des biopiles est maintenant suffisante pour aborder la phase de gestion des aspects électriques. L'optimisation biologique des biopiles, qui facilitera à terme la récupération d'énergie, dépasse le cadre des considérations de génie électrique exposées ici. L'abondance du combustible et la combinaison énergie/dépollution rendent cette pile intéressante malgré des performances électriques qui peuvent paraître actuellement limitées. En effet les caractéristiques électriques des PCMs sont particulières et nécessitent une architecture de conversion spécifique.

Jusqu'à présent les PCMs n'ont été utilisées que pour alimenter des capteurs de façon intermittente [3]. L'objectif de cet article est de présenter cette micro-source originale et innovante et de montrer comment les recherches les plus récentes en terme de conversion d'énergie [4] ouvrent des perspectives pour élargir les possibilités d'applications et de valorisation effective de l'énergie produite.

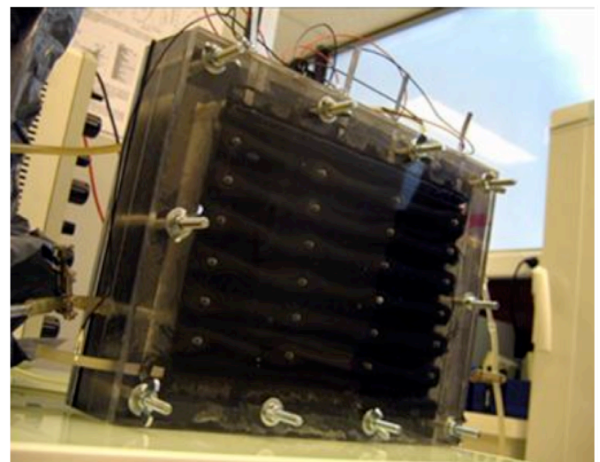


Figure 1: PCM de laboratoire de $4 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$.

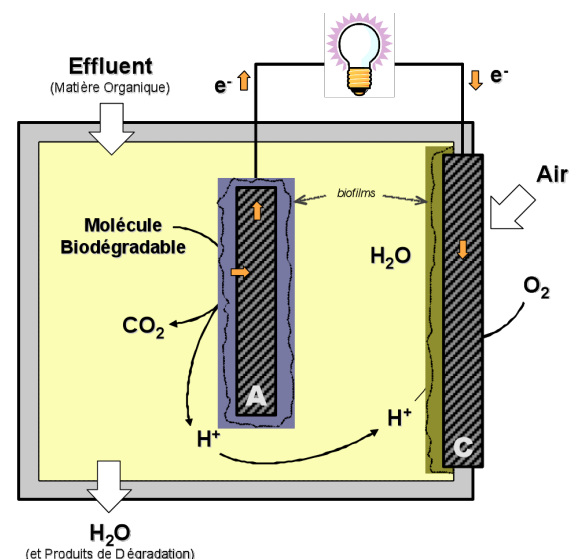


Figure 2: schéma de principe d'une PCM à cathode à air.

II. CARACTERISTIQUE ELECTRIQUE D'UNE PCM

La conception du système de grappillage passe par la compréhension des particularités de la source. Les PCM sont des générateurs de tension dont la caractéristique $U(I)$ est presque linéaire (fig.3). De façon similaire aux piles à combustible classiques [5], la caractéristique peut présenter deux points d'inflexion qui s'expriment plus ou moins et qui divisent la courbe en trois: chute de tension d'activation (courants faibles), chute de tension due à des phénomènes limitants (courants forts) et chute ohmique dans l'électrolyte (zone linéaire) (fig.4). Par rapport aux piles à combustible classiques, les densités de courant au niveau des électrodes sont moindres dans un rapport de 10^4 .

La tension en circuit ouvert est généralement de l'ordre de 600mV et la tension optimale de transfert d'énergie est logiquement proche de 300mV. Nous pouvons espérer une densité de puissance de $10W/m^3$ compte tenu de l'état de la technologie.

Un aspect bien particulier des PCM concerne leur comportement dynamique. A l'image de condensateurs, les biofilms présents à la surface des électrodes stockent des charges qu'ils sont capables de restituer lors d'un appel de courant important. De plus, des dynamiques plus lentes sont causées par les bactéries qui, en tant qu'organismes vivants, évoluent en permanence pour s'adapter à leur environnement dans la pile. Par exemple, en cas de chute de potentiel, les bactéries sont affectées ainsi que leur métabolisme. Les figures 5 et 6 présentent les caractéristiques électriques $U(I)$ et $P(I)$ obtenues en balayant une série de résistances dans le sens des résistances décroissantes puis croissantes. Les phénomènes hystériques observés sont révélateurs de dynamiques très lentes.

Dans l'objectif de mieux appréhender ces phénomènes, un premier modèle multi-physique de PCM a été élaboré en faisant apparaître les phénomènes dominants :

- Electrochimiques: équations de Butler Volmer, calcul en temps-réel de la concentration de l'électrolyte en matière organique.
- Electriques: conductivité de l'électrolyte, des biofilms et des électrodes.
- Biologiques: saturation des possibilités de transfert d'électrons des bactéries en cas de courant important, et stockage de charges au sein des biofilms (effets capacitifs).
- Procédés: impact de la taille de la PCM sur les performances, prise en considération de phénomènes aléatoires, simulation d'une pile en mode dégradé (cas où elle n'est plus alimentée).

Le modèle fait intervenir des constantes et paramètres dont certains nécessitent d'être identifiés expérimentalement.

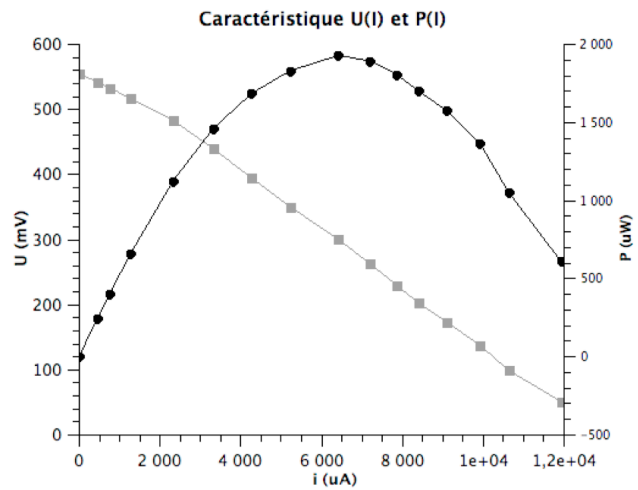


Figure 3: caractéristique statique expérimentale d'une PCM de $4 \cdot 10^{-3} m^3$.

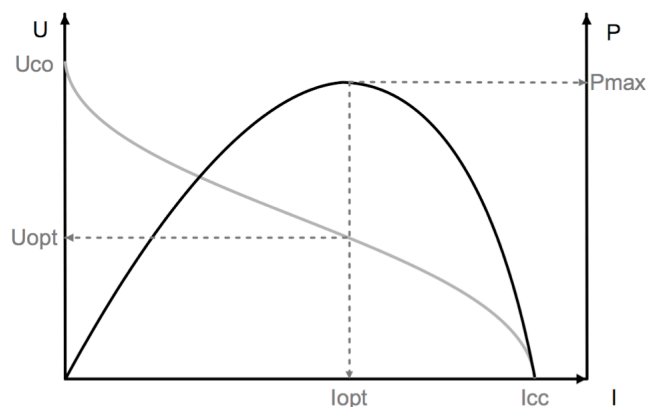


Figure 4: allure théorique typique de caractéristique statique d'une pile à combustible classique.

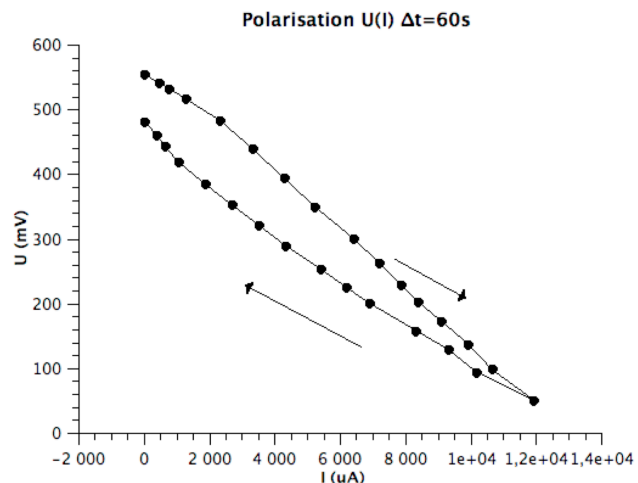


Figure 5: caractéristique $U(I)$ "Aller-Retour" expérimentale d'une PCM de $4 \cdot 10^{-3} m^3$. Le temps entre chaque mesure est de 60s.

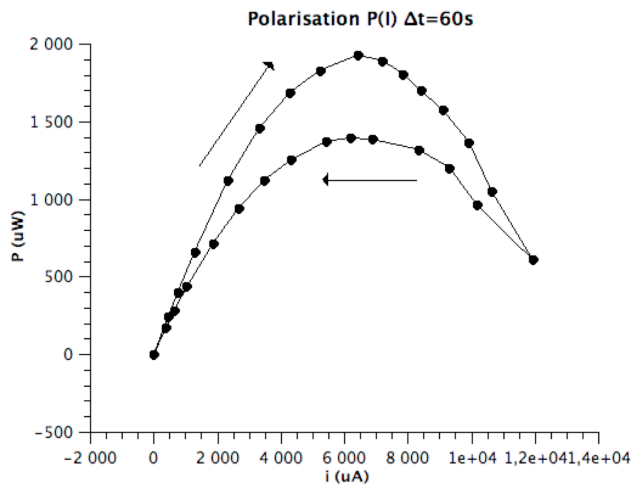


Figure 6: caractéristique $P(I)$ "Aller-Retour" expérimentale d'une PCM de $4 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$. Le temps entre chaque mesure est de 60s.

III. SPECIFICATION DES CONVERTISSEURS POUR UNE CELLULE ELEMENTAIRE

Une PCM de 1 litre fournit au mieux 10mW sous une tension de 300mV. La conversion basse-tension est nécessairement associée à l'intégration sur semi-conducteur, même si le silicium n'est peut être pas le mieux placé. Peu de transistors commutent sous des tensions de grille aussi faibles, ou alors avec un très mauvais rendement. Afin de combiner faible tension de démarrage et rendement correct (et pour éviter un stockage permanent d'énergie dans le système), il est nécessaire d'utiliser un circuit de démarrage. Il élève la tension avec un rendement très faible de façon complètement autonome, et charge un condensateur sous une tension supérieure au volt. Quand le condensateur est chargé, un convertisseur plus standard peut prendre le relai et assurer l'élévation de tension voulue avec un meilleur rendement (fig.7) (ex: [S882Z de Seiko Instruments Inc.](#)).

Plusieurs topologies pour le démarrage et de nombreuses architectures de convertisseurs ont été décrites dans la littérature [6]. Les convertisseurs élévateurs sont généralement de type inductif (ex: boost, cuk...). Certains sont isolés galvaniquement (flyback, forward), ce qui permet entre autres d'associer leur sortie en série. Des convertisseurs capacitifs (pompes de charge) peuvent éventuellement être utilisés en basse puissance [7]. Le démarrage peut faire intervenir des architectures plus exotiques comme des circuits auto-oscillants. L'évaluation précise des convertisseurs candidats (et de leur éventuel couplage) est nécessaire.

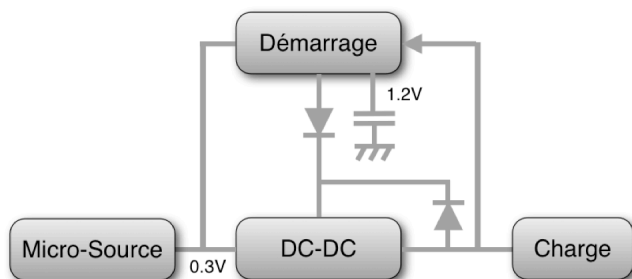


Figure 7: architecture de conversion avec circuit de démarrage.

IV. VERS UNE MISE EN RESEAU DES PILES?

Nécessité d'association

La mise en réseau série et/ou parallèle d'une multitude de PCMs élémentaires de petites tailles est proposée pour les deux raisons principales suivantes:

- Une PCM unique génère une tension trop faible qui est contraignante pour la conversion.
- Des études [8] indiquent que la taille d'une PCM doit rester limitée pour obtenir des puissances volumiques maximales d'environ 10 W/m^3 . Les non-uniformités internes, plus importantes dans le cas de piles de grande taille, sont à l'origine de pertes supplémentaires. Même si cet effet semble limité par une conception attentive de la pile [9], il paraît difficile de concevoir des piles de grand volume qui restent performantes.

Limites des réseaux série/parallèles

La mise en réseau d'une multitude de cellules élémentaires a été testée en laboratoire. Cependant on note deux limites principales: dispersions des caractéristiques électriques et couplages hydrauliques.

- Les dispersions électriques inévitables entre les piles ont un effet négatif sur le rendement du réseau [10]. Les procédés de fabrication des piles sont encore très artisanaux (conception manuelle). De plus, les piles sont dépendantes d'un apport en matière organique (combustible) qui est aléatoire car provenant directement d'une station d'épuration. On a donc généralement des différences de comportement électrique sur chaque pile. Lors d'une association, il est alors impossible de se positionner au maximum de puissance de chacune des piles. Les figures 8 et 9 montrent les courbes $U(I)$ et $P(I)$ pour une même PCM à 5 jours d'intervalle. Dans ce cas particulier, entre les deux mesures, la pile s'est obstruée, empêchant son alimentation en eaux usées, et réduisant de façon significative ses performances. Les puissances maximales transmissibles sont respectivement de 0,7mW à $I=2\text{mA}$ et 1,9mW à $I=4,6\text{mA}$.

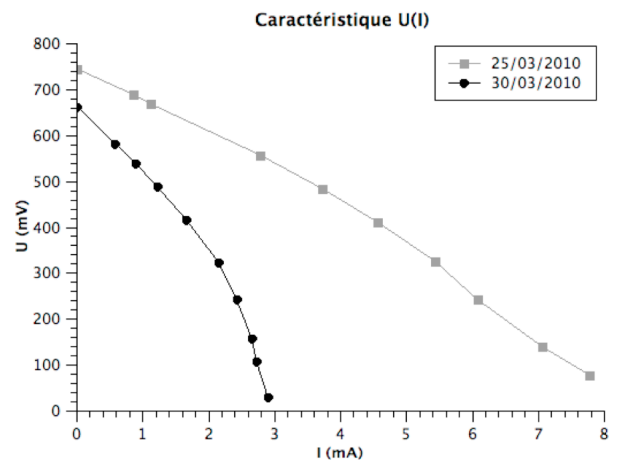


Figure 8: dispersions des caractéristiques $U(I)$ d'une même PCM de 10^{-3} m^3 à 5 jours d'intervalle (pile du 30/03/2010 obstruée).

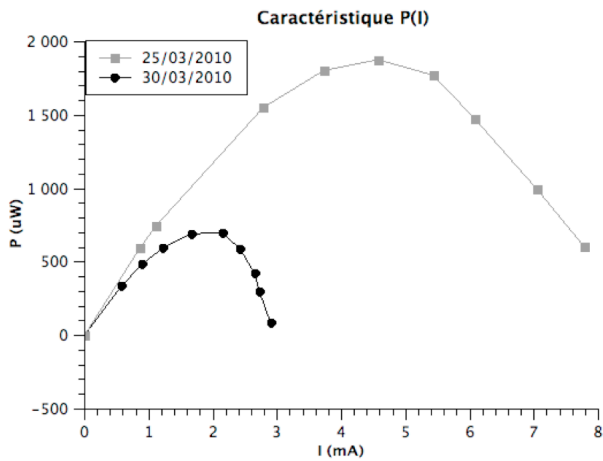


Figure 9: dispersions des caractéristiques $P(I)$ d'une même PCM de $10^{-3} m^3$ à 5 jours d'intervalle (pile du 30/03/2010 obstruée).

- Si le même flux hydraulique traverse les piles du réseau, la présence de couplages électrolytiques nuit au rendement global [11]. Il y a création de piles parasites entre les cathodes et anodes des piles juxtaposées (fig.10). En cas de mise série électrique, ces piles sont court-circuitées, et les potentiels de cathode et d'anode correspondants tendent à s'annuler, ce qui diminue les performances des piles "physiques".

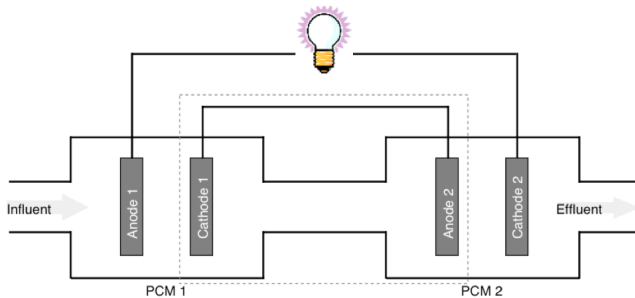


Figure 10: PCM parasite lors de l'association hydraulique de deux piles.

Conclusion

Il existe un dimensionnement du réseau et une répartition de convertisseurs à déterminer, voire optimiser par la suite. Le nombre de micro-sources considérées conduit naturellement à envisager la cellularisation de la conversion avec mise en réseau série et parallèle des convertisseurs.

V. MISE EN RESEAU DE CONVERTISSEURS

Des études récentes se sont attachées à concevoir des convertisseurs monosource fractionnés en cellules élémentaires (fig.11) [12]. La modularité et la distribution les contraintes électriques et thermiques sont accrues. Par exemple, ce type de convertisseur est généralement utilisé pour alimenter des microprocesseurs appelant de forts transitoires de courant.

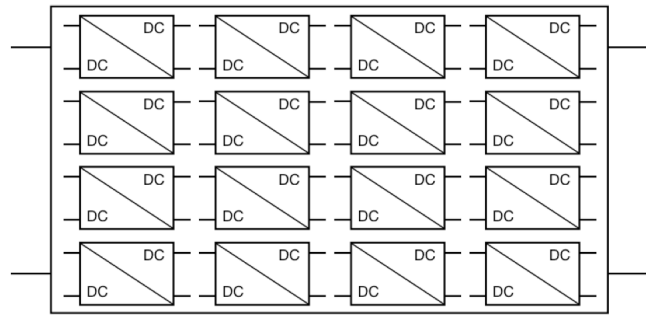


Figure 11: réseau de micro-convertisseurs monosource.

Dans le cas des PCMs, étant donné la pluralité des sources et la difficulté de les associer directement, il est légitime d'étudier l'association de convertisseurs adaptés à un réseau multi-source (fig.12).

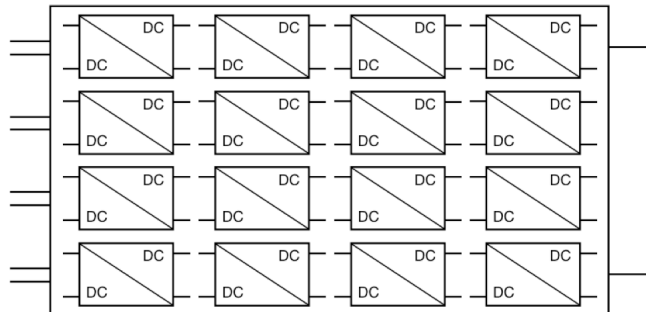


Figure 12: réseau de micro-convertisseurs multi-sources.

Les topologies peuvent être parallèles (entrelacées), série (isolation galvanique) et faire intervenir des couplages magnétiques qui permettent de mieux répartir les courants dans chaque convertisseur [13]. Les possibilités sont multiples et une étude par simulation est nécessaire pour cibler quelques solutions possibles. L'approche multi-source très basse puissance représente un défi nouveau en électronique de puissance et ouvre la voie à des applications multiples dans la problématique du grappillage d'énergie.

VI. OPTIMISATION DU RESEAU

Les possibilités sont vastes en terme de topologie et de dimensionnement des micro-sources et des convertisseurs. Aussi l'architecture du réseau offre un nombre important de possibilités.

Une conversion au niveau de la source (fig.13a,13b) permet (avec l'implémentation de la régulation MPPT à ce niveau) de valoriser chaque source à son point de puissance maximale. Cependant, le nombre de convertisseurs nécessaires, leur tension d'entrée proche de 300mV, et la faiblesse des puissances mises en jeu (imposées par le dimensionnement des PCMs) rend la conversion très pénalisante en terme de rendement et de coûts. Si les PCMs ne présentent pas de dispersions importantes, une association parallèle en sortie des convertisseurs (fig.13a) permet d'implémenter une structure entrelacée qui peut soulager la conception des convertisseurs. Une association série (fig.13b) n'est possible qu'avec une isolation galvanique (synonyme de coûts) mais permet de diminuer les rapports d'élevation de chacun des convertisseurs.

L'association d'un grand nombre de micro-sources en série et/ou parallèle (fig.13d) s'avère quant à elle nuisible en terme de rendement à cause des dispersions inévitables des caractéristiques électriques et des couplages électrolytiques des PCMs.

L'association série et/ou parallèle de quelques piles (fig.13c) offre un compromis intéressant. Elle diminue les contraintes sur les convertisseurs et leur permet d'être conçu sous des technologies plus standard, leur autorisant un meilleur rendement et coût.

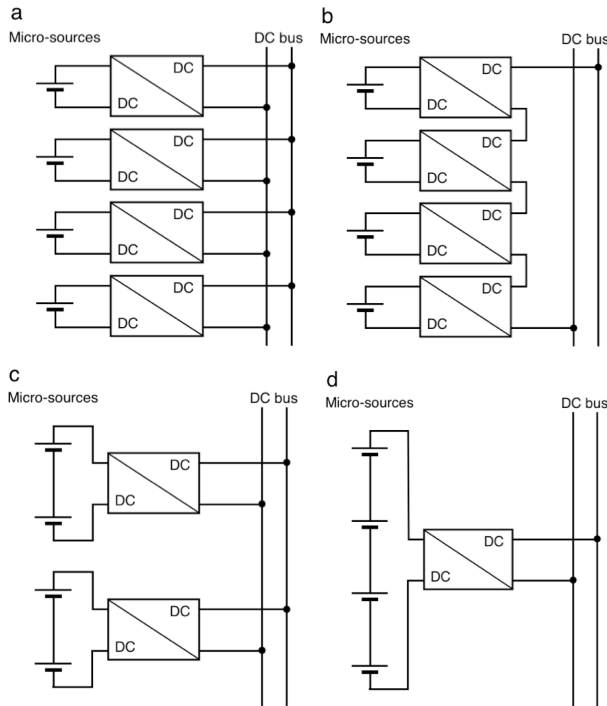


Figure 13: différentes topologies de réseau.

VII. MAXIMUM POWER POINT TRACKING (MPPT)

Les caractéristiques électriques statiques au niveau d'une PCM élémentaire mettent en évidence la présence d'un optimum de transfert de puissance (fig.3). Une récupération de l'énergie efficace passe par l'intégration de la fonctionnalité MPPT. La fonction MPPT peut être implémentée à différents niveaux du réseau. Elle a pour but de diminuer les impacts négatifs des dispersions des micro-sources dans le réseau, mais risque d'engendrer une complexité accrue, synonyme de coûts et de pertes énergétiques. Ces considérations viennent alimenter la réflexion du paragraphe précédent sur le dimensionnement du réseau et la répartition des convertisseurs.

Plusieurs méthodes permettent de rechercher le point de puissance maximale. La méthode de "Perturbation et Observation" est la plus utilisée car elle met en oeuvre un algorithme simple. La solution choisie doit être appropriée aux dynamiques très lentes des PCMs (fig.5-6). Les deux options numériques et analogiques sont à étudier. L'apparition de micro-contrôleurs et FPGAs très basse puissance (Actel IGLOO, Microchip AN1267) laisse à penser que la voie numérique pourrait être implémentée, même dans un contexte très basse puissance.

Des études indiquent que la manière dont on charge les PCMs a une influence sur les communautés bactériennes présentes [14]. Le MPPT ayant pour fonction d'adapter la charge des PCMs au point de puissance maximale, il serait intéressant d'étudier les conséquences du MPPT sur les caractéristiques électriques des PCMs sur le long terme.

VIII. CONCLUSIONS

Les défis énergétiques futurs imposent de diversifier nos ressources et de maîtriser notre consommation [15]. Dans cet article, nous présentons une démarche pour optimiser une architecture de puissance dans une approche globale qui fait intervenir sources, dispositifs de stockage éventuels, et interfaces électroniques de puissance commandées. La pluralité des leviers d'optimisation et leur interdépendance imposent une démarche globale et pluridisciplinaire.

IX. COLLABORATIONS

Le laboratoire Ampère a proposé deux projets ANR. Un avec les laboratoires G2ELab, Laplace et LGEP sur les réseaux de micro-convertisseurs, et un avec Suez, l'INSA de Toulouse, l'Université de Rennes et ENOSEO sur le développement pratique et la modélisation des PCMs.

X. REMERCIEMENTS

Les auteurs souhaitent remercier Damien Voyer, Gérard Scorletti et Benoit Bayon pour leurs conseils sur le modèle Matlab, Naoufel Haddour pour ses conseils en électrochimie, Delina Lyon pour son aide en microbiologie, et Pascal Bevilacqua qui développe le banc de test des PCMs.

XI. REFERENCES

- [1] J. Monier, L. Niard, N. Haddour, B. Allard, and F. Buret, "Microbial Fuel Cells: From biomass (waste) to electricity," *MELECON 2008 - The 14th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference*, 2008, pp. 663-668.
- [2] J. Monier, N. Haddour, T. Vogel, L. Niard, and F. Buret, "Les biopiles," *La revue 3 EI*, vol. 47, 2006, pp. 31-39.
- [3] A. Meehan and Z. Lewandowski, *Energy harvest with microbial fuel cell and power management system*, IEEE, 2009.
- [4] B. Allard, "L'électronique de puissance: Bases, perspectives, guide de lecture," *Techniques de l'ingénieur. Génie électrique*, vol. D4, 2006.
- [5] G. Fontès, "Modélisation et caractérisation de la pile PEM pour l'étude des interactions avec les convertisseurs statiques," 2005, <http://ethesis.inp-toulouse.fr/archive/00000143/>.
- [6] J. Ferrieux, "Alimentations à découpage convertisseurs à résonance: principes, composants, modélisation," 3^{ème} édition Dunod, 2006, ISBN 2 10 0050539 4.
- [7] "DC-DC Conversion Without Inductors," Maxim application note 725, 2009, pp. 1-9, <http://www.maxim-ic.com/app-notes/index.mvp/id/725>.

- [8] I. Ieropoulos, J. Greenman, and C. Melhuish, "Microbial fuel cells based on carbon veil electrodes: Stack configuration and scalability," *International Journal of Energy Research*, vol. 32, 2008, pp. 1228-1240.
- [9] A. Dekker, A. Ter Heijne, M. Saakes, H.V. Hamelers, and C.J. Buisman, "Analysis and improvement of a scaled-up and stacked microbial fuel cell.," *Environmental science & technology*, vol. 43, 2009, pp. 9038-42.
- [10] P. Aelterman, K. Rabaey, H.T. Pham, N. Boon, and W. Verstraete, "Continuous Electricity Generation at High Voltages and Currents Using Stacked Microbial Fuel Cells," *Environmental Science & Technology*, vol. 40, 2006, pp. 3388-3394.
- [11] L. Zhuang and S. Zhou, "Substrate cross-conduction effect on the performance of serially connected microbial fuel," *Electrochemistry Communications*, vol. 11, 2009, pp. 937-940.
- [12] O. Deleage, "Conception, réalisation et mise en oeuvre d'un micro-convertisseur intégré pour la conversion DC/DC," 2009, <http://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00435094/>.
- [13] N. Bouhalli, "Etude et intégration de convertisseurs multicellulaires parallèles entrelacés et magnétiquement couplés," 2009, <http://ethesis.inp-toulouse.fr/archive/00001008/>.
- [14] D.Y. Lyon, F. Buret, T.M. Vogel, and J. Monier, "Is resistance futile? Changing external resistance does not improve microbial fuel cell performance.," *Bioelectrochemistry*, 2009, pp. 1-6.
- [15] H. Morel and J. Cambronne, "Document de prospective SEEDS," 2009. <http://seedsresearch.eu>.