

**Zeitschrift:** bulletin.ch / Electrosuisse

**Herausgeber:** Electrosuisse

**Band:** 102 (2011)

**Heft:** 11

**Artikel:** La pile à combustible microbienne dans les stations d'épuration

**Autor:** Fischer, Fabian

**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-856870>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

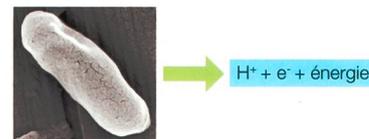
**Download PDF:** 16.07.2025

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

# La pile à combustible microbienne dans les stations d'épuration

## Perspectives pour une production d'électricité biologique

La pile à combustible microbienne est une future source d'énergie renouvelable. Elle transforme les déchets organiques en électricité et est particulièrement indiquée pour rentabiliser la gestion énergétique des stations d'épuration des eaux usées. Il s'agit, de plus, d'une technologie de production d'énergie polyvalente. Les différentes applications, telles que la génération de biohydrogène et le recyclage du phosphate, permettent d'envisager la réalisation d'une station d'épuration Cleantech.



**Figure 1** Les microbes produisent des protons, des électrons et de l'énergie. Ils peuvent être convertis en électricité renouvelable dans une pile à combustible microbienne.

**Fabian Fischer**

La production d'électricité biologique à partir de microbes est découverte par M.C. Potter en Angleterre en 1910, mais elle reste oubliée pendant longtemps [1]. Dans les années 80, son compatriote Peter Bennetto réalise à nouveau une série d'expériences avec une pile à combustible microbienne (Microbial Fuel Cell ou MFC) [2], mais ce n'est que depuis une dizaine d'années qu'un intérêt croissant est manifesté pour les applications de cette technologie de production d'énergie verte.

La popularité des MFC provient des diverses applications imaginables, dont les plus considérées sont actuellement les productions d'électricité et de biohydro-

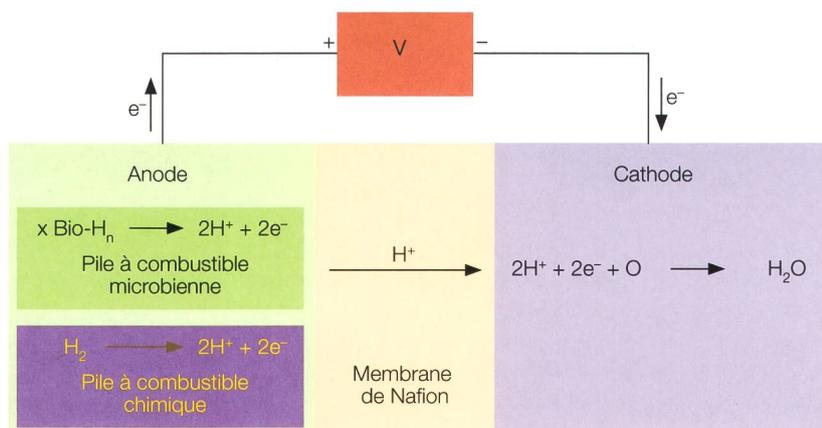
gène associées à la purification de l'eau. Un autre exemple déjà tout à fait réalisable consiste en l'analyse de l'activité métabolique des microbes. En médecine, ces piles pourraient alimenter les pacemakers et les pompes à insuline en exploitant la combustion enzymatique du glucose par l'oxygène présent dans le sang. Toujours dans ce domaine, le développement de robots gastriques pourrait également être envisagé à l'avenir. Une autre application consisterait à équiper les stations spatiales avec cette technologie qui leur permettrait d'associer la purification des eaux usées à la production d'électricité ou de biohydrogène.

### Production d'électricité par les microbes

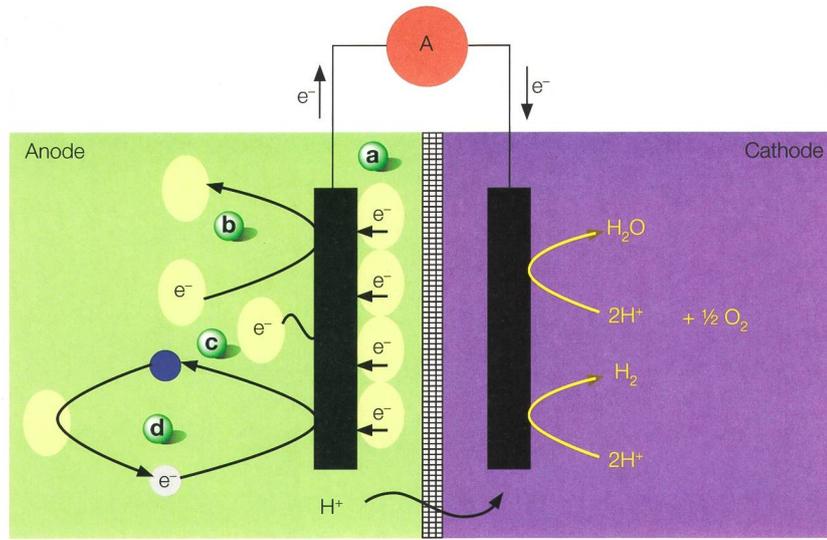
Homologue vert de la pile à combustible chimique qui, elle, est alimentée par de l'hydrogène gazeux ou d'autres carburants, la pile à combustible microbienne permet de produire de l'électricité biologique à partir de matières renouvelables telles que les matières organiques et la biomasse.

Les êtres vivants se servent depuis toujours de la combustion d'hydrogène biologique (figure 1). Typiquement, des équivalents d'hydrogène sont stockés et transportés dans les cellules vivantes sous la forme de protons et d'électrons présents sur des cofacteurs (NADH/H<sup>+</sup>, NADPH/H<sup>+</sup>, etc.) ainsi que sur des biomolécules électroactives.

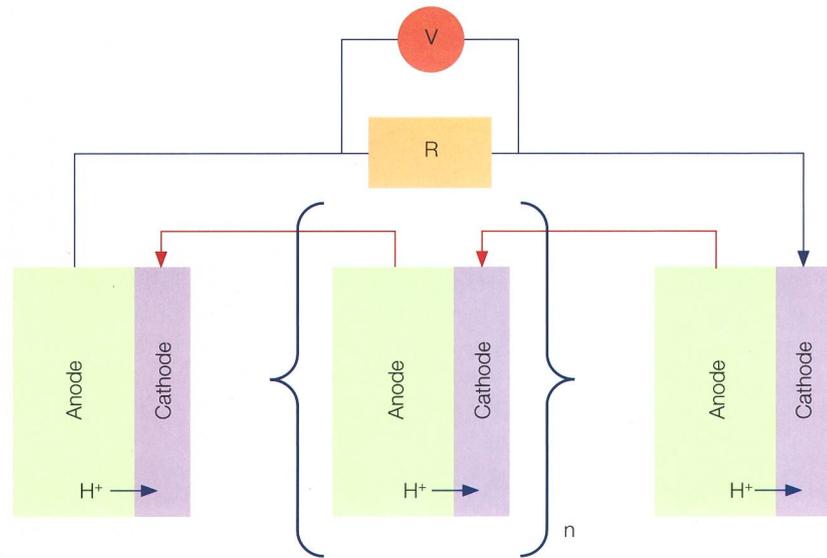
Dans une MFC, les électrons et protons extraits du métabolisme des microbes sont transformés en électricité. En effet, les microbes produisent une sorte de biohydrogène qui se trouve à disposition sous la forme de protons et d'électrons dans des biomolécules (bio-H<sub>2</sub>) (figure 2). D'autre part, les microbes respirent sur l'anode et par la membrane échangeuse de protons (figure 3) : l'oxygène (ou d'autres composants qui assurent la respiration des microbes « dans la nature ») est délocalisé vers la cathode et cette séparation, ou respiration à distance, permet d'en tirer un courant. Finalement, l'énergie microbienne est transformée en électricité par combinaison des électrons et protons avec l'oxygène moléculaire – une combustion biologique à basse température qui ressemble à la combustion



**Figure 2** La pile à combustible microbienne (en vert) transforme les protons et électrons issus des microbes en électricité, alors que la pile à combustible chimique (en violet) utilise de l'hydrogène gazeux pour produire de l'électricité.

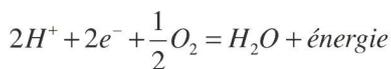


**Figure 3** Les microbes transfèrent les électrons par biofilm (a), collision (b), pili (c) ou par des médiateurs (d) sur l’anode (en vert), tandis que les protons passent par la membrane échangeuse dans la cathode (en violet). Une cathode aérée transforme les électrons et protons en eau et en électricité ; en absence d’oxygène, il se forme du biohydrogène.



**Figure 4** Montage en série de piles à combustible microbiennes pour augmenter la puissance (n = nombre d’unités).

qui a lieu dans une pile à combustible chimique :



L’efficacité coulombique de la MFC s’élève théoriquement à près de 100%, et il a été démontré par une expérience bien contrôlée que cette valeur peut atteindre 89% dans la pratique [3]. Cela correspond à l’efficacité estimée pour un système biologique.

L’énergie que l’on obtient à petite échelle démontre qu’une grande pile pourrait produire 500 W/h/m<sup>3</sup> [4]. L’électrode utilisée comme anode dans ce cas est une mousse de carbone vitreux réticulé déjà connue en électrochimie. A noter que le potentiel de travail d’une pile à combustible microbienne est au maximum 0,5 V, ce qui est bas. Pour augmenter la puissance, plusieurs piles peuvent être montées en série (figures 4 et 5).

**Production d’électricité à partir des eaux usées**

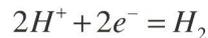
La recherche sur les piles à combustible microbiennes se concentre sur le traitement des eaux usées d’une part parce que ces déchets organiques sont à disposition en masse et contiennent une grande quantité d’énergie. D’autre part, la gestion énergétique des stations d’épuration n’apparaît pas optimale aujourd’hui et peut être rendue plus efficace par l’utilisation de MFC.

L’eau usée d’une zone urbaine contient 8-10 fois plus d’énergie que nécessaire pour son traitement [5]. Or, une station d’épuration ultramoderne n’en récupère que 25%. Actuellement, le bilan énergétique du traitement des eaux usées est même négatif à cause du traitement biologique. En effet, l’aération des bassins biologiques correspond à env. 50% du coût d’énergie total d’une station d’épuration.

Avec une pile à combustible microbienne, l’aération du bassin biologique est fortement réduite et est déplacée vers la cathode où l’on utilise beaucoup moins d’énergie pour l’aération (figure 3). Certaines cathodes sont même conçues pour une aération passive. Les piles vertes offrent donc la possibilité de générer de l’énergie renouvelable pendant le traitement biologique des eaux usées dont les coûts seront considérablement réduits. Le bilan énergétique sera alors positif et les stations de traitement des eaux usées deviendront des producteurs d’énergie nette : au lieu de payer pour l’électricité, les stations d’épuration d’eau pourront en générer.

**Production d’hydrogène par électrolyse microbienne**

L’absence d’oxygène dans la cathode transforme la MFC en générateur de biohydrogène (figure 3). Ce type de pile est aussi connu sous le nom de cellule d’électrolyse microbienne. Les protons et les électrons issus de la fermentation ne se transforment pas ici en électricité, mais en biohydrogène :



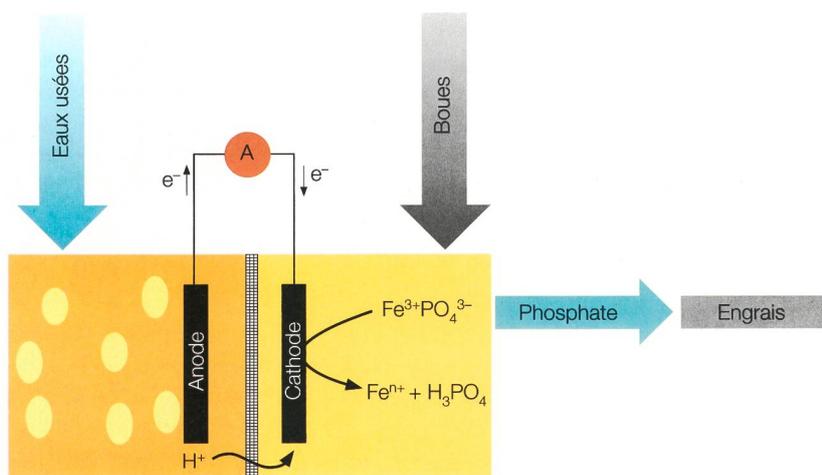
Cette réaction est catalysée de préférence par une électrode de platine et nécessite une surtension de 0,135 V. La surtension pour la production de biohydrogène est approximativement 10 fois moins élevée que celle nécessaire pour l’électrolyse classique de l’eau pure dont la valeur se situe en théorie autour de 1,22 V [6].

La génération d'hydrogène par électrolyse microbienne est estimée plus efficace que celle obtenue par fermentation, c'est-à-dire par des microbes qui produisent de l'hydrogène directement via leur métabolisme. La cellule d'électrolyse microbienne existe aussi comme pile avec une seule chambre dans laquelle l'hydrogène est formé directement dans le bioréacteur. La production d'hydrogène par ce type de pile est particulièrement utile pour stocker l'énergie produite en dehors des heures de pointe de consommation d'électricité.

### Recyclage du phosphate

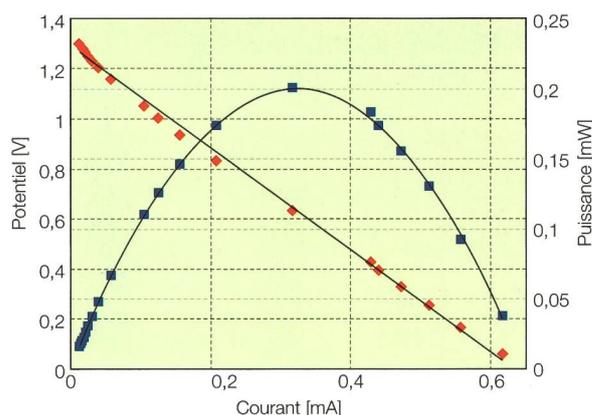
La MFC est également appropriée pour des processus électrochimiques. Actuellement en cours de développement, la remobilisation du phosphate à partir des boues d'épuration en est un exemple (figure 6) [7].

Dans les stations d'épuration, le phosphate contenu dans l'eau purifiée est actuellement extrait par complexation avec du chlorure de fer ( $\text{FeCl}_3$ ) pour éviter l'eutrophisation des rivières et lacs. Il se forme du phosphate de fer ( $\text{FePO}_4$ ), un composé hautement insoluble qui est finalement capturé dans la matrice des boues d'épuration. Ce phosphate contenu dans les boues est un engrais, mais il ne peut pas être répandu sur les champs d'agriculture parce qu'il contient des métaux toxiques, tels que l'arsenic, le cadmium, le chrome, le plomb, etc. Ces boues sont donc inutilisables. Elles sont incinérées et les cendres – qui contiennent toujours du phosphore – sont traitées comme déchet.



**Figure 6** Pile à combustible microbienne utilisée pour la remobilisation du phosphate à partir des boues d'épuration. Le phosphate obtenu est transformé par la suite en engrais.

**Figure 5** Expérience de polarisation d'un stack avec trois piles à combustible microbiennes montées en série. Le potentiel est représenté en rouge et la puissance en bleu.



Le phosphate est un composé essentiel pour la vie et une pénurie risquerait de réduire la population mondiale. Or, les réserves minérales de phosphore dans les mines du Maroc, de Chine et d'ailleurs, seront épuisées dans 50 à 100 ans [8] : une grave crise se prépare dont on parle très peu. Le recyclage du phosphate devient donc inéluctable pour pouvoir assurer la production alimentaire des prochaines générations.

L'extraction du phosphate contenu dans les boues d'épuration grâce à la pile à combustible microbienne est un processus hautement intégrable (figure 7). En effet, les électrons et les protons fournis par ce type de pile permettent de réduire le phosphate de fer ( $\text{FePO}_4$ ). Ce processus, effectué en laboratoire, atteint un rendement de 82% [7]. Le phosphate recyclé se concentre dans la solution surnageante et, par ajout de magnésium et

d'ammoniaque, un engrais connu sous le nom de struvite ( $\text{MgNH}_4\text{PO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) peut être facilement obtenu.

La composition élémentaire de cet engrais est presque identique à celle d'une référence pure (correspondance à env. 90%). Les premiers résultats indiquent que l'engrais ne contient pas de métaux toxiques tels que ceux cités plus haut. La remobilisation du phosphate par une MFC représente donc une technologie durable qui peut être intégrée dans une station d'épuration moderne.

### Sonde d'activité microbienne bioélectrochimique

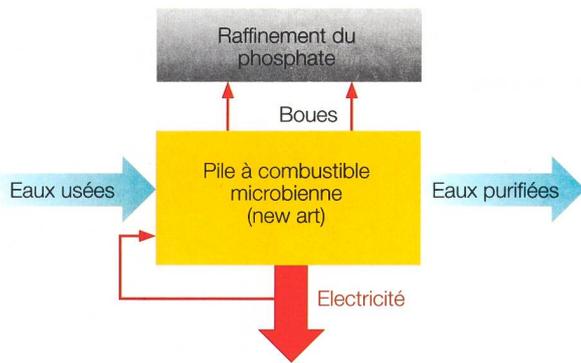
La pile à combustible microbienne miniaturisée peut aussi servir comme électrode de détection pour suivre l'activité microbienne en temps réel. Il s'agit de la plus développée des applications de ce type de pile verte et elle permet aujourd'hui d'estimer la quantité d'oxygène nécessaire pour la dégradation de la charge organique. Il a ainsi été démontré qu'il est possible de mesurer l'activité microbienne en fonction de la météo (la pluie) et d'autres influences comme les charges toxiques [9].

La sonde d'activité microbienne peut aussi trouver des applications dans les bioréacteurs industriels, la fermentation du vin et de la bière, ou la production de bioéthanol et de biobutanol [10]. Dans les stations d'épuration, la sonde est en particulier intéressante pour le monitoring ampérométrique qui fournit une information qualitative sur l'activité métabolique des microbes [11].

### Nouveaux matériaux pour les électrodes

Les électrodes sont un élément clé pour la production d'électricité d'une

Figures: HES-SO



**Figure 7** Intégration de l'épuration des eaux usées, de la production d'électricité renouvelable et du raffinage du phosphate dans une nouvelle sorte de pile à combustible microbienne (new art).

manière efficace. La recherche se concentre sur des électrodes robustes ayant une longue durée de vie. En effet, les électrodes en contact avec les microbes peuvent être endommagées par le biofouling (entartrage), ce qui est particulièrement critique pour la production d'hydrogène directement dans les bassins biologiques.

L'objectif est de remplacer le platine, qui est un catalyseur hautement actif mais trop cher. Une alternative un peu moins coûteuse consiste à utiliser du carbone vitreux réticulé platiné, dont la performance vaut celle de l'électrode de platine pure. D'autres matériaux ont aussi été proposés, comme le nickel qui représente une solution plus économique. Mais jusqu'à présent, la recherche en vue d'obtenir des électrodes robustes, efficaces et moins chères, n'a pas encore abouti à une alternative idéale pour le platine.

### Perspective Cleantech

La transformation des installations de purification des eaux usées actuelles en « raffineries » des eaux usées est un sujet qui devient de plus en plus intéressant.

L'intégration de la purification de l'eau, de la production d'électricité, et du recyclage de phosphate dans une pile à combustible microbienne représente une solution Cleantech (figure 7) qui permettrait aux stations d'épuration d'évoluer vers une autonomie financière. A noter que les installations de traitement des eaux usées contiennent également d'autres ressources (soufre, ammoniac, cuivre, etc.) dont la récupération serait un avantage dans un monde dans lequel les ressources s'épuisent.

### Conclusions

Cet article présente les perspectives – la technologie n'a pas encore quitté les laboratoires – d'une application intégrée des piles à combustible microbiennes dans les stations d'épuration. Une mise en place de ces dispositifs permettrait de rendre l'opération des stations d'épuration plus rentable avec le temps. En effet, le profit est double puisque les coûts peuvent être réduits en produisant de l'énergie pendant l'épuration de l'eau, et qu'une partie de cette énergie permet de

transformer le phosphate contenu dans les boues en engrais. L'intégration des processus d'épuration, de production d'énergie et de fabrication d'un engrais représente une solution Cleantech.

### Références

- [1] M. C. Potter : Electrical effects accompanying the decomposition of organic compounds. Proceedings of the Royal Society Serie B 84, pp. 260–276, 1912.
- [2] H. P. Bennetto, J. L. Stirling, K. Tanaka, C. A. Vega: Anodic reactions in microbial fuel-cells. Biotechnology and Bioengineering 25, pp. 559-568, 1983.
- [3] K. Rabaey, G. Lissens, S. D. Siciliano, W. Verstraete: A microbial fuel cell capable of converting glucose to electricity at high rate and efficiency. Biotechnology Letters 25, pp. 1531-1535, 2003.
- [4] B. R. Ringeisen, E. Henderson, P. K. Wu, J. Pietron, R. Ray, B. Little, J. C. Biffinger, J. M. Jones-Meehan: High power density from a miniature microbial fuel cell using shewanella oneidensis DSP10. Environment & Science Technology 40, pp. 2629-2634, 2006.
- [5] I. Shizas, D. M. Bagley: Experimental determination of energy content of unknown organics in municipal wastewater streams. Journal of Energy Engineering 130, pp. 45-53, 2004.
- [6] H. Liu, H. Hu, J. Chignell, Y. Fan: Microbial electrolysis: novel technology for hydrogen production from biomass. Biofuels 1, pp. 129-142, 2010.
- [7] F. Fischer, C. Bastian, M. Happe, E. Mabillard, N. Schmidt: Microbial fuel cell enables phosphate recovery from digested sewage sludge as struvite. Bioresource Technology 102, pp. 5824-5830, 2011.
- [8] D. Cordell, J.-O. Drangert, S. White: The story of phosphorus: Global food security and food for thought. Global Environmental Change 19, pp. 292-305, 2009.
- [9] D. Holtmann: Elektrochemisches Monitoring mikrobieller Aktivität, Grundlagen und Anwendung in der Abwasserreinigung. Thèse, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, 2005.
- [10] A. S. Finch, T. D. Mackie, C. J. Sund, J. J. Sumner: Metabolite analysis of Clostridium acetobutylicum: Fermentation in microbial fuel cell. Bioresource Technology 102, pp. 312-315, 2011.
- [11] M.-F. Favre, D. Carrard, R. Ducommun, F. Fischer: Online monitoring of yeast cultivation using a fuel-cell-type activity sensor. Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology 36, pp. 1307-1314, 2009.

### Zusammenfassung

#### Die mikrobielle Brennstoffzelle in Kläranlagen

##### Perspektiven einer biologischen Elektrizität

Die mikrobielle Brennstoffzelle ist eine künftige erneuerbare Energiequelle. Sie verwandelt organischen Abfall in Strom und ist insbesondere geeignet, um das Energiemanagement in Abwasseraufbereitungsanlagen rentabler zu gestalten. Darüber hinaus handelt es sich um eine polyvalente Technologie zur Energieerzeugung. Dank der verschiedenen Anwendungsmöglichkeiten, wie beispielsweise die Erzeugung von Biowasserstoff oder das Recycling des im Klärschlamm enthaltenen Phosphats zur Düngemittelerzeugung, kann die Errichtung einer Cleantech-Aufbereitungsanlage in Betracht gezogen werden.

CHe

### Informations sur l'auteur



D' **Fabian Fischer** est professeur à la HES-SO Valais. Il est chimiste de l'Université de Berne, et a été postdoc à l'UC Berkeley et l'ENSC Paris, puis chef de travaux au Centre de Biotechnologie de l'EPFL. Depuis 2002, il enseigne les technologies du vivant à la HES-SO Valais et dirige des projets sur les piles à combustibles microbiennes: pile verte, recyclage du phosphate et production de biohydrogène. Il est également actif dans le domaine de la catalyse enzymatique.

Institut Technologies du vivant, HES-SO Valais, 1950 Sion, fabian.fischer@hevs.ch.

Anzeige

**Vous trouverez dorénavant les articles parus dans ce numéro également sous [www.bulletin-online.ch](http://www.bulletin-online.ch).**

