

Sujet de thèse :

Développement de nano-grids à base de piles microbiennes

Établissement d'inscription : UNIVERSITÉ CLAUDE BERNARD LYON 1

École doctorale : ED 160 EEA de Lyon

Unité de recherche : Laboratoire Ampère, UMR CNRS 5005

Financement : Contrat doctoral établissement

Co-directeurs de thèse : Fabien Mieyeville, Bruno Allard

Mots-clefs : Piles microbiennes, nano-grids résilientes, Convertisseur DC-DC, Systèmes d'énergie verte autonomes.

Résumé

L'accès à l'électricité dans les pays en voie de développement et en particulier dans les pays d'Afrique sub-saharienne est encore aujourd'hui un enjeu majeur avec un taux d'accès moyen de 25% à 50% à l'électricité et encore 700 millions d'individus sans accès direct à l'électricité. Le recours à des solutions de smart-grids, en particulier ses déclinaisons de mini/micro-grids est actuellement pressentie comme la piste de développement à privilégier. Ses émanations à échelle plus réduites comme les **nano-grids** sont privilégiées pour alimenter les endroits les plus reculés. Si le photovoltaïque et l'hydraulique fonctionnent bien pour des réseaux de grande échelle, les énergies alternatives à utiliser dans des réseaux de plus petite échelle sont à explorer. Dans ce contexte le recours à des **piles microbiennes** présente des perspectives intéressantes (empreinte carbone nulle, recyclabilité, coûts financier, facilité de déploiement car low tech) : le développement d'interfaces électroniques (de la conversion DC-DC à la connexion IoT) permettant leur interconnexion électrique et leur gestion intelligente par la collecte de données reste un enjeu majeur que cette thèse va adresser.

Abstract

Access to electricity in developing countries, and particularly in sub-Saharan Africa, is still a major challenge, with an average electricity access rate of 25% to 50%, and 700 million people still without direct access to electricity. The use of smart-grid solutions, in particular mini/micro-grids, is currently seen as the most viable development option. Its smaller-scale derivatives, such as nano-grids, are favored for powering even the most remote locations. While photovoltaics and hydropower systems work well for large-scale grids, alternative energies for use in smaller-scale grids need to be explored. In this context, the use of microbial batteries presents interesting prospects (zero carbon footprint, recyclability, financial costs, ease of deployment because low tech): the development of electronic interfaces (from DC-DC conversion to IoT connection) enabling their electrical interconnection and intelligent management through data collection remains a major challenge that this thesis will address.

Domaine et contexte scientifiques :

L'accès à l'électricité dans les pays en voie de développement et en particulier dans les pays d'Afrique sub-saharienne est encore aujourd'hui un enjeu majeur avec un taux d'accès moyen de 25% à 50% à l'électricité et encore 700 millions d'individus sans accès direct à l'électricité. Le recours à des solutions de smart-grids, en particulier ses déclinaisons de mini/micro-grids est actuellement pressentie comme la piste de développement à privilégier. Ses émanations à échelle plus réduites comme les **nano-grids** sont privilégiées pour alimenter les endroits les plus reculés.

Un nano-réseau ou nano-grid est un système de réseau électrique autosuffisant à petite échelle. Souvent plus petit qu'un micro-réseau, il est plus rapide, plus facile à déployer et plus abordable. Les nanoréseaux desservent principalement un seul bâtiment ou une charge spécifique, mais ils peuvent être regroupés pour répondre à une demande plus importante. Ce concept est un élément clé du développement des systèmes énergétiques intelligents. Contrairement aux réseaux plus importants, un nanoréseau fonctionne dans un seul domaine de puissance, qui englobe des aspects tels que la tension, la capacité, la fiabilité et l'administration. Il peut donc fonctionner indépendamment ou conjointement avec le réseau principal, en utilisant des sources d'énergie locales telles que des panneaux solaires, des éoliennes ou des batteries. Les nano-réseaux sont conçus pour améliorer la fiabilité, l'efficacité et la durabilité de l'énergie, en particulier dans les zones isolées ou en cas de panne du réseau. Ils permettent également un partage de l'énergie au travers d'une approche entre pair (P2P) permettant aux bâtiments d'un nanogrid de partager l'énergie excédentaire, ce qui accroît encore l'efficacité énergétique et réduit les coûts. Les **solutions de nano-grid DC** sont particulièrement étudiées dans les pays en voie de développement ou les régions isolées ayant besoin d'une résilience énergétique. Dans ce contexte, des solutions de stockage de l'énergie, telles que les batteries à l'état solide et les systèmes de stockage hybrides, sont essentielles pour garantir que les nanoréseaux puissent fournir une alimentation ininterrompue : se pose alors le problème supplémentaire de la robustesse de ces batteries en particulier dans un contexte d'environnement sévère (fortes températures, forte humidité, grande variabilité des paramètres environnementaux) et celui de leur empreinte écologique et la prise en compte du cycle de vie complet des batteries.

Les piles Microbiennes (MFC Microbian Fuel Cell) sont des piles fournissant de l'énergie au travers de la dégradation chimique d'eau polluée ou de sols contaminés. Ces piles de dimensionnement variable peuvent alimenter des bâtiments comme des systèmes embarqués et se prêtent donc particulièrement au concept de nano-grid. Elles sont à même de fournir un relais dans l'utilisation de solution de stockage et ouvre des perspectives intéressantes vis à vis des piles microbiennes (dont les piles à urine) où celles-ci se substitueraient aux solutions actuelles dont la recyclabilité, le coût carbone et le coût financier sont des freins. Le frein majeur à leur déploiement et développement est l'absence de circuits électroniques d'interface efficace permettant leur déploiement aussi aisé que les solutions de type photovoltaïque ou mécanique ou hydraulique.

Verrous scientifiques

Les verrous actuels au déploiement de nano-grids DC sur MFC sont l'inexistence de solution de conversion DC-DC optimale, leurs caractéristiques électriques et leurs variabilités rendant inopérant les solutions classiques développées pour les autres énergies alternatives. En effet, dans le cadre des systèmes à récupération d'énergie, il existe des architectures commerciales éprouvées et performantes comme la référence AEM30330C0010 de EPEAS ; les caractéristiques électriques des piles microbiennes rendent inadaptés les algorithmes communément utilisés pour assurer le maintien au point maximal de puissance extraite (MPP ou Maximum Power Point) plutôt dimensionnés pour des sources d'énergie de type mécanique ou solaire. Il est donc nécessaire de développer des circuits dédiés.

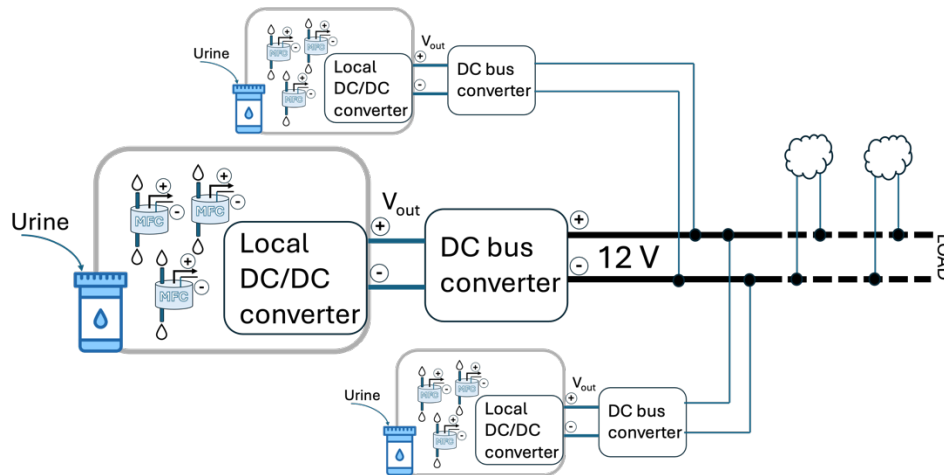
De plus le contexte de déploiement visé et la philosophie de circuit auto-alimenté à architecture minimaliste voire low-tech ouvre la voie à des architectures de circuits certes anciennes mais pour lesquelles les piles microbiennes présentent des perspectives intéressantes.

Objectifs de la thèse :

Les piles Microbiennes (MFCs), dans le cadre d'une approche décentralisée (smart-nanogrids DC), présentent des perspectives intéressantes sur 3 axes (ou scenario):

- 1) Compatibilité avec les micro-réseaux : Les MFCs peuvent être intégrées dans des nano-grids DC pour alimenter des capteurs, des LED, des petits appareils électroniques ou compléter d'autres sources renouvelables.

- 2) Fonctionnement en mode îloté : les MFCs peuvent être organisées en pack pour alimenter des applications hors réseau, par exemple dans des zones rurales, des stations de surveillance environnementale ou des installations agricoles autonomes.
- 3) Possibilité de stockage : l'énergie produite peut être stockée dans les piles microbiennes remplaçant les batteries classiques (et polluantes) pour être utilisée selon les besoins du nano-grid DC.



L'objectif de cette thèse est de développer le concept de nano-grids DC à base de MFC, en particulier par le développement d'interface électriques avec l'intégration de solutions low-tech orientées résilience (et intégrant une approche ACV) pour développer des MFCs « plug'n'play » c'est à dire des MFCs pouvant s'adjoindre automatiquement dans une nano-grid avec trois critères : optimiser leur rendement, s'auto-configurer pour s'adapter au réseau existant et assurer la remontée d'information sur la santé des MFCs et du nano-grid.

L'approche low-tech visée aura trois intérêts :

- résilience des systèmes
- déploiement dans des pays en voie de développement
- une maîtrise plus aisée de l'analyse du cycle de vie, du coût initial de fabrication au coût d'opération et de fin d'année.

Par ailleurs des dispositifs d'IoT (Internet des objets) seront également intégrés pour permettre la surveillance à distance, la détection des pannes et l'automatisation, améliorant ainsi la fiabilité et la sécurité des nano-réseaux.

Contributions originales attendues :

Développer un nano-grid DC à base de MFCs : méthodologie de conception, contrôle et électronique dédiée.

Caractérisation de la robustesse (tolérance, performance) du système face à plusieurs scenario intégrant l'aspect biologique de la biopile (inhomogénéité de fabrication, variabilité de substrat, dynamique de consommation électrique). Les scénarios appartiennent à deux familles d'implémentation et usage du microwatt (rechargement systèmes nomades) au watt (éclairage urbain) voire la dizaine de watts (substitut de réseau électrique local "off-grid").

Programme de recherche et démarche scientifique proposée :

- **Année 1** : étude bibliographique; immersion technique et technologique dans l'écosystème des biopiles (fabrication, caractérisation du comportement statique et dynamique dans le temps). Identification d'architecture low-tech compatibles dans la lignée des travaux existants (COST PHOENIX, architecture à capacité commutée sur LM2663). Écriture des cahiers de charges des scenarios.
- **Année 2** : Conception des deux architectures les plus prometteuses de nano-grid pour couvrir les deux scenarios (intégration micro-réseaux et mode îloté). Validation expérimentale : réalisation des prototypes physiques, caractérisation et déploiement en laboratoire sur biopiles actives.
- **Année 3** : Validation des architectures sur terrain opérationnel dans le cadre du partenariat avec Southampton et l'université de Buea.

Financement de la thèse : Contrats Doctoraux ED EEA, 36 mois.

Profil du candidat recherché (prérequis) :

Le/la candidat-e [Master 2 Recherche ou élève ingénieur-e] devra avoir de bonnes connaissances en instrumentation, en électronique embarquée et en conception de circuit sur PCB.

Objectifs de valorisation des travaux de recherche :

Présentations orales ou posters dans des colloques nationaux et conférences internationales (MEEPS 2027 ou MEEPS 2028) en fin de 1ère et de 2ème année de thèse.

Publication dans une à deux revues internationales à comité de lecture en milieu de 3° année de thèse (Elsevier et/ou IEEE).

Compétences qui seront développées au cours du doctorat :

Les compétences développées relèvent de la gestion de systèmes énergétiques décentralisés, la conception et optimisation de convertisseurs de puissance DC-DC, la caractérisation de biopiles pour des applications énergétiques renouvelables. Ces compétences incluent également la modélisation, l'analyse des performances et l'intégration de sources d'énergie renouvelables dans des réseaux autonomes.

Perspectives professionnelles après le doctorat :

Emploi dans le domaine privé ou carrière académique (chercheur, enseignant-chercheur).

Références bibliographiques sur le sujet de thèse :

- [1] « Africa Energy Outlook 2022 », International Energy Agency, Report, 2022.
- [2] Richard, N. Saincy, N. Le Saux, D. Frey, M.-C. Alvarez-Herault, B. Raison, A new electrification model to end energy poverty: An example from a novel rural electrification approach in madagascar, IEEE Electrification Magazine 11 (2) (2023) 62–73. doi:10.1109/MELE.2023.3264922.
- [3] M. Koepke, S. Groh, Against the odds: The potential of swarm electrification for small island development states, Energy Procedia 103 (2016) 363–368, renewable Energy Integration with Mini/Microgrid – Proceedings of REM2016. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.11.300>.
- [4] A. Mukimin, H. Vistanty, Low carbon development based on microbial fuel cells as electrical generation and wastewater treatment unit 44 132–138. doi:10.1016/j.ref.2022.12.005
- [5] G. Puthilibai, V. Chithra, R. Deepashri, R. Jeyashri, V. Devatarika, R. Robert, An Intelligent Approach for Electricity Generation: Microbial Fuel Cell, in: 2022 International Conference on Power, Energy, Control and Transmission Systems (ICPECTS), IEEE, pp. 1–4. doi:10.1109/ICPECTS56089.2022.10046995.
- [6] J. Prasad, R. K. Tripathi, Review on improving microbial fuel cell power management systems for consumer applications 8 10418–10433. doi:10.1016/j.egy.2022.08.192.
- [7] A. Mukherjee, V. Patel, M. T. Shah, D. A. Jadhav, N. S. Munshi, A. D. Chendake, D. Pant, Effective power management system in stacked microbial fuel cells for onsite applications 517 230684. doi:10.1016/j.jpowsour.2021.230684.
- [8] E. Osorio de la Rosa et al., « Plant Microbial Fuel Cells–Based Energy Harvester System for Self-powered IoT Applications », Sensors, vol. 19, no 6, p. 1378, mars 2019, doi: 10.3390/s19061378.
- [9] L.-p. Fan, X. Feng, Q-Learning based Maximum Power Point Tracking Control for Microbial Fuel Cell 15 (10) 9917–9932. doi:10.20964/2020.10.63.
- [10] R. Fernandez Feito, T. Younas, R. M. Dinsdale, Evaluation of a comprehensive power management system with maximum power point tracking algorithm for multiple microbial fuel cell energy harvesting 155 108597. doi:10.1016/j.bioelechem.2023.108597.