



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

PACBOAT

INTEGRATION D'UNE PILE À COMBUSTIBLE 300 W POUR LA MOTORISATION ELECTRIQUE DE PETITES EMBARCATIONS

Rapport final

Élaboré par

JF Affolter, HES-SO / HEIG-VD / IESE

Rte de Cheseaux 1 / 1400 Yverdon, jean-francois.affolter@heig-vd.ch,
<http://iese.heig-vd.ch>

Impressum

Date : 24 octobre 2006

Sur mandat de l'Office fédéral de l'énergie,
programme de recherche pile à combustible incl. hydrogen

Mühlestrasse 4, CH - 3063 Ittigen

Adresse postale : CH - 3003 Berne

tél. +41 31 322 56 11, fax +41 31 323 25 00

www.bfe.admin.ch

Responsable du domaine à l'OFEN : nom du responsable, prenom.nom@bfe.admin.ch

Numéro OFEN du projet : 101520

Source d'acquisition de cette publication : www.recherche-energetique.ch

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

Table des matières

Résumé	1
Abstract	1
1. Situation de départ	2
2. But du travail.....	4
3. Méthode utilisée	4
4. Résultats.....	5
5. Discussion	8
6. Conclusions.....	9

Résumé

La réalisation d'un système électrique pour bateau de pêche, basé sur une pile à combustible de 300 W permet une recherche appliquée sur l'intégration d'une technique de motorisation novatrice et respectueuse de l'environnement. Ce projet a permis l'acquisition de nouvelles connaissances et un transfert technologique avec les entreprises partenaires du projet. Cette réalisation permettra aussi la démonstration du fonctionnement de nouvelles technologies au grand public, ainsi qu'aux milieux scientifiques et aux entreprises.

Ce concept offre une réelle alternative, futuriste, silencieuse et moins polluante pour petits bateaux de pêcheurs sur les lacs, en particulier ceux interdits à la navigation « thermique ».

Ce développement présente de nombreux aspects novateurs ; d'abord la technologie des piles à combustibles, qui revient sur le devant de la scène depuis quelques années. Ensuite les bateaux électriques, dont le marché est en pleine croissance.

L'application des piles à combustibles aux bateaux présente les avantages suivants :

- Evite la pollution de l'air. Evite la pollution des lacs avec de l'huile et des hydrocarbures ; si notre futur nous réserve des soucis énergétiques, celui de l'eau potable est en passe de devenir un problème majeur des prochaines générations. Il est important de protéger rapidement et efficacement ces patrimoines naturels vitaux pour l'homme
- L'hydrogène peut être obtenu de différentes sources (renouvelable, indépendance géopolitique...) ; quantité nécessaire aisément fabricable. A un taux d'utilisation « usuel » pour un bateau de pêcheur par loisir ; quelques m² de panneaux solaires sont suffisants pour produire l'hydrogène annuel nécessaire à ce système
- Poids, encombrement et refroidissement peu problématiques sur un bateau (p.ex. stockage de l'Hydrogène) ; ce qui assure une faisabilité réaliste pour cette application
- Bon rendement de la pile à combustible, même à charge partielle (vitesse réduite pour la pêche ou la plaisance) ; rendement amélioré d'environ deux tiers par rapport à un moteur thermique conventionnel à essence
- Equipement facile d'un nombre limité de stations de distribution (p.ex. 20 lacs Suisse) au moyen des équipements proposés par le projet européen « *Hychain* », par exemple.
- Silence et absence de pollution, respectant la faune et les humains à proximité
- Technologie de pointe, favorisant le renouveau d'emplois dans le secteur industriel (technologie applicable du mW au MW !).

En collaboration avec les sociétés *Horizon Fuel Cell Technologies* / Singapour et *Johnson Outdoors* /USA, une petite motorisation pour bateaux électriques fonctionnant au moyen de piles à combustibles a été développée et testée. Ce prototype atteint un rendement de 40-45% dans les conditions d'utilisation. Son comportement est adéquat et ne pose pas de problème pour des cycles de pêches, ni avec d'autres motorisations que celles utilisées dans le cadre de ce projet.

L'aspect coût devient intéressant avec une motorisation de ce type ; en effet, le dimensionnement pour un cycle de pêche permet de considérer une puissance de pile à combustible d'environ un cinquième de la puissance de motorisation, avec l'utilisation d'une batterie tampon. Dans ce cas, la puissance de 300 W est suffisante et le coût du système devrait atteindre le seuil commercial d'intérêt (env. 1'000.- à 1'500.- sfr) avec une production de série.

L'absence de système de distribution d'hydrogène est l'inconvénient principal aujourd'hui. L'équipement d'une trentaine de ports en suisse, ne présente pas de difficultés techniques majeures mais reste à développer, par exemple au moyen des idées proposées par le projet européen « *Hychain* ».

Abstract

Legislation for pollution is getting more restrictive for lake and fresh water. FC technology is a solution to replace the "thermal" motors, often based on gasoline for the small units. With a better efficiency, zero emission and almost zero noise, FC boats are a good way to get a maximum pleasure on motorized navigation and to protect efficiently the drinkable fresh water resources. A few FC boats have been developed in Switzerland, to study the feasibility of that technology. This project presents the development of a small FC motorization for fishermen's boats, based on a 300 W PEMFC.

The project has been realized in partnership *HorizonFC* (Singapore) and *Jonson/MinnKota* (USA). It consists in the integration of a 300 W PEMFC in to a 1'500 W electric motorization system, including a smart automatization.

The tests on the lake showed a silent system, reaching an efficiency of about 45%. Propelled by an 1,5 kW electric motors, alimented by a 300 W PEMFC and with a battery buffer, a fishermen's boat reaches a speed of 8 km/h.

The main goals of the project where:

- To develop a product close to the market and at an affordable price
- To prepare for a technology transfer of the applied research to the interested firms
- To contribute to the formation of engineers with a future oriented technology

Conclusions are showing that the cost of the system could reach commercial interest for fishing leisure on European and North American lakes, with industrial production. Absence distribution system for hydrogen is the principal limitation for marketing today. Solutions are expected trough the EU project « *Hychain* ».

1. Situation de départ

Le nombre de bateaux électriques ne cesse de croître sur les lacs suisses, européens et nord américains. On note, par exemple aux USA, une flotte actuelle de plus de 100'000 bateaux électriques ! Ceux-ci sont actuellement alimentés par des batteries.

La sensibilité écologique croissante est un des facteurs. Les législations, interdisant de plus en plus la navigation dite « thermique » en sont une autre.

L'institut *IESE* de la *HES-SO / HEIG-VD* se penche sur cette problématique depuis 1996 déjà. Cela a abouti à la réalisation de plusieurs bateaux expérimentaux, la famille *Hydroxy* [1-10]. D'autres instituts de la *HES-SO* ont suivi dans la technologie des piles à combustibles et les techniques de l'hydrogène.



Figure 1 : Bateaux piles à combustibles de la famille Hydroxy

Fort de ces succès, deux entreprises se sont adressées à ces instituts pour la réalisation d'un nouveau projet. Les sociétés *Horizon Fuel Cell Technologies* / Singapour et *Johnson Outdoors* /USA ont soumis l'idée de développer un prototype industriel commercialisable, pour la motorisation des petits bateaux de pêcheurs. D'autre part, la société *MW-Line* / Suisse commercialise des bateaux électriques et s'intéresse à la commercialisation de telles unités.

En collaboration, nous avons donc développé et testé une petite motorisation pour bateaux électriques fonctionnant au moyen de piles à combustibles.

Ce développement présente de nombreux aspects novateurs ; d'abord la technologie des piles à combustibles, qui revient sur le devant de la scène depuis quelques années. Ensuite les bateaux électriques, dont le marché est en pleine croissance.

L'application des piles à combustibles aux bateaux présente les avantages suivants :

- Evite la pollution de l'air. Evite la pollution des lacs avec de l'huile et des hydrocarbures ; si notre futur nous réserve des soucis énergétiques, celui de l'eau potable est en passe de devenir un problème majeur des prochaines générations. Il est important de protéger rapidement et efficacement ces patrimoines naturels vitaux pour l'homme
- L'hydrogène peut être obtenu de différentes sources (renouvelable, indépendance géopolitique...) ; quantité nécessaire aisément fabricable. A un taux d'utilisation « usuel » pour un bateau de pêcheur par loisir ; quelques m2 de panneaux solaires sont suffisants pour produire l'hydrogène annuel nécessaire à ce système
- Poids, encombrement et refroidissement peu problématiques sur un bateau (p.ex. stockage de l'Hydrogène) ; ce qui assure une faisabilité réaliste pour cette application
- Bon rendement de la pile à combustible, même à charge partielle (vitesse réduite pour la pêche ou la plaisance) ; rendement amélioré d'environ deux tiers par rapport à un moteur thermique conventionnel à essence
- Equipement facile d'un nombre limité de stations de distribution (p.ex. 20 lacs Suisse) au moyen des équipements proposés par le projet européen « *Hychain* », par exemple.
- Silence et absence de pollution, respectant la faune et les humains à proximité
- Technologie de pointe, favorisant le renouveau d'emplois dans le secteur industriel (technologie applicable du mW au MW !).

Remarquons qu'il n'existe encore aucune motorisation de ce type sur le marché. Ce prototype est maintenant réalisable et commercialisable par les industries partenaires.

2. But du travail

Les projets développés auparavant (figure1) démontrent la faisabilité de l'alimentation de bateaux électriques lacustres, avec les avantages mentionnés dans le paragraphe ci-dessus. Deux problématiques restent cependant en exergue comme limitation à la commercialisation de cette technologie :

- Le coût des piles à combustibles
- L'absence de système de distribution de l'hydrogène dans les ports

Fort de ces constats, ce projet de réalisation et essais d'un prototype industriel de motorisation à pile à combustible pour la pêche de loisirs, a principalement l'intention de répondre à la première problématique mentionnée ci-dessus.

Ce projet représente aussi une contribution environnementale non négligeable et cette réalisation est un pas en avant pour proposer des systèmes commercialisables pour une catégorie de bateaux utilisant de petits moteurs hors bords à essence, les plus souvent incriminés pour leur pollution.

- Offrir une solution non polluante et silencieuse pour la motorisation hors bord en offrant une alternative à la motorisation thermique.
- Développer un produit proche du marché, à un coût abordable
- Tester ce développement en laboratoire et dans des conditions réelles d'application
- Offrir une autre solution que le stockage d'énergie par batteries. Les moteurs de type MinnKota sont aujourd'hui utilisés avec des batteries, lourdes à transporter pour les recharger, et lentes à charger.
- Effectuer un transfert technologique auprès des entreprises concernées
- Contribuer à la formation d'ingénieurs orientés vers les technologies du futur

En résumé, l'objectif principal est de développer et tester un produit pile à combustible pour l'alimentation de moteurs hors bords électriques, destinées aux petites embarcations de pêcheurs. L'objectif de cette technologie étant une meilleure efficacité énergétique, une commodité d'utilisation et un plus grand respect environnemental.

3. Méthode utilisée

Le projet a été mis sur pieds et réalisé grâce aux collaborations suivantes :

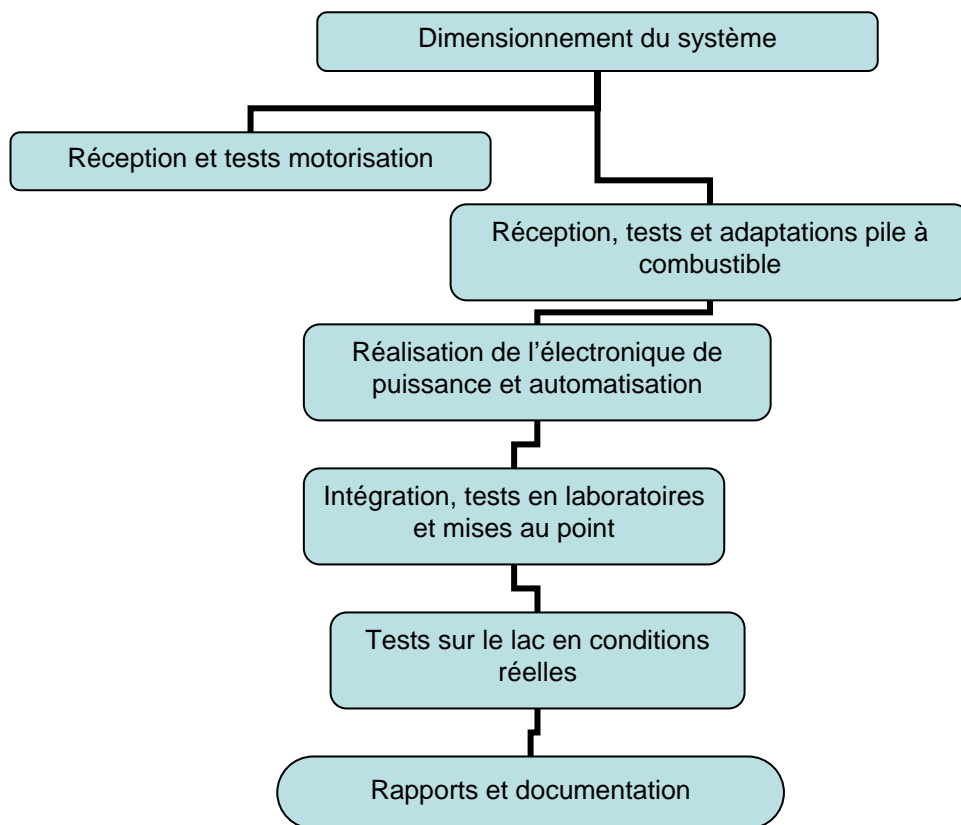
- Instituts de la HES-SO
 - HEIG-VD / IESE - coordination, pile, gestion, automatisation, intégration et tests
 - HEVs / P&C - Chargeur, intégration et tests
- Horizon Fuel Cells (Singapour) - fourniture de la pile, support technique
- Jonson MinnKota (USA) - fourniture motorisation, conseils
- MW-Line – Prêt bateau et conseils économiques
- Office Fédéral Suisse de l'Energie – Cofinancement
- HES-SO/RCSO-TE/Réserve stratégique – Cofinancement

Puis, soumis à la réserve stratégique de la HES-SO par le biais de son *réseau de compétences en techniques énergétiques*, le projet démarra effectivement en mai 2006.

Durée du projet : mai à novembre 2006

Postes de travail : 1 homme-années env.

La structure et méthodologie de réalisation sont décrites dans l'organigramme suivant.



4. Résultats

Les principaux composants du système sont la pile à combustible 300 W avec sa bouteille d'hydrogène, le convertisseur DC/DC (qui permet d'adapter la tension de la pile à celle des batteries, ainsi que d'en réguler la charge), les batteries et le moteur (figure 2).

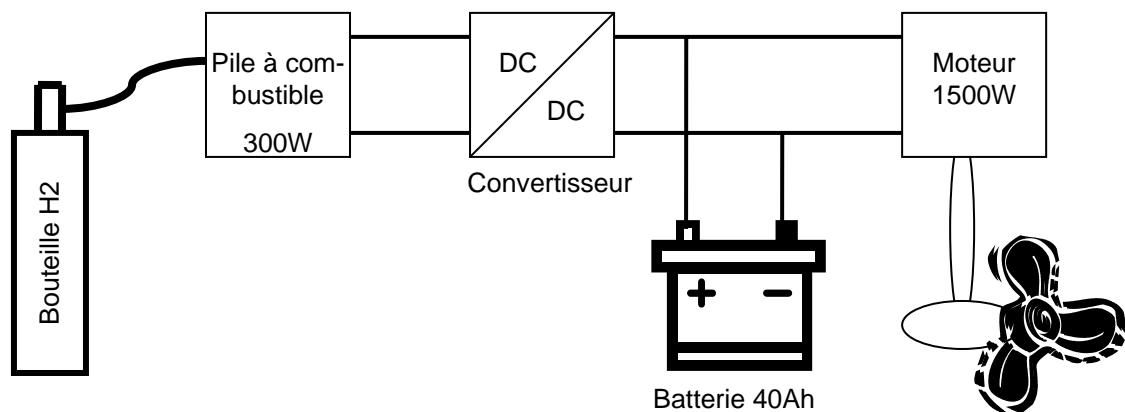


Figure 2 : Schéma de principe du système

Vu que la puissance de la pile est de 300 W et celle du moteur de 1500 W, une batterie tampon est nécessaire. La puissance maximum du moteur est atteinte seulement lors des phases d'accélération. À vitesse nominale, le moteur consomme 1000 W.

Pour le dimensionnement des batteries, nous avons considéré le parcours type suivant :

- 1 heure de déplacement à pleine puissance (aller)

- 4 heures de pêche
- 1 heure de déplacement à pleine puissance (retour)

Une capacité de stockage de 700 Wh ou 30 Ah en 24 V est nécessaire. Le choix du type de batterie s'est fait en fonction de plusieurs critères tels le prix, le poids et la facilité d'utilisation. Nous avons opté pour des batteries au plomb classiques (deux batteries 12 V, 40 Ah, 130.- sfr) en raison du prix ; le poids n'est pas un critère prépondérant, les batteries restant désormais sur le bateau.

L'autonomie sera fonction de la quantité d'hydrogène disponible à bord. Une bouteille « classique » de soudeur de 10 litres à 200 bars fut utilisée dans le projet, assurant une autonomie largement suffisante pour le cycle de pêche prévu. Ce point est développé dans la discussion (§ 5).

Les tests en laboratoire suivant ont été effectués sur la pile, en vue de son automatisation, du dimensionnement d'un convertisseur DC/DC adapté et de l'intégration du système complet :

- Mesure de la caractéristique tension-courant
- Mesure des tensions de cellules sous différentes conditions de fonctionnement et en fonction du temps (tests de durée)
- Mesure du rendement de la pile
 - Le rendement mesuré varie entre 51 % à charge partielle (100 W) et 44 % à pleine charge (250 W). Ces valeurs comprennent l'énergie consommée par les auxiliaires.
- Tests d'étanchéité de la pile
 - Contrôle d'absence de fuites d'H₂
- Relevés thermographiques
 - Contrôle du refroidissement et réglage de la meilleure température. Emplacement de la position du capteur de température et contrôle du bon fonctionnement des cellules

Ces tests réalisés, une carte de gestion ainsi que le convertisseur DC/DC ont pu être réalisés. L'automatisation du système est résumée dans le schéma ci-dessous :

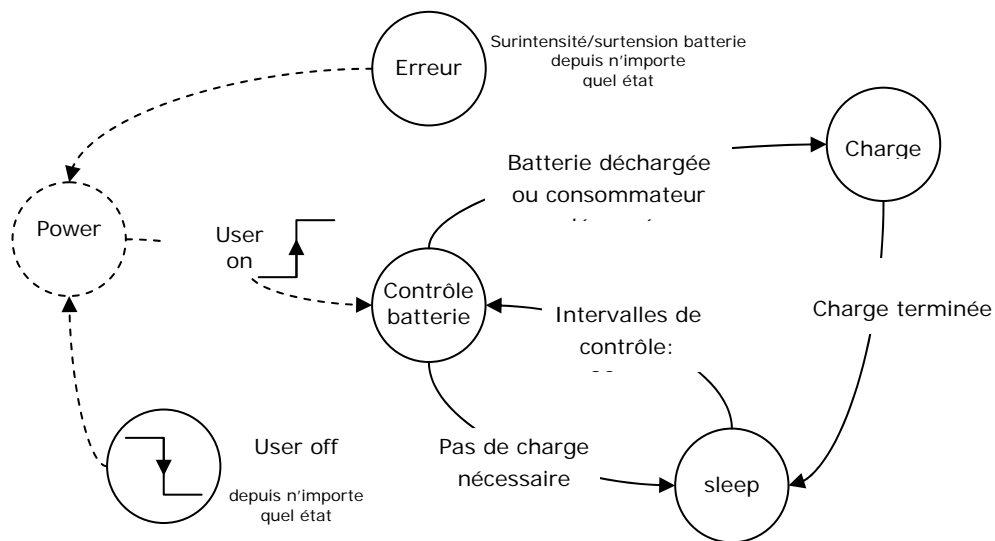


Figure 3 : Principe de fonctionnement du système pile à combustible

Pour l'intégration du système, la carte de gestion est montée en dessus de la carte d'interface et l'ensemble est monté à côté du DC/DC, de manière à être intégrée en prenant le moins de place possible dans le boîtier, lequel est équipé d'aérations devant et derrière la pile pour permettre une circulation d'air correcte (voir fig. 4). Sur le boîtier, le côté hydrogène est séparé du côté électrique pour éviter tout risque dû à une éventuelle étincelle (p.ex. déconnexion en service).

Caractéristiques du système pile à combustible :

- Puissance, tension : 300 W_{max} , 24 V_{DC}
- Poids : 6,3 kg
- Dimensions : 200 x 300 x 150 mm

La mesure du rendement global du système, y compris les auxiliaires, montre une valeur de 40 à 45% dans la plage de fonctionnement. Le calcul est basé sur le PCI de l'Hydrogène.

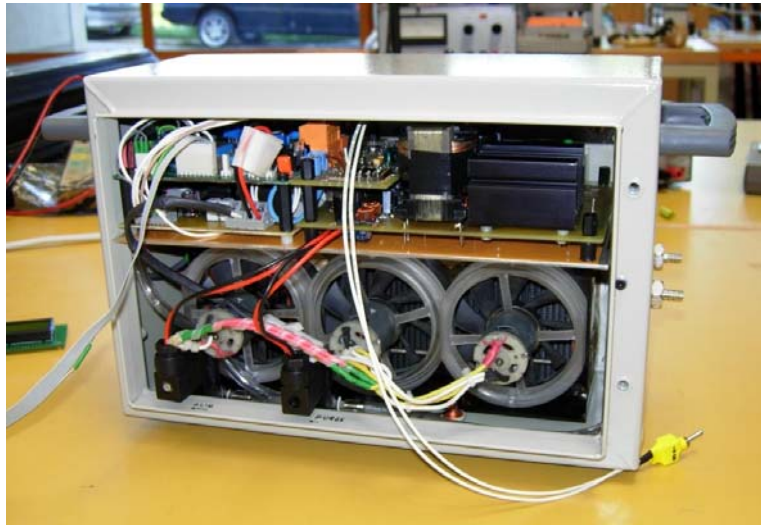


Figure 4 : vue du système pile à combustible

Des tests ont pu être réalisés sur le lac de Neuchâtel sur le bateau « Piccolo », mis à disposition par l'entreprise *MW-Line* (figure 5). Une mesure des performances du bateau avec ce système a été réalisée, ainsi que des tests de cyclabilité.



Figure 5 : bateau Piccolo et motorisation Jonson - MinneKota

Les performances du bateau sont les suivantes (figure 6):

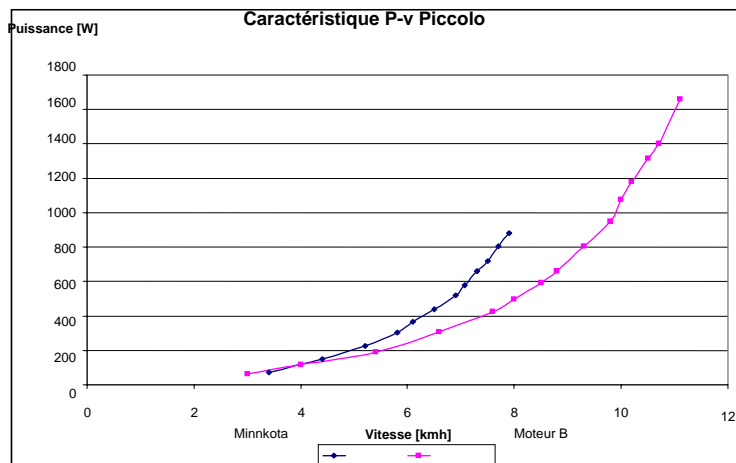


Figure 6 : performance du bateau Piccolo avec le système PACo

Une deuxième mesure a été faite avec la motorisation d'origine du bateau, plus puissante. Ce test montre que les performances du bateau sont meilleures avec sa motorisation d'origine (mieux adaptée à l'embarcation) et, surtout, que le système pile à combustible réalisé est adaptable sans problème à n'importe quelle autre motorisation de tension identique.

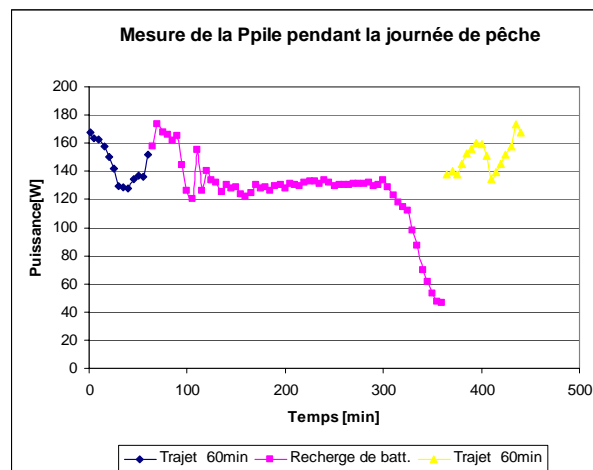


Figure 7 : Puissance fournie par la pile lors d'un cycle de pêche

La figure 7 montre la production de la pile lors d'un cycle de pêche. La partie « recharge de la batterie » correspond à la durée d'arrêt du bateau lors de la pêche.

5. Discussion

Ce prototype fonctionne de manière satisfaisante et à un rendement que l'on peut qualifier de raisonnable pour un système pile à combustible hydrogène-air. Ce rendement, d'environ 45% reste toutefois à inclure dans un rendement global, incluant la fabrication d'hydrogène. Ce point n'est pas dans l'objectif de ce rapport. Notons cependant qu'une technologie renouvelable, par exemple quelque mètres carrés de panneaux solaires photovoltaïques, suffisent pour produire l'hydrogène annuel consommé par un pêcheur de loisir avec ce système.

Côté économique, l'entreprise *MW-Line*, après avoir examiné le système, en conseille un prix de vente entre 1'000.- et 1'500.- sfr. Ce montant se justifie par la capacité de « range extender » du système. En effet, le pêcheur s'équipera tout d'abord de la motorisation électrique (environ 1'000.- sfr / kW) et des batteries. L'avantage du système est que l'autonomie ne dépendra plus seulement des batteries mais cette fois de la quantité d'hydrogène embarquée. Un prix plus élevé pourrait favoriser

l'achat de batteries supplémentaires (ou d'autres types) plutôt que du système pile à combustible. Un tel prix semble réalisable avec une production en série, d'après les partenaires industriels du projet.

Les frais d'exploitation sont essentiellement dépendants du coût de l'hydrogène. Le prix payé lors du projet (env. 50 fr pour 10 litres à 200 bar) n'est pas réaliste pour un calcul ; en effet, la bouteille ne contient que pour quelques francs d'hydrogène, le reste couvrant les frais de manipulations ! Cet élément ne peut être qu'estimé tant qu'un produit « grand public » n'est pas disponible.

Remarquons toutefois que l'absence d'entretien du système, l'absence de bruit et de pollution sont des arguments commerciaux très favorables.

Le marché peut être estimé, en suisse, en examinant les statistiques des bateaux. Sur les 100'000 bateaux sur les lacs suisses, la moitié est à motorisation thermique et l'autre moitié sont des voiliers. Ce produit peut aussi être utilisé sur les voiliers, pour entrer et sortir du port ces bateaux ont souvent une petite motorisation. En comptant une partie des voiliers et les petits bateaux motorisés, le potentiel commercialisable est probablement d'une dizaine de milliers d'unités. Le potentiel est probablement beaucoup plus grand sur les lacs nord américains et canadiens, pour autant qu'une distribution d'hydrogène soit réalisée.

L'absence de disponibilité d'hydrogène dans les ports, ou plus généralement pour le grand public, est en effet la limitation majeure pour la commercialisation de tels systèmes aujourd'hui. Pour une commercialisation, nous recommandons une solution telle que proposée par le projet européen « *Hy-chain* » [11], (figure 8) qui sera commercialisée vraisemblablement l'an prochain. D'autres solutions mériteraient encore d'être explorées, cela sortant du cadre de ce projet.



Figure 8: système « Hychain » pour l'approvisionnement en cartouches H_2

6. Conclusions

Technologie novatrice, permettant une production électrique plus respectueuse de l'environnement, la pile à combustible démontre en termes énergétiques et environnementaux de meilleures performances que les technologies thermiques « classiques ». Elle présente un intérêt certain pour la navigation sur les lacs avec les embarcations de petite et moyenne taille. Pas de pollution de l'eau, ni de l'air, sans odeurs nauséabondes et un faible bruit sont les avantages majeurs.

Avec un tel système, le pêcheur peut laisser les encombrantes et lourdes batteries ainsi que la pile sur l'embarcation, avec une autonomie étendue (selon capacité du réservoir) par rapport aux seules batteries. Le réservoir d'hydrogène est à remplir ou à changer de temps en temps.

Le coût de piles et l'absence de système de distribution en sont les inconvénients principaux aujourd'hui pour une commercialisation des systèmes à piles à combustibles. L'équipement d'une trentaine de ports en suisse avec un système de distribution reste à développer. Tandis que l'aspect coût devient intéressant avec un projet de ce type ; en effet, le dimensionnement pour un cycle de pêche permet de considérer une puissance de pile à combustible d'environ un cinquième de la puissance de

motorisation, avec l'utilisation d'une batterie tampon. Dans ce cas, la puissance de 300 W est suffisante et le coût du système devrait atteindre le seuil commercial d'intérêt (env. 1'000.- à 1'500.- sfr) avec une production de série.

Ce prototype atteint un rendement de 40-45% dans les conditions d'utilisation. Son comportement est adéquat et ne pose pas de problème pour des cycles de pêches, ni avec d'autres motorisations que celles fournies pour le projet. Le constructeur de la pile s'intéresse désormais à la commercialisation du prototype et a établi des contacts dans ce sens. D'autres projets de développement seront envisagés.

Ce projet a fait intervenir la recherche appliquée (deux instituts de la HES-SO), un industriel suisse de la navigation (MW-Line) et deux industriels au niveau international (Horizon FC et Johnson/Minn Kota).

Sans pouvoir prévoir encore aujourd'hui quel sera exactement le succès des piles à combustibles demain, on peut affirmer que si l'accessibilité de cette technologie augmente ces prochaines années, comme la tendance l'indique, le marché pourra facilement s'ouvrir à la navigation. À l'avantage du consommateur d'eau et de l'utilisateur des lacs et des plages...

Remerciements :

L'équipe du projet tient à remercier tous les partenaires pour leur collaboration efficace et leurs contributions « en nature ». Nous remercions aussi particulièrement l'Office fédéral de l'énergie et le réseau de compétences RCSO-TE de la HES-SO pour leurs contributions financières.



Références

- [1] P Favre, D Cicio, JF Affolter, « **Fun boat powered by a fully automatic fuel cell** », European Fuel Cells Forum, Lucerne, 1999.
- [2] JF Affolter, "Swiss **Fuel Cell Passenger and Pleasure Boats**", European Fuel Cells Forum, Lucerne, 2000
- [3] JF Affolter, P. Mariotti, "**Application des PAC aux embarcations; spécificités et réalisations** », congrès Vel Elec, Grenoble juin 2002.
- [4] JF Affolter, P. Mariotti, "**Applications des PAC aux bateaux, réalisations en cours** », journée du réseau national de compétences ACN-CH, Bienne, novembre 2002.
- [5] JF Affolter, « **Piles à combustibles – Perspectives et applications à la navigation** », colloque nouvelles énergies, Le Havre, novembre 03
- [6] Internet : <http://iese.heig-vd.ch/hydroxy> www.fcship.com
- [7] JF Affolter, A. Gianinazzi, Y. Leuppi "**Hydroxy3000, third generation FC boat**", European Fuel Cells Forum, Lucerne, 2004
- [8] JF Affolter, A. Gianinazzi & Y. Leuppi «**Hydroxy3000 ; a third generation FC Boat**. », Poster paper CFDFC, Belfort 04
- [9] JF Affolter, A. Gianinazzi & Y. Leuppi «**Recent FC boats developments in Switzerland**», proc. EVS21, Monaco 2005
- [10] C. Badan, JF Affolter, « **Danger of damages in electric boats due to a lightning stroke**», Poster paper, All electric Ship, Paris 05
- [11] www.hychain.org