

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

**Artikel:** Embarcations mues par piles à combustible sur le lac de Neuchâtel  
**Autor:** Affolter, Jean-François / Mariotti, Piero  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-80058>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. 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. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

### **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. [Voir Informations légales.](#)

### **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. [See Legal notice.](#)

**Download PDF:** 24.04.2025

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

# Embarcations mues par piles à combustible sur le lac de Neuchâtel

( ÉNERGIE )

Les projets de bateau à piles à combustible ont démarré à l'Ecole d'ingénieurs du Canton de Vaud par un travail de diplôme en 1998 [1]<sup>1</sup>, faisant suite à l'acquisition d'une pile à combustible de type polymère (PEMFC) de 100 W développée par le PSI<sup>2</sup> et l'IGS<sup>3</sup>. Ils répondaient à une importante demande pour des embarcations confortables, fiables, silencieuses et non polluantes en provenance d'Europe, car nombre de lacs y sont interdits à la navigation dite thermique. De tels bateaux devaient à la fois démontrer les conditions de faisabilité d'un système à piles à combustible, sensibiliser le public à ce type d'alimentation électrique et jouer un rôle pédagogique important auprès des étudiants en énergétique, grâce à une étude en situation de fonctionnement proche de la réalité.

## Piles à combustibles polymères

Les premières cellules électrochimiques à électrolyte polymère mises à disposition par le PSI étaient conçues pour délivrer de 100 à 300 W à partir d'hydrogène et d'air [2]. Cet institut a par la suite développé des modules de 2 kW et travaille actuellement sur des puissances plus importantes, destinées à des applications automobiles.

## Conception et réalisation des bateaux

Avec des puissances disponibles aussi faibles, la forme du bateau a dû être spécifiquement étudiée et sa motorisation optimisée (choix du moteur, vitesse de rotation, rapport de transmission, diamètre et pas de l'hélice) et plusieurs prototypes ont successivement été testés.

Le premier «Hydroxy100» prit la forme d'un pédalo avec les caractéristiques suivantes: dimensions: 2,56 x 1,5 m; poids: env. 70 kg; puissance: 100-200 W; vitesse: env. 5 km/h; charge: un passager. Objet d'un travail de diplôme, il nécessitait un réglage manuel compliqué de la pile (fig. 1).

<sup>1</sup> Les chiffres entre crochets renvoient à la bibliographie en fin d'article.

<sup>2</sup> PSI: Paul Scherrer Institut

<sup>3</sup> IGS: Haute école spécialisée de St-Gall

<sup>4</sup> Sur les nanotubes de carbone en général voir l'article de Jean-Marc Bonard dans IAS N° 21, du 1<sup>er</sup> novembre 2000, pp. 416-418

Le bateau «Hydroxy300» permet d'aller plus loin. Alimenté par une pile de 300 W [4] et deux bouteilles de 10 litres d'hydrogène (à 200 bars), il jouit d'une autonomie raisonnable d'une quinzaine d'heures et sa conception a résolument été adaptée aux possibilités de la pile: forme allongée (6 m sur 1,8 m, pour un poids d'environ 130 kg). Cette embarcation développe une puissance de 300 W et atteint 12 km/h avec une charge de deux passagers (fig. 2). Cela étant, le poids à vide et l'encombrement des bouteilles n'en font pas une solution viable, problème que la recherche devra résoudre en recourant par exemple au stockage par hydrures métalliques [5], en faisant appel à des nanotubes de carbone [6]<sup>4</sup> ou, encore, à des bouteilles en aluminium renforcées par des fibres de carbone. Le système de régulation de la pile à combustible est composé d'un automate programmable et d'un circuit imprimé permettant le transfert des grandeurs physiques en grandeurs électriques compatibles avec le système d'acquisition d'un PC. Ce dernier donne la possibilité de relever diverses caractéristiques de fonctionnement de la pile à combustible et du bateau. Du côté sécurité, au vu des rejets d'hydrogène encore produits par la pile actuelle («dead end» [7]), il demeure interdit de fumer sur le bateau!

## Autres développements en cours avec l'industrie

Dans la foulée des travaux de l'EIVD et en collaboration avec des entreprises industrielles, deux autres bateaux ont été réalisés: une version améliorée et entièrement automatisée

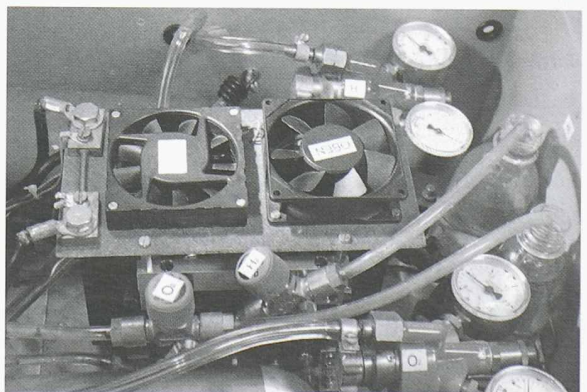


Fig. 1: La première installation de laboratoire développée à l'Institut d'énergie et systèmes électriques de l'EIVD, pour la gestion d'une pile à combustible polymère de 100 W (Photo IAS)

Fig. 2: Le bateau Hydroxy300, développé par MW-Line à Yverdon, et testé avec une pile de 300 W par l'EIVD (Photo EIVD)

Fig. 3: La nouvelle embarcation de type embarcation familiale Hydroxy2000, offrira de 4 à 6 places et fonctionnera avec une pile polymère de 2 kW (Photo EIVD)

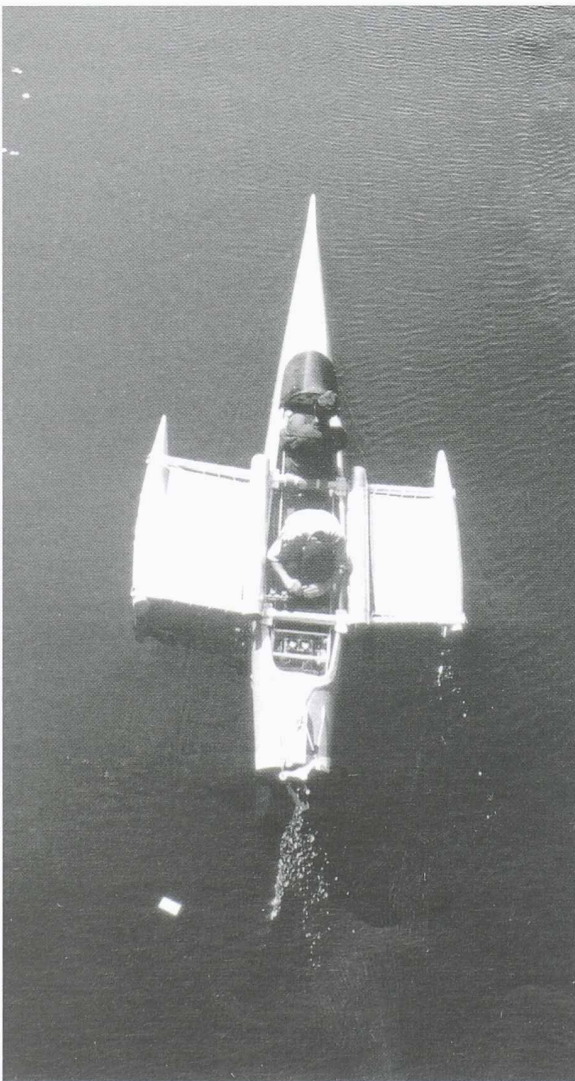
de l'«Hydroxy100LS» intéresse le service de l'énergie de la ville de Lausanne. Un simple clic de la clé de contact en assure le démarrage et sa vitesse de croisière est de 5 km/h [8]. Un engin plus puissant, le bateau «ALPHA», résultat d'une collaboration entre le PSI et l'entreprise MW-Line, à Yverdon, est propulsé par une pile de 2 kW et atteint la vitesse de 10 km/h environ (fig. 3). Il préfigure une version familiale des bateaux à piles à combustible. Il est destiné à vérifier le fonctionnement des prototypes de piles en utilisation réelle [9].

### Bilan des expériences réalisées

Les expériences relatées ci-dessus ont permis de mettre en évidence les faits suivants.

- Les piles exploitées dans des conditions réelles fonctionnent, mais leur fiabilité à long terme reste à démontrer.

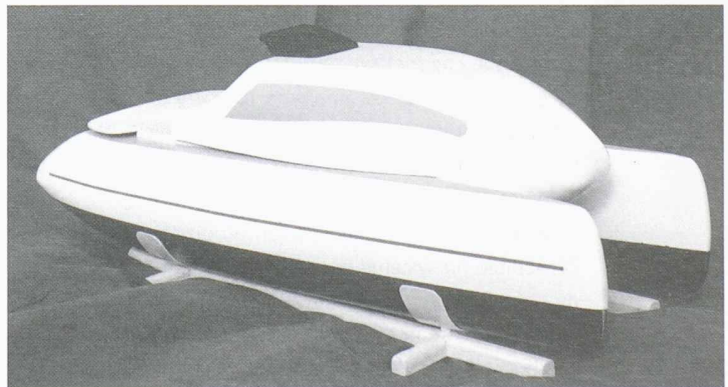
2



Avec certaines membranes industrielles, il arrive par exemple qu'une quantité d'eau traverse la membrane et provoque des chutes de tension en bouchant les canaux d'hydrogène. Si le problème a pu être résolu par une stratégie d'automatisation, il semble néanmoins plus prometteur de le faire au niveau de la membrane elle-même, dont les caractéristiques et le choix doivent être repensés.

- L'énergie électrique produite est encore d'un prix trop élevé malgré ses avantages; il faudrait donc obtenir une prestation identique avec une puissance (et donc une énergie) plus faible.
- Le système énergétique dans son ensemble doit être étudié pour limiter au mieux les pertes dans les incontournables systèmes de conversion d'énergie ou les systèmes auxiliaires. Le choix de la tension est important. On pourrait utiliser un élévateur de tension et bénéficier ainsi d'appareillages plus performants, tout en veillant à ne pas perdre l'avantage d'un meilleur rendement en raison de faibles rendements de conversion.
- La production de l'hydrogène est un élément critique du point de vue écologique. Pour respecter des critères de développement durable, l'hydrogène devrait être obtenu à partir de combustible renouvelable (biomasse ou eau, p.ex.) à un coût raisonnable (aussi bien financier qu'énergétique).
- Le rapport poids/volume du stockage de l'hydrogène doit être amélioré. Comme pour le point précédent, cet aspect s'avère vital pour les applications mobiles, même si, dans l'énergétique d'un bateau, ce critère se trouve un peu affaibli vu les rapports puissance/poids/vitesse favorables des transports maritimes.
- La sécurité d'un tel mode de propulsion est principalement liée à celle du stockage. Il faut que les recherches dans ce domaine portent leur fruit bientôt, à un prix abordable! Le recyclage de l'hydrogène entre impérativement dans cette considération pour une solution industrielle.

3



## L'INSTITUT D'ÉNERGIE ET SYSTÈMES ÉLECTRIQUES (IESE) DE L'EIVD

Membre du centre de compétences «Énergies» de la Haute école spécialisée de Suisse Occidentale, l'IESE assure plusieurs mandats de recherche en parallèle à sa mission de formation. Cet institut est doté de neuf professeurs, six assistants et deux techniciens. Les thèmes traités couvrent une large palette de domaines (nouvelles applications de l'énergie électrique, mini-production d'énergie électrique, mesures et acquisitions de données, notamment) destinés à stimuler l'intérêt des étudiants pour la cause énergétique.

L'occasion d'une recherche originale fut fournie par l'OFEN qui, il y a quelques années, mettait dix piles à combustible à disposition des Ecoles d'ingénieurs. Avec une pile de 100 W, Jean-François Affolter lança un application inédite: propulser un pédalo sur le lac. Première expérience, certes artisanale, mais qui permit au laboratoire de faire ses armes et de postuler pour recevoir une seconde pile, plus puissante, capable de transporter deux personnes à 12 km/h sur un bateau spécialement adapté à ce type de propulsion, soit une embarcation très longue et étroite. Autour de la pile, il y a tout le système de contrôle et de transformation de l'énergie produite qui intéresse J.-F. Affolter. Une prochaine recherche pourrait démarrer bientôt, avec une pile de 2 kW, à condition que les partenaires industriels soient trouvés. Toutes les piles à combustible ont été fournies par le PSI.

- L'utilisation rationnelle de l'énergie d'une pile à combustible dans un consommateur à charge variable passe, expérience faite, par un stockage tampon. Selon les puissances en jeu, un dimensionnement optimum des piles et batteries peut être calculé. Cela permet la mise en jeu d'une puissance relativement grande avec une pile relativement petite (principe du véhicule hybride). Là aussi, pour la plupart des applications mobiles, une technologie légère de stockage électrique (batteries zinc-air, supercapacités) s'avère souhaitable.

### A quand le bateau familial ?

Les expériences réalisées lors de projets précédents ont soulevé beaucoup d'intérêt dans les milieux industriels nautiques. Dès lors, un nouveau projet de bateau familial est en cours de réalisation. Il comblera certaines lacunes repérées lors des essais préalables et l'EIVD espère promouvoir cette technologie auprès d'un large public. Afin d'assurer efficacement le transfert de technologie et l'industrialisation du produit, un constructeur de bateaux assumera le rôle de chef de projet.

Ce développement devra résoudre quelques problèmes majeurs des piles à combustible - soit la longévité et la fiabilité des piles, les coûts de fabrication et les difficultés de stockage de l'hydrogène - mais il a gagné l'intérêt enthousiaste des milieux nautiques, souvent sensibles aux questions environnementales.

De surcroît, la législation de plus en plus sévère s'appliquant aux bateaux thermiques permet de miser sur l'avenir de solutions électriques sur les lacs et les canaux. Et la pile à combustible, doublée de batteries - et pourquoi pas de photovoltaïque - permettrait sans doute de répondre au manque de puissance que les amateurs reprochent aux variantes actuellement disponibles. Le point faible de ces belles idées réside, pour l'instant, dans le coût et l'accessibilité des technologies concernées.

On constate néanmoins qu'en étudiant soigneusement l'ensemble du système énergétique, on peut se rapprocher du coût de variantes existantes au niveau «marginal» (c'est-à-dire sans compter l'investissement en matériel; les piles à combustible n'étant pas encore vraiment sur le marché). S'il

est difficile de conclure sur ce point, les publications récentes annoncent néanmoins une évolution encourageante des prix [10].

Notons que l'approvisionnement des bateaux en hydrogène peut très facilement être introduit dans les ports (moins nombreux que les stations-service), par exemple au moyen d'électrolyseurs fonctionnant de nuit, lors des heures creuses du réseau électrique, donc au moyen d'énergie à bas tarif. Cette façon de procéder évite de souiller l'eau avec des rejets polluants, les lacs étant devenus nos réservoirs d'eau potable! L'EIVD va donc continuer ses démarches dans l'application pratique des piles à combustible, en particulier pour les bateaux [11]. Les collaborations industrielles établies sont encourageantes, encore qu'on puisse regretter un manque d'intérêt des industriels pour la fabrication de piles portables du type PEM.

Signalons enfin les retombées positives de tels projets pour l'enseignement de l'énergétique et des nouvelles technologies de production d'électricité dans notre école. Ils contribuent à étoffer le bagage intellectuel des futurs ingénieurs électriciens et à alimenter leur motivation pour les techniques de l'énergie. Le lecteur intéressé trouvera un aperçu partiel des développements en cours sur le site Internet <[http://www.eivd.ch/labos/cense/projet/p\\_didactique.html](http://www.eivd.ch/labos/cense/projet/p_didactique.html)>

### Bibliographie

- [1] D. CICIO: «Conception d'un bateau à pile à combustible», diplôme EIVD 1998
- [2] I. POPELIS & al.: «12 Volt 300 Watt PEFC Power Pack», Proc. Portable fuel cells, Lucerne, Juin 99
- [3] «Propeller-berechnung», revue *PLASTEK* 4/98
- [4] J.-F. AFFOLTER: «Rapport annuel pour l'office fédéral de l'énergie 1999: Projet pilote d'une petite embarcation mue par pile à combustible de 300 W», EIVD 1999
- [5] L. FISCHER: «Hydrogen storage devices using metal hydrides», proc. Portable fuel cells, Lucerne 1999
- [6] C. NÜTZENADEL & al.: «Stockage de l'hydrogène dans des nano-tubes de carbone», Université de Fribourg, rapport de recherche 97-99
- [7] P. MARIOTTI-N.: «Réalisation d'un bateau à pile à combustible», diplôme EIVD 1999
- [8] P. FAVRE, D. CICIO, J.-F. AFFOLTER: «Fun boat powered by a fully automatic fuel cell», European Fuel Cells Forum, Lucerne, 1999
- [9] OFEN 1999, Consortium *Alpha*, projet B3A/B3B, PSI/MW-Line
- [10] Revue *Pour la Science* N°263, septembre 99, divers articles
- [11] J.-F. AFFOLTER: «Swiss Fuel Cell Passenger and Pleasure Boats», proc. Portable fuel cells, Lucerne 2000