



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Département fédéral de l'environnement,
des transports, de l'énergie et de la communication DETEC
Office fédéral de l'énergie OFEN

Rapport final

HYDROXY 3000

Laboratoire énergétique flottant

Mandant:

Office fédéral de l'énergie OFEN
Programme de recherche XY
CH-3003 Berne
www.ofen.admin.ch

Mandataire:

HEIG-VD / IESE
Route de Cheseaux 1
CH-1400 Yverdon
www.heig-vd.ch

Auteurs:

Jean-François Affolter, HEIG-VD, jean-francois.affolter@heig-vd.ch
Philippe Morey, HEIG-VD, philippe.morey@heig-vd.ch

Responsable de domaine de l'OFEN:	Stefan Oberholzer
Chef du programme de l'OFEN:	Rolf Schmitz
Numéro du contrat de l'OFEN:	SI/501263-01

Le ou les auteurs sont seuls responsables du contenu et des conclusions de ce rapport.

Introduction et objectif

L'Hydroxy 3000 est un bateau électrique original qui fut construit en 2003 par la HEIG-VD en collaboration avec l'entreprise MW-Line, basée à Yvonand¹. L'objectif de l'Hydroxy 3000 est premièrement de servir de laboratoire en conditions réelles, pour tester différentes technologies de production d'énergie électrique. Et deuxièmement comme moyen de rayonner et promouvoir les activités Ra+D de la HEIG-VD et de ses partenaires, en Suisse et à l'étranger.



Figure 1 : L'Hydroxy 3000 lors de sa fabrication en 2003 dans les locaux de MW-Line

Le bateau fut inauguré lors de l'hiver 2003-2004 et baptisé « Hydroxy 3000 » d'après l'hydrogène et oxygène qu'il consomme proprement par le biais qu'une pile à combustible, ainsi que la puissance moyenne de celle-ci.



Figure 2 : À gauche, l'Hydroxy 3000 peu après son inauguration fin 2003.
À droite, la première pile à combustible qui fut installée dedans en 2004.

La première pile à combustible (PACo) qui fut installée à son bord fut développée au Paul Scherrer Institut (PSI) et a été pleinement intégrée par l'équipe d'ingénieurs de l'IESE [1]. Celle-ci était du type PEM (membrane échangeuse de proton), avait une puissance de 3 kW et était refroidie à l'eau. Cette PACo a permis d'acquérir une solide expérience dans le domaine de l'hydrogène.

¹ Depuis, MW-Line est devenu Grove Boats.

Travaux réalisés et résultats obtenus

Durant les six premières années de service l'Hydroxy 3000 fut principalement utilisé pour acquérir de l'expérience avec la première pile installée à bord et faire diverses démonstrations à différents événements. Notamment, l'Hydroxy 3000 fut valorisé en avril 2005 à l'*Electric Vehicule Symposium & Exhibition (EVS-21)* à Monaco.

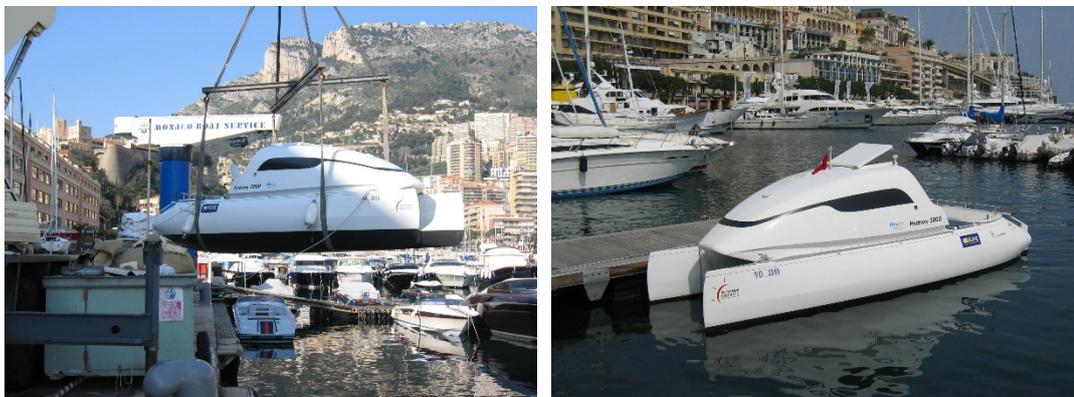


Figure 3 : L'Hydroxy 3000 lors de sa valorisation lors du 21^{ème} *Electric Vehicule Symposium & Exhibition (EVS-21)* à Monaco en 2005.

La même année, l'Hydroxy 3000 fut présenté à Neuchâtel lors de la manifestation de la journée de la mobilité où il suscita un grand intérêt de la part du public.



Figure 4 : L'Hydroxy 3000 lors de sa valorisation à Neuchâtel en 2005. Le publique est toujours intrigué par sa forme originale et surtout par son déplacement silencieux.

Le 1^{er} août 2006 fût l'occasion de participer à un meeting de bateaux originaux au Lac des Brenets.



Figure 5 : L'Hydroxy 3000 lors du 1^{er} août au Lac des Brenets en 2006

En 2007, une ligne graphique a été ajoutée pour appuyer le fait que l'Hydroxy 3000 est un bateau naviguant sans émissions à effet de serre, et aussi sans émissions sonores ni odorantes [2]. Le grand ZEN, pour « Zero Emission Navigation », apposé sur le côté l'a rebaptisé ainsi dans l'esprit des gens.



Figure 6: L'Hydroxy 3000 avec sa nouvelle ligne graphique lors de la journée de la mobilité à Neuchâtel en 2007

La présentation du bateau en 2008 au salon « International Advanced Mobility Forum (IAMF) » à Genève a permis de focaliser sur les points communs entre les systèmes piles à combustibles pour l'automobile et pour les bateaux.

2009 fut une année de transition où l'équipe de travail s'occupant de l'Hydroxy 3000 a changé. Ceci apporta un nouvel élan aux tests de systèmes énergétiques réalisés. Ainsi, une nouvelle pile à combustible du commerce de 2 kW, produite par Horizon Fuel Cell Technologies, a été installée à son bord. Cette pile avait comme principale différence un refroidissement à air, avec le même air qui l'alimente en oxygène. Une électronique faisant l'interface entre la pile et les batteries du bateau a aussi dû être ajoutée afin de concilier les niveaux de tension différents. Celle-ci s'est plus tard révélée très commode pour contrôler le flux de puissance fourni par la pile. Une nouvelle étape était en train de voir le jour pour l'Hydroxy 3000 ; l'hybridation.

Cette nouvelle pile à combustible, plus simple, s'est toutefois avérée moins adaptée aux conditions à laquelle elle était soumise. L'air, aux températures et humidités très variables selon le temps, avait une influence non négligeable sur ses performances.

Le Fuel Cell Forum de Lucerne, qui se tient sur le thème des piles à combustible basse température une année sur deux, est une occasion idéale pour présenter l'Hydroxy 3000 en tant que bateau mu par une PACo. Celui-ci y a été fidèlement présenté en 2009, 2011, 2013 ainsi qu'en 2015.



Figure 7 : L'Hydroxy 3000 lors du Fuel Cell Forum de Lucerne en 2011

Démonstrations et posters ont permis une diffusion efficace des résultats de fonctionnement des piles à combustibles appliquées à la navigation de plaisance.

En 2011, quelques modifications ont été apportées. Des hublots ont été ajoutés à la cabine, améliorant considérablement le confort à bord. Le fait que l'énergie doit être fournie, soit par la pile à combustible, soit par le chargeur de batterie, est une contrainte. Les stations de recharge d'hydrogène ne sont pas courantes et les prises électriques se trouvent souvent hors de portée. Pour y remédier, 180 Wc panneaux solaires photovoltaïques semi-souples ont été ajoutés sur la cabine. Cette solution permet, avec un peu de temps, de recharger pleinement les batteries tampon. Ainsi le bateau est devenu pleinement un hybride ; solaire, batteries et pile à combustible.



Figure 8 : En 2011, des panneaux solaires ainsi qu'une trappe de remplissage externe d'hydrogène ont été ajoutés

La même année, une pile oxygène pur/hydrogène, produite par Belenos Clean Power, a été installée pour des tests en conditions réelles. Il a donc fallu ajouter un réservoir d'oxygène sous pression à bord. L'avantage de cette nouvelle pile était une densité de puissance plus élevée et une fiabilité accrue, dû au fait que différents facteurs influençant la bonne marche de la pile sont maîtrisés indépendamment les uns des autres. L'inconvénient est qu'avec deux gaz consommables, le plein doit être fait dès le premier réservoir vide. Cette pile est encore sur le bateau à ce jour et performe au-delà des attentes, notamment par sa longévité et sa capacité à redémarrer suite à une longue période d'arrêt.

En 2013, après être allé au Fuel Cell Forum de Lucerne, l'Hydroxy 3000 a été présenté à la manifestation des « Bateaux Extraordinaires » à Deauville, en Normandie.



Figure 9 : L'Hydroxy 3000, en 2013, lors de la manifestation des Bateaux Extraordinaires à Deauville, où il y avait notamment l'Alcyone du commandant Cousteau

Cette démonstration en a impressionné plus d'un, y compris nous-même. La raison est le fait que très peu de combustible a dû être utilisé, grâce à une météo favorable, malgré des démonstrations incessantes durant trois jours, presque toute l'énergie ayant été fournie par les panneaux solaires.

En plus de tous les événements précités, l'Hydroxy 3000 a participé de nombreuses fois à la Fête Eau-Lac à Yverdon-les-Bains [3].

Collaboration au niveau national

Comme mentionné précédemment, après des collaborations initiales avec le PSI ; une collaboration avec Belenos Clean Power² a débuté en 2011 pour tester leur pile à combustible dans des conditions réelles. Cette pile a une capacité de 4.5 kW, mais ne peut qu'être exploitée à 3.5 kW à cause de la limitation liée à l'électronique. En effet, aucune électronique n'a été trouvée à un coût raisonnable permettant de travailler à une tension de 14 V et un courant de 320 A. Un tel développement reste souhaitable, toutefois le budget reste à trouver.



Figure 10 : Pile à combustible oxygène pur/hydrogène de Belenos

Cette pile a la particularité de fonctionner avec de l'oxygène pur et non de l'air. L'avantage est que la densité de puissance de pile est augmentée, l'inconvénient est qu'il faut gérer un deuxième gaz sous pression et l'oxygène a des caractéristiques assez particulières.

Cette pile est encore à bord de l'Hydroxy 3000 à ce jour et continue à bien fonctionner.

² Devenu aujourd'hui Swiss Hydrogen Power

Collaboration au niveau international

On mentionnera, pour mémoire, la traversée de l'atlantique en 2002 avec une pile de type PEM 300W utilisée comme alimentation des auxiliaires d'un voilier de course lors de la course du Rhum, en collaboration avec l'Université du Havre et l'entreprise « Horizon Fuel Cells », basée à Singapour [4].

Puis, toujours avec « Horizon Fuel Cells » le test d'une pile PEM 3 kW sur l'Hydroxy3000 en 2009 et 2010, ainsi que pour des « range extenders », basés sur des piles PEM de 300W, pour bateaux de pêche électriques [5].

Plus récemment, 2014 fut une année riche en expérience par une collaboration inédite entre la HEIG-VD et l'entreprise Israélienne Phinergy. Cette dernière est active dans le développement de pile aluminium-air. L'intérêt de cette collaboration pour la HEIG-VD était d'acquérir une expérience concrète et de première main sur cette technologie, afin de tester son fonctionnement et avoir un bon aperçu de ses avantages et inconvénients. L'intérêt pour Phinergy était de profiter du savoir-faire naval de l'IESE pour créer un démonstrateur.



Figure 11 : L'Hydroxy 3000 lors de l'expérience Al-Air en 2014

Un événement officiel a été organisé en été 2014 pour présenter le premier bateau naviguant à l'aluminium. Durant l'hiver 2014-2015 le système a été démonté et renvoyé, car le matériel était au bénéfice d'un carnet ATA pour une année. Le système pile à combustible de Belenos a ensuite été remonté pour la saison d'été 2015.

Cette expérience a permis de comprendre quelles sont les besoins des piles aluminium-air pour fonctionner (combustible et électrolyte), comment elles doivent être opérées, quels sont les dangers liés à leur utilisation et quels sont les déchets qu'elles produisent.

Un écobilan est actuellement en cours de réalisation.

Evaluation 2015 et perspectives 2016

Suite à douze années de loyaux services et de multiples systèmes testés à bord de l'Hydroxy 3000, ses systèmes électriques commencent à être usés et obsolètes. A force de modifications, d'ajouts et de remodifications, une restructuration s'avère nécessaire. Il a donc été décidé de refaire toute sa partie électrique, changer l'automate de gestion, l'écran d'interface homme-machine et changer ses batteries.

Les batteries, de technologie Pb seront testées sur le banc de test batteries de l'IESE pour évaluer leurs états de santé après 5 ans de service.

Une remise en état des autres éléments usés sont aussi à l'ordre du jour.

Depuis l'installation des panneaux solaires sur l'Hydroxy 3000 un constat général a été fait : La consommation d'hydrogène a diminué, voir presque disparu. La pile à combustible est passée au rang de prolongateur d'autonomie (*range extender*) plutôt que de source principale d'énergie. Pour le futur, l'idée est de mettre en place un système de *data logging* qui enregistrera les consommations et productions d'énergie lorsque le bateau est en service. Ceci permettra de faire un bilan, basé sur une utilisation réelle, et permettre de démontrer dans quelle mesure la navigation de loisir sera réalisable avec des ressources externes, à priori très limitées.

Références

- [1] F. Buchi, JF Affolter & Al, « PEFC stacks, systems and applications », Chimia 2004 Vol.58 p869
- [2] Jean-François Affolter, Mauro Carpita, François Gaille, Silvia Schintke "Des piles à combustible dans la navigation", Bulletin Electrosuisse, 1/2007 p.31
- [3] www.fete-eau-lac.ch
- [4] JF Affolter, B. Dakyo, P. Reghem, C. Neveu « Une pile à combustible sur la route du Rhum » colloque nouvelles énergies, Le Havre, novembre 03
- [5] Jean-François Affolter, Taras Wankewicz, Jeff Davison « Compact hydrogen fuel cell solution for recreational fishing boats », EVER07, Monaco, avril 07

Annexe

-