

Alimentation de capteur autonome avec des biopiles à base de plantes

Grégory Bataillou^a, Olivier Ondel^a, Naoufel Haddour^{a,*}

^aLaboratoire Ampère, Ecole Centrale de Lyon, 36 Avenue Guy de Collonges, 69134 Ecully

RESUME —Les biopiles à base de plantes sont des systèmes électrochimiques qui produisent de l'énergie électrique à partir de la croissance de la plante. Bien que très limité en puissance, ces systèmes sont prometteurs pour alimenter des capteurs autonomes dans des endroits isolés, par exemple. Dans cet article, un démonstrateur avec des biopiles à base de papyrus est présenté. Ces dernières ont permis d'alimenter un microcontrôleur toutes les heures afin de faire des mesures de température et d'humidité, et de le transmettre sans fil à un serveur web, permettant d'afficher les données en temps réel depuis n'importe quel ordinateur connecté au réseau.

Mots-clés —*Biopiles, biopiles à base de plantes, grappillage d'énergie, alimentation*

1. INTRODUCTION

Les biopiles à base de plante sont des systèmes de conversion d'énergie solaire en énergie électrique. La conversion se fait par l'intermédiaire de la photosynthèse d'une plante, qui fabrique de la matière organique et dont une partie est excrétée par les racines[1]. En plaçant une électrode au niveau des racines, cette matière organique excrétée peut être oxydée par des bactéries appelées électro-actives, capables de transférer leurs électrons issus de l'oxydation à un accepteur d'électrons externe comme une électrode jouant le rôle d'anode. Une cathode est placée à la surface pour fermer le circuit par la réduction du dioxygène en eau [2]. Le niveau de puissance de ces systèmes ($\sim 10mW.m^{-2}$) permet d'envisager leur utilisation pour le grappillage d'énergie comme l'alimentation de capteurs autonomes par exemple. En 2016, Brunelli et al. présentent un système permettant d'utiliser les biopiles à base de plantes comme source d'alimentation d'un capteur autonome transmettant des informations environnementales sans fil comme l'humidité ou la lumière [3]. Depuis, quelques travaux présentent l'utilisation de biopiles à base de plantes ou de sédiments pour alimenter des réseaux de capteurs sans fil [4], [5]. Ces travaux se concentrent essentiellement sur le convertisseur de tension entre la biopile et le système à alimenter, sans expliciter le système complet, incluant l'interface permettant la récupération des données et l'affichage pour un monitoring en temps réel. Ainsi, dans la continuité de ces travaux, un démonstrateur est présenté pour alimenter un capteur autonome de température et d'humidité à partir de biopiles à base de *Cyperus papyrus* et transmettre les données sans fil à une interface web accessible depuis n'importe quel ordinateur connecté au réseau.

2. MATERIELS ET METHODES

2.1. Système de transmission de données

Le microcontrôleur ESP32 a été choisi pour sa grande disponibilité (et donc son faible coût), sa facilité de programmation, sa faible consommation d'énergie et sa capacité à transmettre des données en Bluetooth Low Energy (BLE). Relié via le protocole *i2C* au capteur de température et d'humidité faible puissance Si7021, le système peut être programmé pour réaliser une mesure, se connecter à un serveur BLE (ici, un autre microcontrôleur du même modèle), et transmettre les données avant de se mettre en veille pendant un temps donné. La mesure reçue est alors stockée dans une base de données. Cette base de données était accessible via une interface web développée dans le framework Django (Python), dont le code est disponible sur Gitlab [6] (voir. Fig.1). Un code Javascript AJAX permettait de mettre à jour les données toutes les 10 secondes, sans avoir à recharger la page.

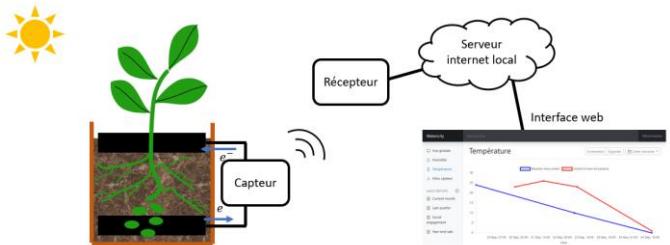


Fig.1. : Conception de l'alimentation du microcontrôleur et du capteur

2.2. Conversion de puissance

Les biopiles à base de papyrus sont des sources de tension très faibles ($< 800mV$), avec des impédances internes élevées ($> 200\Omega$), ce qui rend difficile leur utilisation directe sans dispositif de conversion électronique de puissance. Un convertisseur a donc été utilisé. Ce dernier permettait d'élever la tension pour charger une supercapacité C qui, une fois chargée à la tension de fonctionnement du microcontrôleur, l'alimentait (voir Fig.2). Le choix de la valeur de C s'est basé sur le calcul de l'énergie nécessaire à alimenter le microcontrôleur et le capteur pour la réalisation d'une mesure, et l'envoi en Bluetooth Low Energy (BLE) de la mesure, entre la tension maximale $V_{max} = 3.6V$ et la tension minimale $V_{min} = 2.6V$ de fonctionnement du microcontrôleur :

$$\frac{1}{2}C(V_{max}^2 - V_{min}^2) > E_{\mu\text{contrôleur}} \quad (1)$$

*Correspondance : naoufel.haddour@ec-lyon.fr

L'énergie nécessaire à la mesure et l'envoi sans fil étant déterminée grâce à la mesure du courant d'alimentation du microcontrôleur.

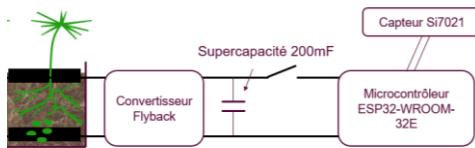


Fig.2. : Conception de l'alimentation du microcontrôleur et du capteur

Quelques convertisseurs commerciaux sont déjà utilisés dans la littérature [7], [8], mais l'algorithme de recherche du point de fonctionnement à puissance maximale de ces systèmes n'est pas compatible avec les constantes de temps des biopiles [9]. Un convertisseur-élévateur de tension continue de type Flyback est utilisé. Ce convertisseur est décrit dans les travaux de *Capitaine et al.* [10]. Son principe consiste à éléver premièrement la tension grâce à une pompe de charge S882-Z, afin d'alimenter un oscillateur monitorant le transistor du Flyback (voir Fig.3). Le principal intérêt de ce convertisseur est la possibilité de paramétriser son impédance à partir du choix des composants. Or, le point de puissance maximal correspond à une égale impédance de la source et du convertisseur. En récupérant la résistance interne de la biopile à partir de la courbe de polarisation (Fig. 4), le choix de la fréquence d'oscillation de fonctionnement du flyback permettait ensuite d'adapter son impédance R_{in} à celle interne du système des biopiles à base de papyrus avec la formule suivante :

$$R_{in} = \frac{V_{in}}{i_{m_{AVG}}} = \frac{2L_m f}{d_m^2} \quad (1)$$

Où V_{in} est la tension d'entrée, $i_{m_{AVG}}$ est le courant moyen dans l'inductance primaire, L_m est la valeur de l'inductance primaire, f est la fréquence et d_m est le rapport cyclique du signal (pris ici à 0.5).

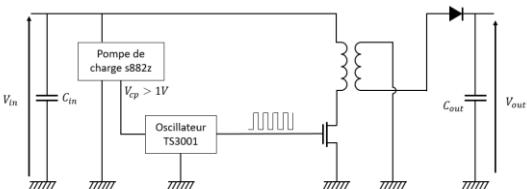


Fig.3. : Conception du convertisseur de puissance entre la biopile et le microcontrôleur

La résistance interne choisie était de 400Ω , ordre de grandeur usuel pour les biopiles à base de plantes poussant dans ce type de milieu. Les caractéristiques des composants sont présentées Table 1. L'étude s'est concentrée sur la charge/décharge de la supercapacité, sans prendre en compte le mode « démarrage à froid ». La tension initiale aux bornes de la supercapacité a donc été imposée à 2.4V avant d'être branchée en sortie du convertisseur.

Paramètres	Valeur	Choix composant
L_m	10mH	78601/9C
f	5.1kHz	$R_{SET} = 21M\Omega$

Table 1. Composants choisis pour le convertisseur

2.3. Mise en place des biopiles à base de plantes

Trois biopiles à base de *Cyperus papyrus* (bonne résistance au sol immersé et bon développement racinaire) ont été lancées dans des pots individuels coniques de 3,5 L. Les électrodes étaient toutes en feutre de carbone (épaisseur de 5mm, Graphitech®), et les collecteurs (acier inoxydable de section 0.25mm, GoodFellow®) étaient tissées sur les électrodes, puis comprimés à l'aide de disques en PMMA et d'écrous en nylon, de manière à garantir un bon contact entre le collecteur et l'électrode. L'anode était placée à 4cm du fond du pot et la cathode était posée à la surface, ce qui laissait une distance inter-electrode de 9cm. Une résistance externe de 330Ω était connectée en permanence aux bornes des biopiles. La tension à ses bornes était mesurée le temps de la croissance du biofilm pour s'assurer de leurs bons fonctionnements (voltmètres EasyLogger ®). Lorsque le biofilm était arrivé à maturation, les biopiles étaient transplantées dans un grand bac et connectées en parallèle pour être utilisées comme démonstrateur. Dès lors, des courbes de polarisation étaient réalisées par variation de la résistance externe et mesure de la tension après stabilisation d'au moins 20 minutes.

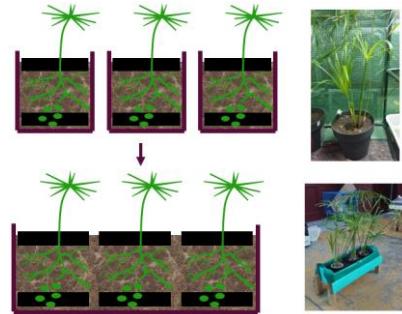


Fig.4. Mise en place des biopiles à base de papyrus

3. RESULTATS

3.1. Biopiles à base de Papyrus

Les biopiles à base de *Papyrus* ont produit une densité maximale de puissance de $2mW.m^{-2}$ de surface plantée. Cela est très faible relativement à d'autres plantes de la littérature ($\sim 60mW.m^{-2}$), ce qui peut s'expliquer par un facteur d'échelle et/ou une relativement mauvaise excrétion racinaire des *Cyperus papyrus* (avec potentiellement un apport de dioxygène néfaste pour le biofilm anodique). Néanmoins, l'utilisation de ce système est toujours envisageable. La résistance interne extrapolée de la courbe V-I était de 180Ω , ce qui était nettement inférieure à celle choisie par le convertisseur. Néanmoins, la résistance interne est amenée à être modifiée au cours du temps. Prendre une valeur supérieure pour le convertisseur permet de s'assurer de rester dans un mode sans pertes de concentration, souvent néfaste pour les bactéries électro-actives qui se retrouvent sans substrat organique

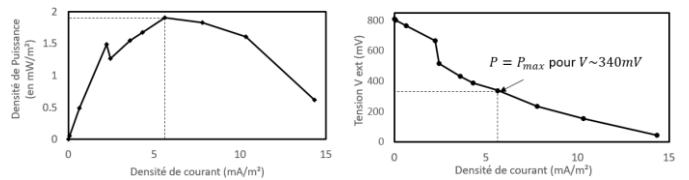


Fig.4. Courbe de polarisation des biopiles à base de papyrus en parallèle

3.2. Transmission

L'énergie requise pour faire fonctionner le microcontrôleur et garantir le transfert de données était inférieure à 1J, avec une consommation moyenne de l'ordre de $100mA$ (voir Fig.5). Cela nécessitait une supercapacité de $200mF$. Le temps de charge de la supercapacité par les biopiles à base de plantes était de 2h (pour la charger de 2.8 à $3.6V$). Lorsque la capacité était déchargée à $2.9V$, le signal avait bien pu être transmis, et l'interface web affichait le nouveau point dans les 10 secondes suivant la transmission.

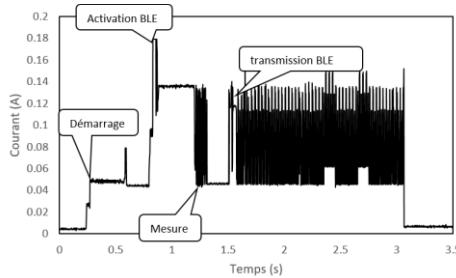


Fig.5. Suivi du courant d'alimentation du microcontrôleur pendant la mesure et l'envoi des données en BLE

3.3. Convertisseur

Le convertisseur maintenait une tension d'entrée de $320-360mV$, ce qui correspond bien au point de puissance maximal de la biopile à base de plante. Cela signifiait également que la résistance interne de la biopile avait évolué entre le moment de la courbe de polarisation et le moment de la conversion de puissance (quelques semaines), ce qui prouve l'aspect dynamique du système et qui justifie de nouveau la marge prise dans le choix de l'impédance du convertisseur. Lorsque le convertisseur n'était pas utilisé, une résistance externe était connectée aux biopiles pour maintenir le flux électronique. Cela permettait ainsi de maintenir l'oxydation des excréptions racinaires par les bactéries électro-actives. Il est intéressant de noter que le choix de la résistance externe et donc du point de fonctionnement des biopiles semblait avoir un impact fort sur les performances du convertisseur, ce qui pouvait être expliqué par une variation du potentiel imposé sur l'anode, affectant directement la structuration et la composition du biofilm (comme déjà énoncé par González et al. [11]). 120 minutes étaient suffisantes pour charger la supercapacité de 2.9 à $3.6V$, et fournir ainsi assez d'énergie pour réaliser une mesure (voir Figure 6). La fréquence relativement faible des mesures s'explique par la faible puissance obtenue avec les plantes de papyrus en comparaison avec ceux obtenus dans la littérature. Avec les résultats obtenus par Strik et al. [12] en utilisant la plante *Glyceria maxima* (milieu équivalent), la densité de puissance maximale est plus de 30 fois supérieure, ce qui permettrait d'obtenir des mesures toutes les 4 minutes.

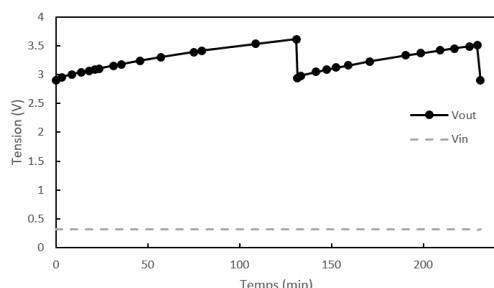


Fig.6. Cycle de charge-décharge de la supercacité (Vout) et tension en entrée du convertisseur (Vin)

4. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Un démonstrateur de l'utilisation de biopiles à base de plantes a été présenté. Trois biopiles à base de papyrus ont permis d'alimenter un microcontrôleur pour faire des mesures de température et d'humidité, avant de les envoyer sans fil à un serveur BLE, lequel était connecté à un serveur web permettant de profiter du suivi des mesures en temps réel. Les papyrus n'ont pas beaucoup produit d'énergie électrique, relativement aux résultats trouvés dans la littérature, ce qui peut venir d'une faible exsudation racinaire de ces plantes (qui se plaisaient malgré tout dans cet environnement), ou d'un apport d'oxygène de la plante à ses racines, inhibant le développement de bactéries électro-actives. Elles ont tout de même fourni suffisamment d'énergie pour réaliser une mesure toutes les 2 heures, ce qui ouvre la voie vers un système avec d'autres plantes plus performantes. Un des verrous technologiques reste le déclenchement automatique de l'alimentation du microcontrôleur une fois la tension souhaitée atteinte. Un système Under Voltage Lockout (UVLO) déjà utilisé dans la littérature a été testé [13], mais celui-ci reste bloqué juste avant son déclenchement, dans le domaine linéaire des transistors, à cause de la faible vitesse de charge de la supercapacité. De nouveaux prototypes de UVLO fonctionnels sont à l'étude pour automatiser le prototype.

5. REFERENCES

- [1] R. Nitisoravut et R. Regmi, « Plant microbial fuel cells: A promising biosystems engineering », *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 76, p. 81-89, sept. 2017, doi: 10.1016/j.rser.2017.03.064.
- [2] F. T. Kabutey et al., « An overview of plant microbial fuel cells (PMFCs): Configurations and applications », *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 110, p. 402-414, août 2019, doi: 10.1016/j.rser.2019.05.016.
- [3] D. Brunelli, P. Tosato, et M. Rossi, « Flora Health Wireless Monitoring with Plant-Microbial Fuel Cell », *Procedia Engineering*, vol. 168, p. 1646-1650, janv. 2016, doi: 10.1016/j.proeng.2016.11.481.
- [4] M. Niwa, Z. Pan, et S. Shimamoto, « IoT Sensor Network Powered by Sediment Microbial Fuel Cell », in *2020 IEEE 17th Annual Consumer Communications & Networking Conference (CCNC)*, janv. 2020, p. 1-5. doi: 10.1109/CCNC46108.2020.9045606.
- [5] S. Puengsungwan, « Wireless Sensor Networks (WSNs) based on the Existing Perception for Monitoring Rice-Paddy Health », in *2022 37th International Technical Conference on Circuits/Systems, Computers and Communications (ITC-CSCC)*, juill. 2022, p. 298-301. doi: 10.1109/ITC-CSCC55581.2022.9895072.
- [6] G. Bataillou, « Interface web environnementale », *GitLab*, 17 mai 2023. <https://gitlab.com/GregoryBataillou/webweather> (consulté le 19 mai 2023).
- [7] F. Khaled, O. Ondel, et B. Allard, « Microbial fuel cells as power supply of a low-power temperature sensor », *Journal of Power Sources*, vol. 306, p. 354-360, févr. 2016, doi: 10.1016/j.jpowsour.2015.12.040.
- [8] X. A. Walter, C. Santoro, J. Greenman, et I. A. Ieropoulos, « Scalability and stacking of self-stratifying microbial fuel cells treating urine », *Bioelectrochemistry*, vol. 133, p. 107491, juin 2020, doi: 10.1016/j.bioelechem.2020.107491.
- [9] N. Degrenne, « Gestion de l'énergie des piles à combustible microbien », 2012.
- [10] A. Capitaine, G. Pillonnet, T. Chailloux, O. Ondel, et B. Allard, « $10\mu W$ converter for energy harvesting from sedimentary microbial fuel cells », in *2017 IEEE 60th International Midwest Symposium on Circuits and Systems (MWSCAS)*, août 2017, p. 337-340. doi: 10.1109/MWSCAS.2017.8052929.
- [11] A. González Del Campo, P. Cañizares, J. Lobato, M. Rodrigo, et F. J. Fernández Morales, « Effects of External Resistance on Microbial Fuel Cell's Performance », in *Environment, Energy and Climate Change II*, G. Lefebvre, E. Jiménez, et B. Cabañas, Éd., in *The Handbook of Environmental Chemistry*, vol. 34. Cham: Springer International Publishing, 2014, p. 175-197. doi: 10.1007/698_2014_290.
- [12] D. P. B. T. B. Strik, H. V. M. Hamelers (Bert), J. F. H. Snel, et C. J. N. Buisman, « Green electricity production with living plants and bacteria in a fuel cell », *International Journal of Energy Research*, vol. 32, n° 9, p. 870-876, 2008, doi: 10.1002/er.1397.

- [13] S.-E. Adami, « Optimisation de la récupération d'énergie dans les applications de rectenna », These de doctorat, Ecully, Ecole centrale de Lyon, 2013. Consulté le: 27 octobre 2022. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.theses.fr/2013ECDL0051>