

Rapport annuel 2004, 10 décembre 2004

Projets

-Bateau pile à combustible Hydroxy3000

-Possibilités et limitations dans l'application des piles à combustibles à la navigation

-Autre projets à l'EIVD concernant les piles à combustibles

Auteur et coauteurs	Affolter Jean-François
Institution mandatée	IESE (institut d'énergie & systèmes électriques) / EIVD / HES-SO
Adresse	CP / 1401 Yverdon
Téléphone, e-mail, site Internet	+24 423 21 11, affolter@eivd.ch , http://iese.eivd.ch/
N° projet / n° contrat OFEN	projets OFEN 43692 et 100418
Durée prévue du projet (de - à)	2002 - 2004

RÉSUMÉ

Depuis 1997 l'institut d'énergie et systèmes électriques de l'EIVD réalise des projets appliquant des piles à combustibles [1]. Ces projets sont appliqués principalement à la navigation.

Cette année a permis de tester le bateau Hydroxy3000, mû par une pile PEM de 3 kW. Les résultats démontrent un comportement très satisfaisant du système. Ce projet a été récompensé par **un certificat d'excellence**, suite à l'évaluation jury de personnes composées de représentants de l'industrie, des pouvoirs politiques et du grand public lors du trophée « Eco-Conscience » de Lausanne. Ce bateau a aussi été présenté dans le cadre de l'European FC Forum de Lucerne, où environ 150 chercheurs ont pu apprécier la navigation respectueuse de l'environnement. Ce développement a fait l'objet de reportages aussi bien dans la presse qu'à la télévision. Les travaux vont se poursuivre sur ce bateau, avec l'amélioration permanente du système et la valorisation en participant à des conférences, ainsi que par l'organisation de manifestations particulières.

Les études se poursuivent par le projet « possibilités et limitations des piles à combustibles dans la navigation ». Des résultats plus complets sont attendus en début d'année 05. On entrevoit cependant la principale limitation dans le stockage de l'énergie nécessaire à une autonomie suffisante pour les bateaux de grands tonnages.

Les développements dans la navigation vont se poursuivre avec le développement de projets concernant l'alimentation électrique auxiliaire des voiliers de courses et l'étude de bateaux avec de plus grandes autonomies.

Ces projets ont donné lieu à de nombreuses conférences et contacts avec les entreprises. En complément à l'application dans la navigation, des études et essais concernant la co-génération ont démarré. En particulier, un soutien à la start-up « Natural Power » est envisagé pour la réalisation d'une installation de démonstration. Des contacts très intéressants ont été noués avec la start-up française ECP, développant un reformer capable de gazéifier de nombreux liquides énergétiques. Un essai de cette technologie dans le cadre des piles à combustibles est envisagé. Les contacts avec les entreprises seront poursuivis. Les tentatives d'intégrer des projets européens aussi.

Buts des projets

Les projets réalisés à la HES-SO / EIVD / IESE visent les objectifs suivants :

- **Tester les piles à combustibles dans des conditions d'utilisation réelles**, qui diffèrent des conditions de laboratoires. Il est encore nécessaire de **trouver des solutions aux problèmes pratiques** rencontrés lors de l'application en conditions de fonctionnement pratiques et perfectionner ce produit émergent.
- Travailleur en étroite collaboration avec les instituts de recherche fondamentale et **donner un feed-back aux développeurs**. Cette relation doit permettre l'amélioration des systèmes développée par lesdits instituts, sur la base des remarques lors de l'utilisation du produit développé.
- Offrir aux **étudiants** une **formation** sur un produit **de pointe**. Les étudiants d'aujourd'hui sont les **décideurs de demain**. La pile à combustible est un produit dont la maturité est attendue d'ici quelques années (niveau commercial). D'avoir été formé sur cette technologie permettra un choix éclairé aux décideurs de demain qui devront résoudre nos problèmes énergétiques futurs. Un transfert technologique s'opère aussi par ce biais dans les entreprises, lors d'engagement d'ingénieurs ayant travaillé sur cette technique.
- Offrir un **soutien aux entreprises** qui envisagent des développements dans ce domaine. Le transfert technologique réalisé par le biais de projets avec les entreprises favorise ce but. La pile à combustible et les technologies qui l'entourent sont parfaitement adaptées aux performances et technologies maîtrisées par les PME Suisses. Par exemple, l'entreprise *MW-Line* maîtrise désormais la fabrication de bateaux munis par piles à combustibles.
- **Promouvoir cette technologie** novatrice en touchant un large public. Le grand public finance la recherche au moyen des impôts. Les projets démonstrations offrent un feed-back au contribuable et permettent de convaincre le public ainsi que le pouvoir politique d'encourager la recherche de nouvelles solutions, en démontrant que la recherche fondamentale atteint des objectifs réalisés.
- Offrir **de nouvelles places de travail** en Suisse. L'emploi industriel est en récession dans les pays occidentaux. Il s'agit de développer de nouvelles technologies, permettant de maintenir les emplois. La pile à combustible et les technologies qui l'entourent sont parfaitement adaptées aux PME Suisses. Les objectifs mentionnés ci-dessus se conjuguent pour favoriser cet objectif.
- Favoriser une **utilisation rationnelle de l'énergie, la protection des eaux et de l'air**. Avec une efficacité environ deux fois meilleure que les moteurs à combustion à essence utilisés aujourd'hui dans la navigation, la pile à combustible offre de meilleures performances, même avec une énergie primaire basée sur du non-renouvelable. La plus faible puissance nécessaire offrent cependant des perspectives plus réalistes pour la fourniture de **combustible renouvelable** ; par exemple, 5 à 10 m² de panneaux solaires photovoltaïques suffisent à produire l'hydrogène nécessaire au fonctionnement annuel du bateau Hydroxy3000. **L'absence d'essence à bord des embarcations exclut toute pollution des eaux** et évite la pollution de l'air (dans l'utilisation). Cette technologie limite fortement le bruit, nouvelle forme de pollution de moins en moins acceptée.

Travaux effectués et résultats acquis

- **Bateau Hydroxy3000 (OFEN 43692):**

Mis à l'eau en décembre 2003, le bateau a effectué sa première année d'exploitation. Environ 80 heures de navigation ont permis de tester le fonctionnement du système, tandis que la pile de 3 kW a subi plus de 100 démarriages et environ deux cent heures de fonctionnement. Si des améliorations ont été nécessaires, on note un bon fonctionnement général du système, sans remarquer, pour le moment, de dégradation significative.

Le bilan énergétique du bateau est le suivant :

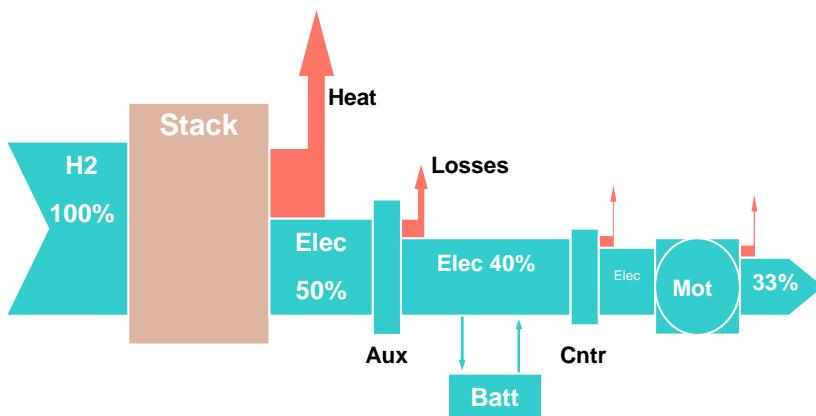


Fig. 1 : Flux énergétique (avant changement de compresseur)

Au niveau global, ce résultat doit être modéré par la perte supplémentaire due à l'élaboration et à la compression de l'hydrogène, ce qui mène à un résultat estimatif global de 26% (fort dépendant d'hypothèses). Ce résultat, qui peu paraître bas, est à comparer au rendement d'un moteur thermique à essence qui, si l'on tient compte de l'énergie grise de l'essence est d'environ 16%. On remarque une amélioration énergétique notable, qui serait encore meilleure si l'on tenait compte de l'énergie nécessaire à l'élaboration de bio-essence (ce qui serait souhaitable pour une vision future).

Des améliorations ont dû être effectuées sur le stack 3 kW, lequel a été complètement refait pour satisfaire aux exigences de sécurité, de fiabilité et de solidité nécessaires. En particulier, le compresseur a été changé. Un gain d'environ 200 W a été réalisé sur les auxiliaires, qui consomment dès lors environ 10% de l'énergie du stack (auparavant optimisation environ 20%). On constate cependant une réaction très différente du comportement des cellules et une optimisation du système complet doit être refaite avant de pouvoir présenter des résultats définitifs, en particulier les rendements. D'autres améliorations doivent encore être réalisées sur le système et dans le bateau. Par exemple l'installation d'une vanne haute pression pour l'automatisation complète du système, une meilleure programmation du display utilisateur ainsi que des transformations mécaniques liées à la transmission (diminution du bruit!).

Notons que le bateau a été homologué « prototype » par le service cantonal compétent et a reçu un jeu de plaques lui permettant de naviguer légalement.

Plusieurs démonstrations ont été effectuées, pour les sponsors et dans le cadre de l'European Fuel Cells Forum de Lucerne [2]. A cette occasion, environ 150 spécialistes ont pu apprécier la navigation sur l'Hydroxy3000. L'opinion sur ce développement fut unanimement positive.



ECO-CONSCIENCE 04
CERTIFICAT D'EXCELLENCE

Fig. 2 : Bateau Hydroxy3000

Ce projet a été récompensé avec un certificat d'excellence par le jury du trophée « Eco-Conscience », organisé par le *Beau-Rivage Palace* et la *ville de Lausanne* [3]. Ce prix démontre que l'objectif d'informer et d'intéresser le « grand public » atteint son but.

Les entreprises « *Mouettes Navigation Genève* » (compagnie de navigation), « *IHT Industrie Haute Technologie SA* » (électrolyseurs), « *GRANIT* » (entreprise environnementale) et « *EHL, école hôtelière de Lausanne* » ont visité l'IESE dans le but de s'informer du projet et créer des contacts en vue de collaborations.

Divers articles sur le projet ont paru dans la presse grand public et professionnelle, ainsi que des reportages ont été réalisés par la télévision (info suisse romande et Canal NV).

Possibilités et limites des piles à combustibles dans la navigation (OFEN 100418):

Ce projet, encore en cours, examine les possibilités et limites des piles à combustibles dans la navigation (lacs et canaux). Différentes catégories de bateaux sont étudiés, en particulier du petit bateau de plaisance (style Hydroxy3000, fig.2), au bateau de passagers (étude de cas sur les bateaux « Lausanne » de la CGN et « C100 » de MW-Line).



Fig. 3a et b : Bateaux étudiés « Lausanne » (CGN) et « C100 » (MW-Line)

Les résultats intermédiaires démontrent néanmoins clairement que, si la pile est une technologie intéressante par son rendement et évitant toute pollution des eaux, la limitation provient de la réserve de carburant disponible sur le bateau. Ceci limite l'usage direct de l'hydrogène aux embarcations de taille moyenne (par exemple, 500 km d'autonomie avec le C100 ; l'exploitant souhaitant actuellement 100 heures (~2500 km) d'autonomie pour un bateau de ce type !). Une solution pour les gros bateaux, favorisant la protection des eaux, est donc un stockage de gaz naturel alimentant une pile haute température (par exemple MCFC). Ou, sans considérer l'aspect de protection des eaux, un reformage de Diesel (ou autre liquide adapté).

Une difficulté rencontrée dans le projet est de trouver des informations fiables sur certaines technologies ; on peut mentionner, par exemple en illustration ci-dessous les différences obtenues sur

l'hydrogène liquide selon les sources ! (LH₂ cas 1 = d'après les données indiquées dans les projets Opel Zafira ; LH₂ cas 2, d'après des calculs théoriques !).

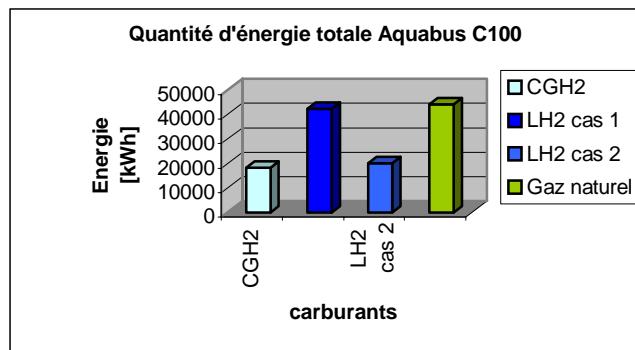


Fig. 4 : Energie embarquable sur le « C100 »

Ce projet fait l'objet de collaborations avec les entreprises CGN (*compagnie générale de Navigation*), « *Mouettes Navigation Genève* » et *MW-Line*. Un logiciel a été développé pour le calcul de la puissance nécessaire à l'avancement des bateaux et un autre pour les calculs énergétiques. Ce projet, dont le rapport final était prévu en décembre 04, souffre d'un léger retard et est prolongé de quelques mois.

Autres projets et activités concernant les piles à combustibles à l'EIVD ou en participation

- *Présentations sur les piles à combustibles (sur les projets ou en général)* ; Ces activités montrent l'intérêt que suscitent ces projets et notre volonté d'information, tout aussi bien auprès du grand public que du milieu professionnel.
 - Conférence donnée à *ELECTROBROC* le 20 mars 04
 - Conférence donnée au *gymnase de Morges* le 31 mars 04
 - Présentation donnée au *European FC Forum* le 1 juillet 04 à Lucerne [2]
 - Conférence donnée pour *l'ADNV*(*association du développement du Nord Vaudois* le 6 octobre 04 à Yverdon
 - Présentation dans le cadre de la journée « *FC Impulse Tag* », le 12 novembre à Bienne
 - Présentation dans le cadre de *Forum sport et technologies* le 1 décembre 04 à Yverdon
 - Paper poster présenté à la *conférence Franco-Allemande sur les piles à combustibles* le 30 novembre 04 à Belfort (F) [4]
 - Conférence donnée dans le cadre des *Lunch-Débat du service de l'énergie* le 10 décembre 04 à Neuchâtel
- *Projet PILEPAC (HES-SO Sagex 11757, en cours); Valorisation de la chaleur d'une pile à combustible par pompe à chaleur (Chef de projet: HES-SO/HEVs Sion)*; Ce projet entreprend les mesures de rendement, ainsi que l'adaptation d'un compresseur de pompe à chaleur avec l'étude et la réalisation de l'électronique nécessaire. Notre laboratoire effectue les mesures sur la pile de 3 kW, tandis que Sion effectue les tests sur les piles Nixa

de Ballard. On mesure, par exemple ci-dessous de très bonnes caractéristiques dynamiques de la pile 3 kW PSI/EIVD:

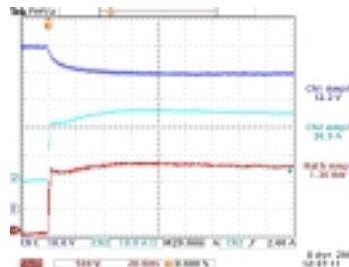


Fig. 5 : Réponse transitoire de la pile 3 kW PSI/EIVD

- *Projet COGENPAC (HES-SO Sagex 14061, en montage)*; Dans la volonté de soutenir les entreprises, un projet est en cours d'élaboration avec la start-up « *Natural Power* », dans le but de réaliser un prototype de démonstration, basé sur la pile PSI/EIVD de 3 kW refroidie à l'eau. Ce projet a déjà permis la création de contacts intéressants avec la start-up française « *ECP Etudes Chimiques et Physiques* », produisant un reformer qui sera mis à disposition à prix coûtant pour les réalisations qui pourraient voir le jour dans le cadre des projets Ra+D.
- *Travaux d'étudiants*; Des expérimentations sont régulièrement effectués dans le cadre des laboratoires de physique ainsi que d'énergie. Plusieurs travaux de diplômes ont été réalisés sur le sujet [5,6,7,8,9,10].

Collaboration nationale

- *Collaborations avec les institutions de recherche* : PSI, HTA-Biel, HES-SO/HEVs Sion, HES-SO/Ecole Hôtelière, HES-SO/ARC, EPFL, Hydropôle, Energy-cluster, Haute Ecole de Gestion VD
- *Collaborations avec l'économie privée* : CGN, MW-Line, Mouettes Navigation Genève, Natural Power, IHT Industrie Haute Technologie SA, GRANIT SA, service de l'énergie Neuchâtel, Romande Energie, Electriciens Romands

Les partenaires de recherche et industriels avec participations financières ou en matériel pour les projets concernant les bateaux à piles à combustibles sont les suivantes :

- Office Fédéral de l'Energie – Cofinancement (Resp. Dr. Hintermann)
- Les Electriciens Romands – Cofinancement (fonds RDP/CREE)
- Romande Energie – Cofinancement
- HES-SO/CCE/Réserve stratégique – Cofinancement
- Paul Scherrer Institute – recherche et fabrication pile à combustible (F. Büchi)
- HTA-Biel – montage de la pile à combustible (Prof. M. Hoeckel)
- HES-SO/Le Locle – étude motorisation (Prof. C. Brandt)
- MW-Line, Yvonand – et IDE Design, construction et sponsorisation partielle du bateau (MM Mesple et Wüst)
- Leclanché SA – Sponsor batteries

- Beckhoff Automation – Sponsor automates
- Wago Contact – Sponsor connectique
- Gessmann (Elva AG) – Sponsor commande
- Belimo Automation – Sponsor vannages
- Bucher & Walt – Sponsor acastillage

Collaboration internationale

Les collaborations avec les entités suivantes ont été actives cette année :

- ECP (Etudes Chimiques et Physiques, Orléans, France) ; étude des possibilités de reformatage de différents médiums et étude des applications aux piles à combustibles ou aux groupes thermiques style TOTEM
- Alca-Torda (start-up piles à combustibles appliquées à la navigation, Le Havre) ; échanges d'informations concernant les bateaux (et traversée de l'Atlantique en 02 [11,12])
- Réseau européen FCSHP [13]; membre du « user's group »
- Université de Turin (Italie) ; diplôme concernant l'électronique de puissance appliquée aux piles à combustibles [8]
- Université d'Uppsala (Suède) ; diplômes concernant la sécurité des bateaux électriques, en particulier à piles à combustibles [7]
- Participation au projet européen HyBoat (Resp. C. Machens, Stuartenergy) ; projet refusé car sur la base d'un moteur thermique classique alimenté à l'Hydrogène.

Évaluation de l'année 2004 et perspectives pour 2005

Le **certificat d'excellence** du trophée « Eco-Conscience » récompensant le projet Hydroxy3000 est certainement une preuve que les objectifs de nos projets sont atteints et sont dans la bonne direction. La phrase suivante, d'un sponsor venu tester le bateau « **nous souhaiterions que tous les projets que nous soutenons aient un résultat comparable**¹ » nous récompense des heures consacrées à réaliser ce projet correspondant sous tous les angles au **développement durable**. La demande importante pour des conférences et les papiers ou posters acceptés démontrent l'intérêt pour ces développements. Ces projets ont permis de nouer de nombreux contacts (voir ci-dessous le paragraphe « perspectives ») démontrant un **potentiel de développement important pour de nombreux projets**.

Les échecs que nous pourrions déplorer sont dus d'une part au **manque de temps disponible pour les professeurs HES**, de plus en plus occupés par des tâches administratives et les réorganisations nécessaires aux accords de Bologne. Et d'autre part, **par la suppression des budgets concernant les projets pilotes et de démonstration**. Par exemple, le projet de tester des bouteilles à Hydrures métalliques développées par l'Université de Fribourg n'a pu être réalisé comme prévu pour l'ensemble des raisons mentionnées.

¹ Ch. Garneri, „Les électriciens Romands“ Lausanne

Perspectives et objectifs 05 :

- *Suite des tests en conditions réelles sur l'hydroxy3000 ;*
 - Suite des tests et de l'optimisation de la pile 3 kW PSI/EIVD dans les buts **d'améliorer encore le rendement global et de tester la fiabilité ainsi que la longévité du système**
 - **Essais d'autres types de piles à combustibles**, selon discussions en cours avec certains fabricants ou développeurs de piles
- *Suite des projets concernant l'application des piles à combustibles à la navigation ;*
 - Suite et fin de l'étude « **possibilités et limitations des piles à combustibles appliquée à la navigation** » (OFEN 100418)
 - Contacts en cours avec des team de courses ; examen de remplacer les batteries sur les **voiliers de courses** par des piles à combustibles. Etude de la possibilité de réalisation pour un tour du monde
 - Etude de la réalisation d'un tour du monde en bateau hybride solaire et pile à combustible
- *Suite des projets liés à la co-génération ;*
 - Suite du projet PILEPAC de valorisation de la chaleur des piles à combustibles au moyen d'une pompe à chaleur
 - Suite de la recherche de fonds pour le **lancement de la start-up « Natural Power »** et la réalisation d'un projet de démonstration dans le domaine de la co-génération par pile à combustible
 - Démarrage d'un projet d'étude avec le service de l'énergie de la ville de La Chaux de Fonds pour le remplacement des chauffages électriques par des piles à combustibles
 - tests des reformers de l'entreprise *ECP* dans la co-génération, par exemple basée sur les **huiles usées** (domaine de l'hôtellerie) ou de procédés industriels. Par exemple pour la valorisation de sous-produits de fabrication du bio-diesel avec l'entreprise « *Ecoenergie* » d'Etoy
- *Enseignement ;*
 - Essais de piles dans les travaux de laboratoires, y compris mise en service et essais d'une pile au **méthanol** récemment acquise
 - **Travaux de diplômes** sur tous les sujets liés aux piles à combustibles, aux énergies renouvelables et aux réseaux électriques. En particulier en collaboration avec l'entreprise Yverdonnoise « *HT-Ceramix* »
- *Autres projets liés aux piles à combustibles ;*
 - Développement **d'électroniques de puissance** et de conversion adaptées aux piles à combustibles
 - Poursuite des tentatives de participation aux projets européens
- *Valorisation des projets et démonstrations ;*
 - **Déplacement à Monaco** pour présentation lors de la conférence EVs 21 et démonstrations avec le bateau Hydroxy3000 dans le port

- **Tour des trois lacs** ; arrêt dans les ports de Neuchâtel, de Bienne et de Morat avec manifestations en collaboration avec les écoles partenaires du projet ou travaillant dans les domaines connexes ; école ARC, HTA-Bienne et Université de Fribourg. Manifestations avec les services des énergies et partenaires concernés par le développement durable souhaitant participer au projet
- Démonstrations dans le cadre de la conférence « European fuel Cells » de Lucerne
- Présentations et conférences selon demande et possibilités

Références

- [1] JF. Affolter, Ph. Léchaire, P. Mariotti, « **Projet pilote d'un bateau mû par pile à combustible de 2 kW, pré-étude** », rapport HES-SO, novembre 00
- [2] JF. Affolter, A. Gianinazzi, Y. Leuppi « **Hydroxy3000, third generation FC boat** », European Fuel Cells Forum, Lucerne, 2004
- [3] <http://www.lausanne.ch/view.asp?DomID=62978>
- [4] JF. Affolter, A. Gianinazzi, Y. Leuppi « **Third generation of FC boat in Switzerland** », Poster paper, conférence Franco-Allemande sur les piles à combustibles, Belfort, déc. 2004
- [6] R. Minnig, « **Optimisation et implémentation d'une pile à combustible PEM de 3kW dans le bateau Hydroxy3000** », Diplôme EIVD 03
- [6] A. Gianinazzi, « **Rénovation de la pile à combustible 300W** », Diplôme EIVD 03
- [7] C. Badan, « **Etude du foudroiement des bateaux électriques** », Diplôme EIVD 04 (en collaboration avec l'université d'Uppsala (S))
- [8] S. Martin, « **Etude d'un convertisseur à commutation douce** », Diplôme EIVD 04 (en collaboration avec l'université de Turin (I))
- [9] V. Ducommun, « **Etude d'un bateau à pile à combustible à autonomie particulière** », Diplôme EIVD 04 (en collaboration avec MW-Line)
- [10] G. Gaussen, « **Etude de marché pour les bateaux de plaisances à pile à combustible** », Diplôme HEG 04 (mandaté par EIVD)
- [11] J.-F. Affolter, B. Dakyo, P. Reghem, C. Neveu « **Une pile à combustible sur la route du Rhum** » Rapport final, mars 03
- [12] JF Affolter, « **Piles à combustibles, état de l'art et applications à la navigation** », Colloque nouvelles énergies, Le Havre, novembre 03.
- [13] <http://www.FCSHIP.com>

Internet : <http://iese.eivd.ch /hydroxy>