

Zeitschrift: Ingénieurs et architectes suisses
Band: 127 (2001)
Heft: 14

Artikel: Quand l'hydrogène produit de l'électricité
Autor: Kaestli, Françoise
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-80055>

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: 14.01.2026

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

Quand l'hydrogène produit de l'électricité

(ÉNERGIE)

Pile à combustible: nom sans saveur pour une énergie soudainement propulsée sur le devant de la scène (PAC)¹. Alors que la pile évoque une façon coûteuse de produire de l'énergie électrique et que les combustibles ont un relent de CO₂, la pile à combustible sous son appellation trompeuse, se pare de promesses d'efficacité et de propreté. Avec pour source d'énergie l'hydrogène et pour rejet l'eau, elle suscite bien des espoirs. Derrière le rêve bleu, se cachent toutefois quelques nuages: qualité et longévité des électrodes, complexité de gestion d'un tel système, combustibles aux effets secondaires abaissant les performances; ces obstacles repoussent de quelques années la mise sur le marché de produits, surtout pour des applications dans les transports et sur des installations portables (ordinateurs, etc..).

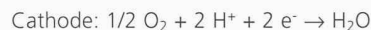
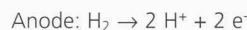
L'idée de transformer directement l'énergie chimique en énergie électrique, sans passer par le circuit thermoélectrique classique - au rendement limité par les principes théorisés par Carnot - ne date pas d'hier, puisqu'elle est attribuée à l'anglais Sir William Grove en 1839. Redécouverte après la Seconde Guerre mondiale, elle apporte, en théorie, de nombreux avantages: système plus efficace, silencieux et moins polluant. Dans la pratique, les applications commerciales, pour la fourniture d'énergie stationnaire délocalisée (bâtiments ou exploitations industrielles, en co-génération), démarrent alors que celles destinées au transport ou aux applications «portables», en micro-informatique par exemple, attendront quelques années encore.

De l'hydrogène à l'anode, de l'oxygène à la cathode

Une pile à combustible, comme une batterie, possède deux électrodes (une anode et une cathode, éléments conducteurs), séparés par un électrolyte, milieu conducteur favorable transportant les ions mais ne conduisant pas les électrons.

¹ Signalons en passant que l'acronyme PAC, parfois usité pour désigner les piles à combustible, se confond avec celui qui a été largement employé pour renvoyer à la pompe à chaleur - autre système énergétique dont la promotion fut à l'honneur à la suite des crises pétrolières des années septante.

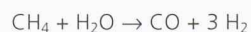
Dans une pile à combustible typique, l'anode est le lieu d'une réaction d'oxydation du carburant, généralement de l'hydrogène, tandis qu'à la cathode, il y a une réaction de réduction avec de l'oxygène de l'air. La réaction, qui fonctionne en continu grâce à l'apport constant de gaz, produit deux électrons par molécule d'hydrogène, et délivre un potentiel compris entre 0,6 et 0,8 volt, ainsi que de la chaleur.



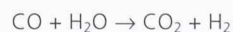
Soit, au bilan de la réaction:



Au lieu de l'hydrogène pur, les cellules de piles à oxydes solides (SOFC) peuvent être alimentées en hydrocarbures (méthane, gaz naturel, biogaz). Lorsque l'hydrocarbure est injecté directement dans la cellule (reformage direct), la réaction produit du carbone et du monoxyde de carbone susceptibles d'endommager le dispositif. C'est pourquoi l'emploi de combustibles courants implique, soit la mise au point d'anodes peu sensibles au carbone, soit une opération préalable de reformage. Dans le cas du méthane, par exemple, le gaz réagit avec la vapeur d'eau:



puis, le monoxyde de carbone réagit à son tour avec la vapeur d'eau en formant de l'hydrogène supplémentaire et du gaz carbonique au niveau de l'anode, où il fait office de combustible:



Chaque type de pile comporte son lot d'avantages et de contraintes. La pile SOFC permet l'utilisation du gaz naturel, mais les températures élevées (typiquement 800°C) mettent les matériaux à rude épreuve. L'amélioration des performances passe par l'optimisation de ses différents composants: électrodes facilitant la formation des ions et le passage du cou-

Fig. 1: Schéma montrant les éléments d'une cellule de base SOFC, tels qu'ils sont mis en série dans un «stack» ou empilement. De nombreux points techniques doivent encore être améliorés (Schéma: EPFZ, Institut de matériaux non métalliques)

rant, électrolyte de faible résistance et plaques d'interconnexion adaptées (fig. 1). Ces dernières permettent d'empiler les cellules tout en collectant le courant depuis les électrodes et leur dessin - ou celui de la plaque d'anode de la cellule - est défini de manière à distribuer les gaz de façon optimale.

Aperçu des différents types de piles à combustible

Utilisées pour offrir un maximum de sites de réaction dans un minimum de volume, les électrodes sont généralement composées de métal. Par contre, les électrolytes diffèrent d'un type de pile à l'autre, selon les ions qu'ils transportent et l'état (solide ou liquide) de ceux-ci. Ce sont donc les électrolytes qui confèrent à la cellule ses caractéristiques principales et lui donnent son nom. On distingue deux grandes familles de procédés: les piles fonctionnant à haute température (SOFC et MCFC) et admettant une grande variété de combustibles (hydrogène, méthane, biogaz, dérivés du pétrole) et les piles à basse température (AFC, PAFC et PEMFC), alimentées directement en hydrogène ou - après une étape de reformage - en méthane. Dans les piles à basse température, les protons ou les ions hydroxydes assurent le transport de charge, alors qu'à plus haute température, ce sont les ions carbonates ou d'oxygène qui se meuvent.

Pile à combustible alcaline (AFC: Alkaline Fuel Cell)

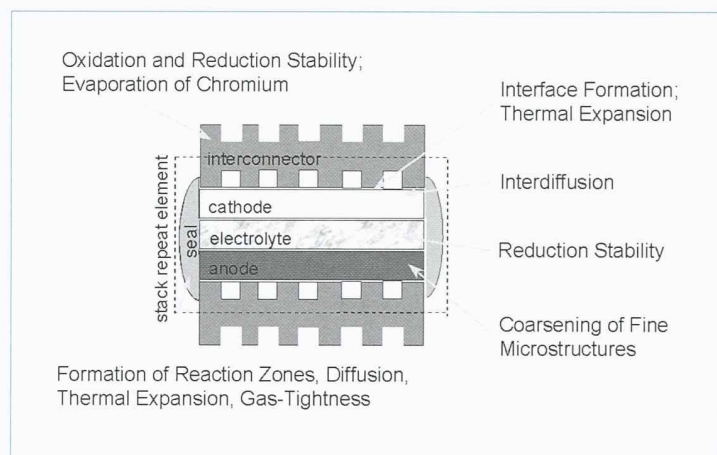
La pile alcaline est la plus ancienne des piles à combustible, celle qui a connu la consécration lors des vols spatiaux. Le choix d'un électrolyte alcalin permet de se passer de métaux nobles comme électrodes. Peu compacte, cette pile est d'une mise en œuvre aisée, mais elle est handicapée par sa sensibilité au monoxyde de carbone. Elle fonctionne à des températures entre 70 et 100°C.

Pile à combustible à acide phosphorique (PAFC: Phosphoric Acid Fuel Cell)

Ces piles ont été développées pour pallier les problèmes des modèles alcalins précédents. Comme leur nom l'indique, elles font appel à un concentré à 100% d'acide phosphorique liquide, immobilisé, à une température comprise entre 100 et 220°C et à des électrodes en platine. Parvenu au stade commercial, ce type de piles est proposé aux Etats-Unis sous forme de modules d'une centaine de kilowatts.

Pile à combustible à membrane polymère (PEMFC ou PEFC: Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell)

Avec le développement de membranes polymères bonnes conductrices d'ions H⁺, ce type de piles gagne en intérêt.



Cette solution offre à la fois des puissances volumiques élevées et des températures de fonctionnement basses (entre 80 et 120°C), caractéristiques adaptées à des applications dans les transports. Son inconvénient: elle requiert de l'hydrogène très pur et un catalyseur en platine, ce qui renchérit son coût. Les recherches actuelles portent sur la réduction de la sensibilité des catalyseurs aux impuretés présentes dans l'hydrogène et sur la résistance des membranes.

Pile à combustible à carbonates fondus (MCFC: Molten Carbonate Fuel Cell)

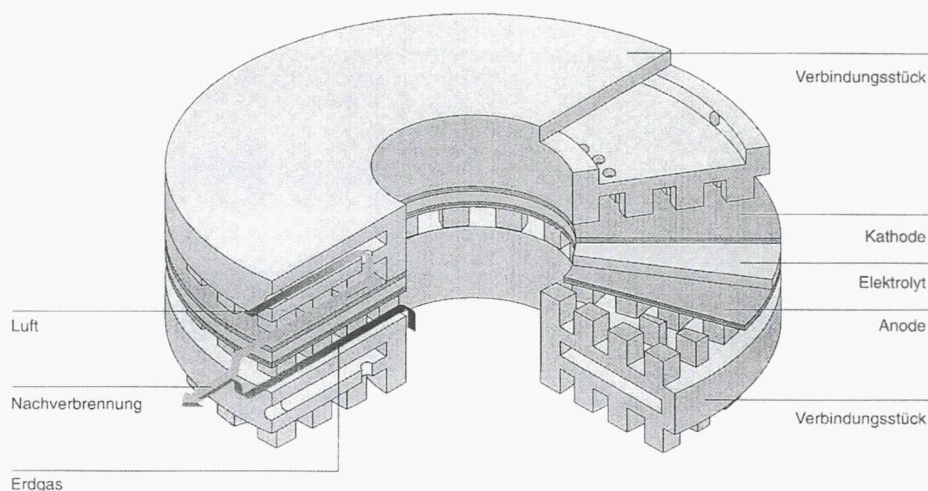
Dans cette configuration, des carbonates alcalins fondus sont immobilisés dans une matrice céramique, les transports étant assurés par les anions carbonate. Entre 650 et 850°C, le carbonate alcalin présente une bonne conductivité ionique, tandis que les électrodes en nickel et oxyde de nickel offrent une résistance suffisante à la corrosion. Le rendement de telles piles dépasse les 60% en cycle combiné (électricité et chaleur), ce qui en fait de bonnes candidates aux applications stationnaires.

Pile à oxydes solides (SOFC: Solid Oxide Fuel Cell)

Dans ce dernier type, l'électrolyte est constitué d'un oxyde de métal non poreux, sous forme solide. Une zircone stabilisée est souvent capable de transporter efficacement des anions d'oxygène à partir de divers hydrocarbures (méthanol, fiouls légers, gaz naturel) dont on extrait l'hydrogène par reformage à l'intérieur de la pile. Parmi les inconvénients et difficultés inhérents au système, signalons la nécessité d'une installation de gestion du gaz combustible (reformeur). Fonctionnant dans une gamme de températures allant de 650 à 1000°C, de telles solutions sont plutôt réservées à des applications stationnaires, du fait des volumes importants

Fig. 2: Les éléments de la cellule en coupe, technologie SOFC
(Schéma Sulzer Hexis)

Fig. 3: Schémas illustrant les canaux de distribution de fuel dans une plaque SOFC d'interconnexion expérimentale. Sur l'image du bas, dessins pour tracé de fraisage de machine à commande numérique.
(Schémas: en haut, EMPA, Section des céramiques à hautes performances, en bas, EPFL, Laboratoire de protonique et interfaces)



nécessaires à la gestion globale du système et des températures requises. Une utilisation dans l'automobile, comme système auxiliaire de fourniture d'électricité à bord (climatisation ou chauffage) est cependant explorée.

Les empilements de cellules ou «stack»

Chaque cellule fournissant, sous charge, une tension de l'ordre de 0,7 volt, il est nécessaire d'en associer plusieurs séries afin d'obtenir une tension de sortie plus élevée. Le mode d'empilement varie considérablement selon le concept de la pile. Dans le concept SOFC planaire, chaque élément d'empilement comprend un disque céramique de quelques dixièmes de millimètres à quelques millimètres d'épaisseur (qui intègre l'ensemble des composants électrochimiquement actifs de l'installation - anode/électrolyte/cathode) et une plaque d'interconnexion (fig. 2 et 3). Chaque pile (stack) atteint une puissance de l'ordre du kilowatt (Sulzer Hexis) et un rendement électrique dépassant 30%. Comme elle produit également de la chaleur, il est préférable de l'intégrer à une centrale de production chaleur-force, configuration qui s'avère particulièrement performante pour des installations de taille moyenne, allant de un à quelques kilowatts électriques, en condition de charge variable.

Références :

- RAMBERT SERGE: «Matériaux des piles à combustible à oxyde solide», *Oberflächen Werkstoffe* N°5, 1996, p. 28-30
- Actes du Colloque sur les Piles à combustible et Interfaces pour les transports, Belfort, 9-10 novembre 2000
- *Fuel Cell Handbook*, fourth Edition, November 1998, DOE/FETC-99/1076, U.S. Department of Energy

Remerciements :

Pour les informations qu'ils m'ont fournies et pour leur relecture attentive, j'adresse des remerciements reconnaissants aux collaborateurs de l'EPFL : Serge Rambert, LPI, et Jan Van Herle, LENI.

