

Production d'électricité verte via une plante vivante '*Watsonia sp*' dans la pile à combustible microbienne

Yamina Mounia Azri *, Insaf Tou, Meriem Sadi et Yacine Bouzidi

Centre de Développement des Energies Renouvelables, CDER
B.P. 62, Route de l'Observatoire, 16340 Bouzareah, Algiers, Algeria

(reçu le 39 Novembre 2014 – accepté le 30 Mars 2015)

Résumé - Les piles microbiennes à plante (PMP), sont des systèmes bioélectrochimiques très prometteurs pour la génération d'une énergie verte renouvelable et durable. Dans la présente étude, la possibilité de générer de la bioélectricité à partir de l'énergie solaire et de la biomasse a été démontrée, sur les principes de l'activité biologique du sol en utilisant une plante vivante *Watsonia sp* cueillie du jardin du CDER. Le suivi de la génération de la bioélectricité en présence de la plante nous a permis d'enregistrer un rendement de 90 % plus important par rapport à celui généré en son absence. Une production de courant atteignant 0.1 mA est obtenue dans les conditions d'ensoleillement. Des pics des valeurs les plus élevées du courant, sont enregistrés aux moments d'intensité lumineuse importante de la journée (entre 12 h -14 h), ce qui a été confirmé par la réduction de la tension de plus de 30% quand *Watsonia sp* était placée à l'éclairage du laboratoire. La plante *Watsonia sp* présente donc un excellent outil biologique pour la production de la bioélectricité. Le rendement en courant peut être augmenté en optimisant les conditions physico-chimiques (sol, pH, température, nutriments....) et électrochimiques (matériaux des électrodes) ou en adoptant une autre espèce de plante.

Abstract – Microbial cell plant (PMP), are very promising bioelectrochemical systems for a renewable and sustainable green energy generation. In this study, we demonstrate the possibility to generate bio-electricity from solar energy and biomass, on the biological activity soil principles, using a live plant *Watsonia sp* picked from the CDER garden. The bioelectricity generation monitoring with *Watsonia sp* allowed us to register a yield of 90 % higher than that a current generated without the plant. A power output reaching 0.1 mA is obtained under sunlight conditions. The light intensity influence was demonstrated by the current highest value speaks, recorded at the important day light intensities times (between 12h-14h), which was confirmed by the voltage reduction more than 30 % under laboratory lighting without sunlight irradiation. The *Watsonia sp* plant is an excellent biological tool for bioelectricity production. The current efficiency can be increased by optimizing the physicochemical (soil, pH, temperature, nutrients....) and electrochemical (electrode materials) conditions, or by using other plant species.

Mots clés: Pile microbienne à plante – Bioélectricité - *Watsonia sp* - Génération du courant – OVC – Photosynthèse.

1. INTRODUCTION

En Algérie, la demande en électricité a connu une progression fulgurante ces dernières années atteignant 15 à 20% selon des chiffres avancés par le ministère de l'énergie et des mines. Pour faire face à cette demande nationale, l'état prévoit de renforcer son énergie par des centrales nucléaires d'ici 2025, en attendant ; l'énergie de l'Algérie est uniquement fossile.

Cependant, trouver de nouvelles sources d'énergie, tels que les sables bitumeux et le gaz de schiste peuvent être un exploit techniquement difficile et ne respectant pas l'environnement, en parallèle l'Algérie s'engage avec détermination sur les énergies

* y.azri@cder.dz

renouvelables aux défis environnementaux et aux problématiques de la préservation des ressources énergétiques fossiles.

Afin de répondre à la demande future en électricité, l'appel aux énergies alternatives est nécessaire. La pile à combustible microbienne à plante [1], est une nouvelle technologie alternative renouvelable et durable de la production d'électricité à partir de la biomasse.

En effet le principe de la pile microbienne à plante est de transformer l'énergie solaire en énergie électrique par oxydation des rhizodépôts catalysés par des bactéries rhizosphériques électrochimiquement actifs [2].

La pile microbienne à plante est constituée d'une plante, une anode et une cathode. Les racines des plantes et les micro-organismes rhizosphériques, sont en interaction étroite par le biais de processus biochimiques et électrochimiques complexes.

Les plantes produisent de la matière organique via la photosynthèse, qui est oxydée par les micro-organismes de la rhizosphère, libérant ainsi des électrons captés par l'anode introduite au niveau des racines (la rhizosphère), ces électrons sont transférés à la cathode qui se trouve à la surface du sol, ce transfert permettrait de générer de l'électricité.

La photosynthèse joue un rôle primordial pour la production énergétique. En captant les rayons du soleil, la photosynthèse permet de fixer le CO₂ par la partie aérienne de la plante sous forme de carbohydrates, dont 70% environ migre vers les racines, ensuite libéré au niveau de la rhizosphère [3].

Les racines des plantes libèrent au niveau de la rhizosphère différents types de composés organiques, à savoir: les exsudats (sucres, acide organique, etc...), excrétiions (carbohydrate polymérique et enzymes), lysats (cellules mortes) des gaz (éthylène et CO₂) par le processus de rhizodéposition [3].

La rhizosphère fournit un environnement favorable à la colonisation microbienne qui est bénéfique pour le microenvironnement du sol, ce dernier participe à l'oxydo-réduction de la matière organique par les microorganismes produisant ainsi de la bioélectricité.

Les exsudats représentent une ressource énergétique facilement et rapidement assimilée par de nombreux habitants du sol, ils stimulent ainsi le développement et la prolifération des microorganismes rhizosphériques, qui stimulent à leur tour l'exsudation racinaire, faisant de ce milieu une zone biologique très dynamique et active [4, 3].

La plante représente de ce fait, une pile qui charge son énergie grâce à la rhizosphère par le rayonnement solaire en électricité verte [5].

Dans ce travail, nous explorons la faisabilité de produire de la bioélectricité avec une plante vivante *Watsonia sp.* issue du jardin du CDER. Une évaluation comparative de l'activité électrique est étudiée avec et sans plante, ainsi que l'effet de la photosynthèse.

Des paramètres électrochimiques sont examinés afin d'apprécier la production électrique en mesurant la tension en circuit ouvert 'open voltage circuit', -OVC-, et l'intensité du courant I à résistance externe constante $R = 100 \Omega$. Les électrodes de graphite sont utilisées comme anode et cathode dans nos expérimentations. Le suivi des paramètres est assuré par un multimètre digital 'Astonia M890C+'.

2. MATERIEL ET METHODES

2.1 Critères de sélection de la plante

Le choix de la plante est basé sur sa capacité à tolérer un arrosage fréquent, afin de maintenir un milieu aqueux et faciliter de ce fait, l'échange d'électrons et le transfert

ionique. La *Watsonia sp.* communément appelée 'cape Bugle lily' est une plante herbacée vivace de la famille iridaceae, elle pousse généralement dans les régions de semi-ombre ou en soleil direct. Les racines de la plante se présentent sous forme de bulbe/tubercule avec des fleurs rouges, roses ou blanches, et la période adéquate de sa plantation est l'automne. Recueillie dans le jardin du CDER, *Watsonia sp.* a fait l'objet de notre outil biologique de base pour nos expérimentations.

2.2 Préparation de la pile microbienne à plante

La pile à plante a été conçue au laboratoire du CDER en utilisant un pot en PVC (polychlorure de vinyle) rempli de terre du jardin du CDER. Une anode est placée verticalement au niveau des racines de la plante et une cathode en surface du sol, sans l'utilisation de membrane spécifique.

Les électrodes sont en graphite massif, qui est un matériau chimiquement stable dans le milieu naturel, biocompatible avec l'environnement, peu cher, un bon conducteur de courant, facile à utiliser, et possède une grande surface active permettant d'obtenir de meilleurs rendements pour le développement des piles.

2.3 Suivi des cinétiques électrochimiques

La plante *Watsonia sp.* a été plantée au début de la croissance biologique à quelques centimètres de hauteur, les performances de la pile microbienne à plante (PMP) ont été continuellement évaluées pendant 50 jours, du mois de Décembre 2013-Février 2014. Deux jours de chaque semaine, la plante est exposée à la lumière pendant 7 ± 2 jours/semaine et arrosée quotidiennement avec de l'eau du robinet du CDER. Le volume d'eau pour chaque arrosage était de 100 ml, 9h-12h-15h.

L'activité électrique de la plante a été mesurée en enregistrant la différence de potentiel entre l'anode et la cathode (tension en circuit ouvert, 'OVC' et l'intensité du courant I à résistance externe constante $R=100\Omega$). Les données ont été prélevées trois fois par jour (8h-14h-17h), en utilisant le multimètre.

Dans la présente étude, nous démontrons la possibilité de convertir l'énergie solaire en énergie électrique en se basant sur les principes de la photosynthèse via la PMP. L'importance de l'intensité lumineuse a été illustrée par les valeurs les plus élevées du courant généré pendant la journée, par la plante mise à l'extérieur sous rayonnement du soleil, en indiquant la dépendance ou non de la production électrique de la lumière impliquant le processus de la photosynthèse.

L'effet de la lumière, est confirmé en comparant la tension en circuit ouvert produite par la plante placée à l'intérieur (sous éclairage du laboratoire), et celle mise à l'extérieur (en conditions d'enseillement).

3. RESULTATS ET DISCUSSION

3.1 Configuration de la cellule microbienne à plante

La figure 1 illustre le schéma expérimental adopté pour l'étude de la pile microbienne à plante (Fig. 1a), ainsi que la vue de la plante *Watsonia sp* au niveau du laboratoire, (Fig. 1b).

3.2 Test de faisabilité

La faisabilité de la production du courant via la pile microbienne à plante, est mise en évidence en comparant la production du courant en présence et en absence de la plante, pendant 15 jours, les résultats sont représentés sur la figure 2.

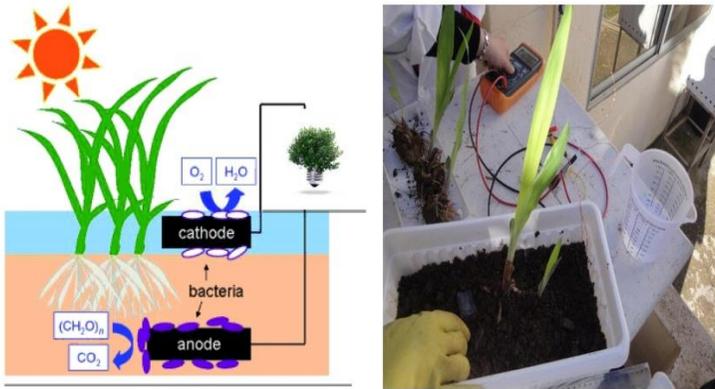


Fig. 1: Schéma de la pile microbienne à plante

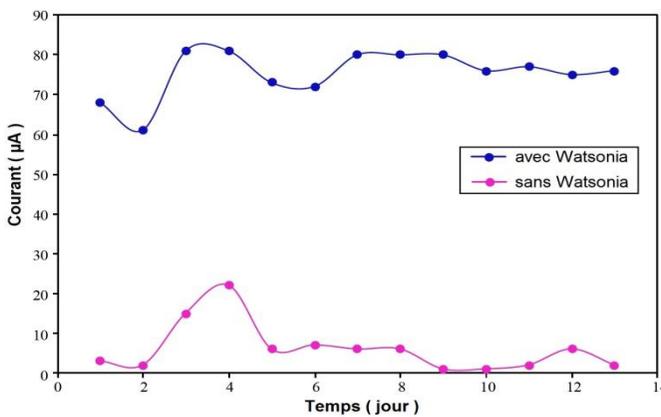


Fig. 2: Test de faisabilité avec et sans plante

La production du courant a été enregistrée à partir du deuxième jour de la plantation. En absence de la plante *Watsonia sp.*, l'intensité du courant est réduite jusqu'à 95 % par rapport à celle produite en présence d'un sol avec la plante. Cela peut être expliqué par l'effet de l'activité microbienne rhizosphérique sur la matière organique présente dans le sol.

En effet, un sol dépourvu de la plante implique l'absence des exsudats racinaires et représente de ce fait une activité microbienne dix fois inférieure à l'activité d'un sol en présence de racines (plante), [1].

Il a été également démontré dans une autre étude, en utilisant la plante du riz, que le courant produit en présence de la plante était sept fois supérieur à celui produit par le sol uniquement [6]. Cependant, les processus microbiologiques et physico-chimiques du sol, des sous-terrains ou qui se déroulent en surface restent encore très peu connus jusqu'à nos jours, [7].

3.3 Evolution de la tension en circuit ouvert

La tension la plus élevée produite dans une PMP est la tension en circuit ouvert OVC, qui peut être mesurée avec un circuit déconnecté (sans résistance), [8]. Même si la tension en circuit ouvert ne mesure pas, le flux du courant électrique produit par la plante, néanmoins, elle peut mesurer l'activité des réactifs anodiques et cathodiques à la surface des électrodes.

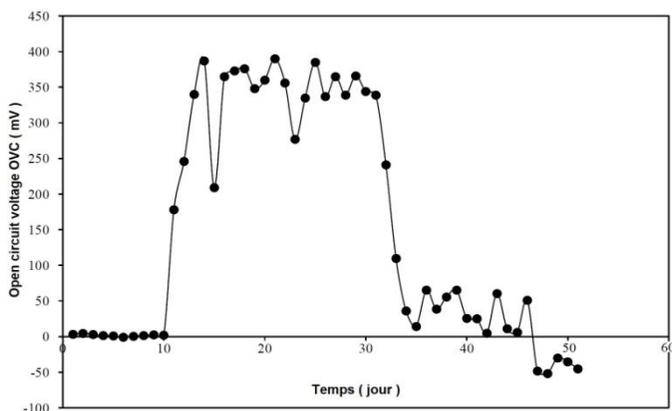


Fig. 3: Evolution de la tension en circuit ouvert (OVC) en fonction du temps

La figure 3 présente l'évolution de la tension maximale produite par la plante *Watsonia sp.* La courbe se divise en 3 zones distinctes. Durant les 10 premiers jours, une très faible activité est enregistrée, pouvant être due au temps nécessaire pour la formation du biofilm électro-actif au niveau de l'anode et la fabrication des enzymes nécessaires pour le transfert des électrons hors la cellule bactérienne, [9]. Après les 10 jours, une forte augmentation de la tension (OVC) atteignant 400 mV est notée, ce qui peut s'expliquer par la formation du biofilm sur la surface de l'anode. Après 20 jours d'activité, la tension chute brutalement, due principalement à une série de réactions de limitations, imposées par les communautés bactériennes spécifiques catalysant la réaction anodique, qui réduisent la différence du potentiel global, [10], ou à un changement de la composition de la communauté microbienne influencé par le temps et par plusieurs facteurs comme: les variations physico-chimiques du sol (pH, et teneurs en C, N et P...) et les interactions plante-microorganismes, [7].

3.4 Evolution du courant produit

Le courant produit par la pile microbienne, est lié à l'activité des électrons à la surface des électrodes (anode et cathode), [11].

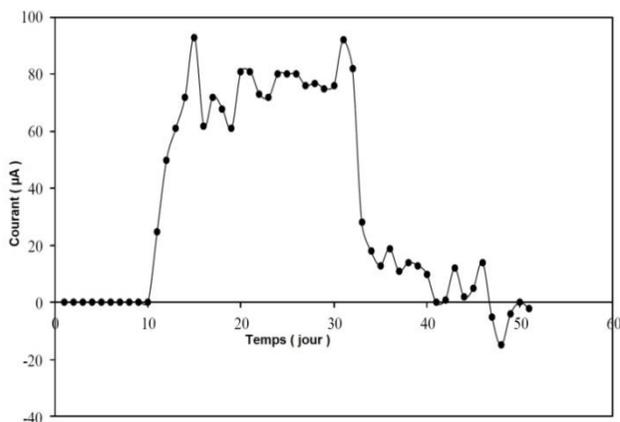


Fig. 4: Evolution du courant produit en fonction du temps ($R = 100 \Omega$)

La production du courant, présente le même profil que la tension en circuit ouvert en fonction du temps. Dans les 10 premiers jours de production, le courant est très faible car le biofilm est au stade de développement, à partir du 15^{ème} jour le courant est en forte

production atteignant les $95 \mu\text{A}$, qui s'affaiblit au bout de 20 jours. La chute du flux du courant est associée à la diffusion du substrat dans le biofilm. En effet, cette chute brutale peut être liée aux pertes de concentrations survenant lorsque la diffusion des réactifs électrochimiques du métabolisme microbien au sein du biofilm est importante. Le transport des réactifs vers les électrodes limite alors la production d'électricité. Par conséquent, le potentiel d'électrode se modifie, [12].

3.5 Effet de la lumière

A partir des résultats enregistrés quotidiennement et toutes les demi-heures (30 minutes), les courbes exposées correspondent au 10^{ème} jour du lancement.

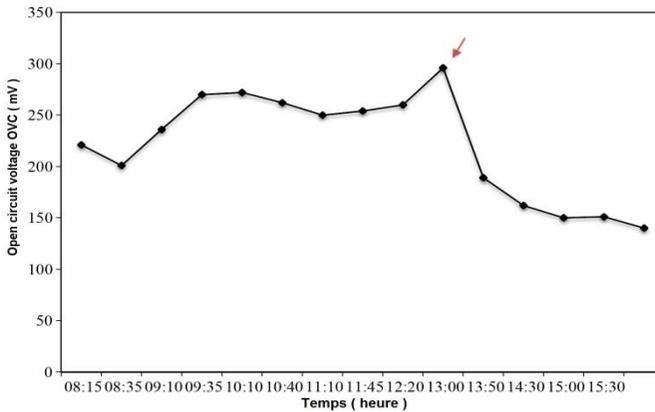


Fig. 5: Evolution de la tension en circuit ouvert en fonction du temps au courant d'une journée

La figure 5 montre une tension plus ou moins stable durant la journée. Une légère diminution est notée juste après l'arrosage pouvant être due à une instabilité des électrolytes et des ions au niveau du sol ainsi qu'aux pertes d'activation lors de l'initiation des réactions d'oxydo-réduction dans le transfert électronique entre la cellule bactérienne et la surface anodique, [12].

Une augmentation de la tension est enregistrée une heure environ après l'arrosage et une stabilité de cette dernière entre 9:00 et 12:00 environ, vers 13:00 un pic d'une valeur de 300 mV est noté lors de l'exposition directe de la plante aux rayonnements du soleil.

Une diminution brutale de la tension est observée avec la diminution de la lumière. Les tensions les plus élevées correspondent aux moments d'intensités lumineuses importantes durant la journée (entre 12h - 14h) pouvant être associées aux réactions du processus de la photosynthèse dépendant fortement de la lumière, [13].

L'effet de la lumière est confirmé en comparant la tension en circuit ouvert produite par la plante placée à l'intérieur (à l'éclairage du laboratoire) et à l'extérieur (en condition d'ensoleillement), (Fig. 6).

Sur la figure 6, une diminution de plus de 30 % de la tension est observée quand la plante *Watsonia. sp.* est mise à l'abri du soleil (à l'éclairage du laboratoire) par rapport aux résultats donnés dans les conditions d'ensoleillement, cela confirme que la tension produite par la plante est proportionnelle à l'ensoleillement et donc aux réactions du processus de la photosynthèse, pouvant être liés à l'activité biologique au niveau de la rhizosphère [13, 14].

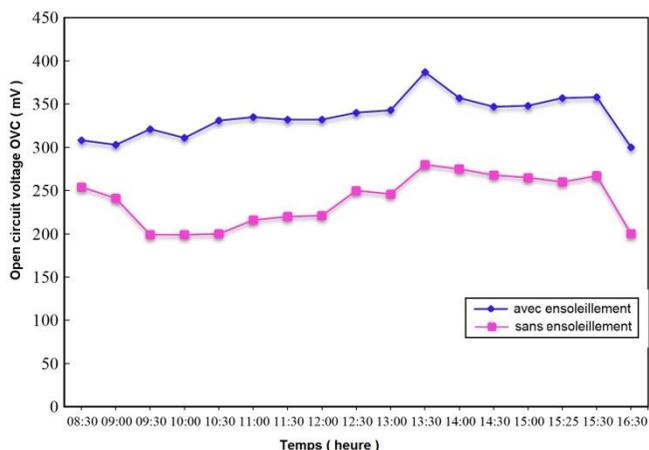


Fig. 6: Effet de l'ensoleillement sur la tension en circuit ouvert

4. CONCLUSION

Dans cette étude, la possibilité de produire de la bioélectricité est démontrée sur les principes de l'activité biologique du sol (exsudation, photosynthèse et métabolisme microbien) en utilisant une plante vivante du CDER, à savoir la *Watsonia sp.*

Le test de faisabilité a été mis en évidence en comparant la cinétique de production du courant en présence et en absence de la plante où une réduction de plus de 90 % de l'intensité du courant est enregistrée.

La transformation de l'énergie chimique issue de la photosynthèse par la plante *Watsonia sp.* a permis de générer un courant vert d'une valeur atteignant $95 \mu\text{A} \approx 0.1 \text{ mA}$ dans les conditions d'ensoleillement.

L'effet de la photosynthèse (ensoleillement) est exploré dans cette étude, les tensions les plus élevées correspondent aux moments d'intensités lumineuses importantes de la journée (entre 12 h – 14 h), pouvant être associées aux réactions du processus de la photosynthèse dépendant de la lumière, ceci a été également confirmé par la réduction de la tension de plus de 30 %, lorsque *Watsonia sp.* est mise sous éclairage du laboratoire.

Ce bio-courant peut être augmenté en optimisant les conditions physico-chimiques (sol, pH, température, nutriments...) et électrochimiques (matériaux des électrodes) ou en adoptant une nouvelle espèce de plante.

REFERENCES

- [1] H. Marjolein, 'Design Criteria for the Plant-Microbial Fuel Cell: Electricity Generation With Living Plants-From Lab to Application', PhD thesis, 148 p., 2012.
- [2] Ruud A. Timmers, David P.B.T.B. Strick, H.V.M. Hamelers and C.J.N. Buisman, 'Long-Term Performance of a Plant Microbial Fuel Cell with *Spartina anglica*', Applied Microbiology and Biotechnology, Vol. 86, N°3, pp. 973 - 981, 2011
- [3] P. Chiranjeevi, G. Mohanakrishna and S. Venkata Mohan, 'Rhizosphere Mediated Electro-Genesis with the Function of Anode Placement for Harnessing Bioenergy through CO_2 Sequestration', Bioresource Technology Journal, Vol. 124, pp. 364 - 370, 2012.
- [4] C. Waligora, 'Racines et Sol: un Monde de Communication et d'Equilibres', Techniques Culturelles Simplifiées, Vol. 57, pp. 18 – 28, 2010.

- [5] David P.B.T.B. Strick, H.V.M. Hamelers, J.F.H. Snel and C.J.N. Buisman, 'Green Electricity Production with Living Plants and Bacteria in a Fuel Cell', International Journal of Energy Research, Vol. 32, pp. 870 – 876, 2008.
- [6] D.S. Liesje, 'Microbial Fuel Cell Generating Electricity from Rhizodeposits of Rice Plants', Environmental Science and Technology Journal, Vol. 42, N°8, pp. 3053 – 3058, 2008.
- [7] X.M. Lozano, S. Hortal, C. Armas and F.I. Pugnaire, 'Interactions Among Soil, Plants and Micro Organisms Drive Secondary Succession in a Dry Environment', Soil biology and biochemistry, Vol. 78, pp. 298 – 306, 2014.
- [8] H. Rismani-Yazdi, S.M. Carver, A.D. Christy and I.H. Tuovinen, 'Cathodic Limitations in Microbial Fuel Cells: An Overview', Journal of Power Sources, Vol., N°2, pp. 683 - 694, 2008.
- [9] B.E. Logan, S. Cheng, V. Watson and G. Estadt, 'Graphite Fiber Brush Anodes for Increased Power Production in Air-Cathode Microbial Fuel Cells', Environmental Science and Technology, Vol. 41, N°9, pp. 3341 - 3346, 2007.
- [10] B.E. Logan, 'Microbial Fuel Cells', The Pennsylvania State University, Wiley-Interscience, John Wiley & Sons, Inc., 2008.
- [11] B.E. Logan and J.M. Regan, 'Electricity - Production Bacterial Communities in Microbial Fuel Cells', Trends Microbial, Vol. 14, N°12, pp. 512 - 518, 2006
- [12] P. Salvin, 'Etude des Biofilms Electroactifs Issus des Milieux Humides de la Guyane Française- Application aux Piles à Combustible Microbiennes', Thèse de Doctorat, Université des Antilles et de la Guyane, Cayenne, 2012.
- [13] Y. Hubenova and M. Mito, 'Conversion of Solar Energy into Electricity by Using Duckweed in Direct Photosynthetic Plant Fuel Cell', Bioelectrochemistry, Vol. 87, pp. 185 - 191, 2012.
- [14] N. Kaku, N. Yonezawa, Y. Kodama, K. Watanabe, 'Plant/Microbe Cooperation for Electricity Generation in a Rice Paddy Field', Applied Microbiology and Biotechnology, Vol. 79, pp. 43 - 49, 2008