



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 du Août 2013

---

# **Projet de démonstration: génération d'hydrogène décentralisé à partir d'acide formique**

---

**Mandant:**

Office fédéral de l'énergie OFEN  
Programme de recherche XY  
CH-3003 Berne  
[www.ofen.admin.ch](http://www.ofen.admin.ch)

**Mandataire:**

Granit Technologies SA  
Les Ducats 40 a  
CH-1350 Orbe  
[info@granit.net](mailto:info@granit.net)

Ecole polytechnique fédérale de Lausanne  
Institut des sciences et ingénierie chimiques  
EPFL SB ISIC LCOM  
BCH 2402 (Batochime)  
CH-1015 Lausanne

**Auteurs:**

A .Mercier, M. Jutz, M. Grasemann (Granit Technologies SA)  
G. Laurenczy (EPFL)

<b>Responsable de domaine de l'OFEN:</b>	S. Oberholzer
<b>Chef du programme de l'OFEN:</b>	S. Oberholzer
<b>Numéro du contrat de l'OFEN:</b>	SI/500567-01

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



Projet OFEN SI/500567

## Rapport final Août 2013

### **Projet de démonstration: génération d'hydrogène décentralisé à partir d'acide formique**

Production et opération d'un nouveau système de génération d'hydrogène décentralisé sur site à partir d'acide formique pour le remplacement de livraison d'hydrogène comprimé sous haute pression en bouteilles. Implémentation du system en combinaison avec une pile à combustion pour alimentation d'un bateau électrique.

A .Mercier, M. Jutz, M. Grasemann : Granit Technologies SA

G. Laurency: EPFL

Orbe, Août 2013

---

## Index

Index .....	2
1 Introduction et objectives.....	2
1.1 Objectives 2012 .....	2
1.2 Planification.....	3
1.3 Concept de fonctionnement du réacteur.....	4
1.4 Schema .....	5
1.5 Concept de contrôle .....	6
1.6 Concept de sécurité du procédé .....	6
2 Pile à combustible.....	7
2.1 Concept de fonctionnement .....	7
2.2 Concept de contrôle et de sécurité .....	7
3 Intégration et fonctionnement sur le bateau .....	8
4 Attestation de sécurité .....	8
5 Travaux effectués & résultats.....	9
6 Conclusions.....	12
7 Résumé et prochaine activités.....	12

## 1 Introduction et objectives

Les lacs sont nos ressources d'eau potable et ils convient de les protéger. D'autre part, les carburants classiques vont se raréfier et il convient de trouver des solutions alternatives à la motorisation dite « thermique ». Un projet de recherche conjoint Granit Technologies SA, EPFL, HES-SO explore et met au point un système de motorisation électrique alimenté au moyen d'une pile à combustible, elle-même alimentée par un réacteur d'acide formique. Pour ce faire, suite à des tests en laboratoires, un test pratique sera réalisé sur le lac de Neuchâtel, en intégrant ce système dans un bateau électrique existant et homologué : « l'Explorer » (figure 1), mis à disposition de la HEIG-VD par M Marc Wust.



**Figure 1: bateau Explorer sur lequel sera intégré provisoirement le système pour tests/démo**

### 1.1 Objectives 2012

Test d'un générateur d'hydrogène à base d'acide formique, alimentant une pile à combustible pour la motorisation d'un bateau électrique :

- 
1. Production décentralisée d'hydrogène d'une qualité suffisante pour alimenter une pile à combustion de 2-3 kW. (procédé « Hy-Form 1 »)
  2. Test à échelle industrielle sur un bateau électrique
  3. Evaluation d'un nouveau système à base d'acide formique pour le stockage et le transport de l'hydrogène
  4. Collectionner les informations et les données scientifiques, techniques et économiques pour évaluer leur faisabilité et définir les prochaines étapes de l'industrialisation du système.

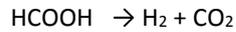
## 1.2 Planification

Le plan de travail à dû être légèrement adapter pour différentes causes. Principalement la séparation des gaz s'est montrée plus exigeante que prévue. Le générateur Hy-Form produit un mélange de gaz H<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> e 50/50. Les essais de la HEIG-VD avec la PAC un montré que un rendement suffisant ne pouvait que être sécurisé sur un temps raisonnable pour un mélange de gaz qui ne contient pas plus de de 10% de CO<sub>2</sub>.

### 1.3 Concept de fonctionnement du réacteur

Le système décrit ci-après est représenté sous forme de schéma, *en annexe à ce document*.

Le générateur d'hydrogène (figure 2) a été dimensionné pour la production de 30L/min (STP) max d'un mélange 50/50 de CO<sub>2</sub> et hydrogène. La technologie est basée sur la décomposition catalytique d'acide formique en phase liquide (aqu.) par la réaction suivante.



L'hydrogène est formé dans une cuve sous pression à un volume de 5L, contenant environ 1.5L de solution 0.22molaire de catalyseur à Rh. L'acide formique est chargé dans ce volume à l'aide d'une pompe à piston de précision. Le produit gazeux sort du réacteur en passant à travers d'un échangeur de chaleur primaire pour préchauffer l'acide formique entrant dans le réacteur, en contre-courant. Dans un deuxième échangeur le gaz est ensuite refroidi à 15-20°C par de l'eau. Le condensat – de l'eau avec des traces d'acide formique et de catalyseur – est séparé et recyclé dans le réacteur. Le gaz sec passe dans un deuxième séparateur de condensat et par la vanne de contrôle du flux massique. Jusqu'à ce point, les pertes de charge sont assez petites pour qu'on puisse assumer que la pression est la même que dans le réacteur.

La valve de contrôle de flux massique est calibrée pour une pression de sortie de 0.5 à 1 bar, une pression d'entrée jusqu'à 6bar et un flux maximum de mélange de 50L/min (STP).

La chaleur nécessaire pour la décomposition d'acide formique, une réaction légèrement endotherme, est fournie par un élément chauffant électrique en géométrie de feuille rectangulaire. Pour les expériences au laboratoire le système est alimenté avec du 230VAC du réseau, la possibilité d'utiliser une source de courant continu de plus basse tension (min 48VDC) existe pour l'application sur le bateau.

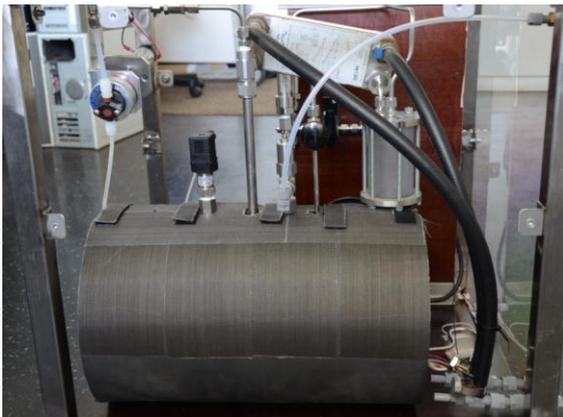


Figure 2 : système de réacteur à acide formique

## 1.4 Schema

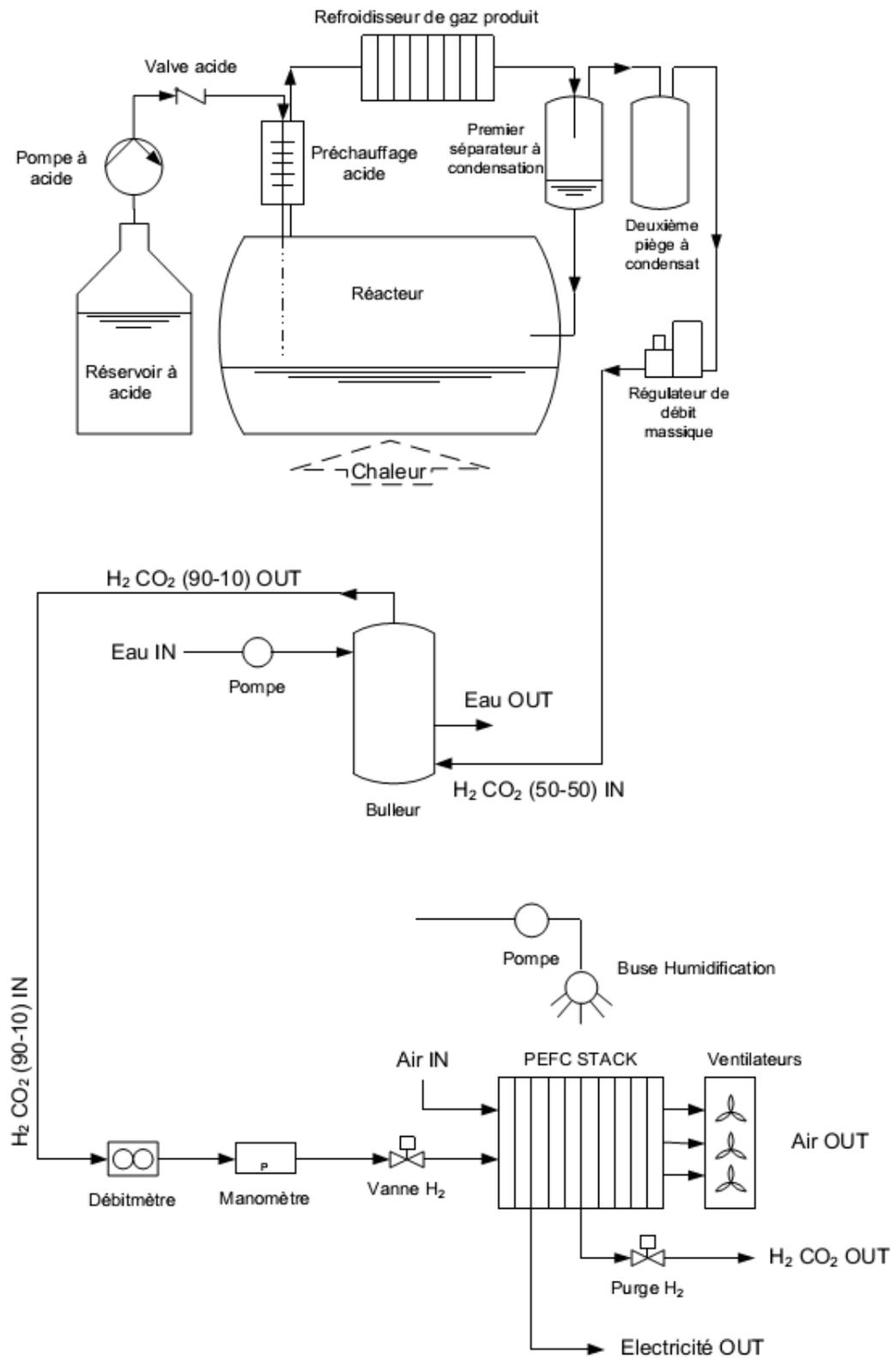


Figure 2 : Schéma générateur Hydrogène, système de lavage des gaz et pile a combustible

---

## 1.5 Concept de contrôle

Deux paramètres du procédé sont contrôlés par deux circuits de réglage indépendants: la pression dans le réacteur et le flux de produit gazeux sortant du réacteur:

Le flux de produit gazeux est contrôlé par un contrôleur de débit massique positionné à la sortie du deuxième séparateur de condensat. Vu que la production de gaz est la fonction principale du procédé, les paramètres de contrôle de ce circuit sont optimisés pour une réponse dynamique et rapide aux changements de consigne ou de la pression d'alimentation/réaction. On peut choisir entre deux paramètres comme variable de contrôle: Soit le flux de mélange de gaz produit, soit sa pression à la sortie de la vanne de contrôle. Vu que la pile à combustible a besoin d'une certaine pression d'entrée, ce deuxième principe sera utilisé sur le bateau.

La pression de réaction est maintenue par le flux d'acide formique entrant dans la cuve, défini par la vitesse de la pompe. Le volume vide du réacteur (env. 3.5L) est utilisé comme tampon pour amortir des changements dans la consigne du flux de produit gazeux. Les paramètres de contrôle de ce circuit sont optimisés pour une réponse lente, avec des fluctuations de la pression de  $\pm 0.5$ bar autour de la consigne.

## 1.6 Concept de sécurité du procédé

L'analyse de sécurité du procédé a révélé quatre états du procédé qui pourraient avoir comme résultat des dégâts de l'équipement, des fuites d'acide ou de produits gazeux:

- Une pression dans le réacteur en dessus de la pression nominale du système est l'état opérationnel le plus critique de l'installation, car il peut engendrer une perte d'intégrité structurelle du réacteur ou d'autres armatures avec, comme conséquence, des fuites majeures de liquide corrosif ou de gaz combustible/explosif.
- Une température dépassant la valeur nominale (120°C) baisse la pression admissible dans le réacteur, vu que la tension maximale dans l'acier inox diminue. Par contre, vu que la réaction est endotherme, la réponse du système aux changements de puissance de chauffage est très rapide et des valeurs critiques de température peuvent, en conséquence, être effectivement évitées.
- A basse température, la cinétique de la réaction se ralentit et de l'acide formique peut s'accumuler dans le réacteur. En raison de la forte dépendance de l'activité du catalyseur du pH de la solution, ce procédé est auto-accélerant et non-linéaire jusqu'à l'extinction totale de la réaction.
- La corrosion des surfaces en contact avec l'acide formique (concentré et dilué) peut abaisser la pression maximale admissible dans le réacteur et mettre en danger l'intégrité structurelle de tous les composants.

Basé sur ces analyses, plusieurs mesures préventives ont été intégrées dans le design du procédé:

### Surpressions:

- Le réacteur et tous les composants sous pression ont été choisis pour une pression de service maximale de 12bar ou plus à 120°C. Cela signifie un facteur de sécurité de 2.
- Une valve de sécurité avec une pression d'ouverture de 8bar est installée directement sur le réacteur. En cas d'ouverture le gaz est évacué vers l'extérieur.
- La mesure de pression est réalisée avec deux senseurs indépendants (redondance).
- En cas d'une pression en dessus de 7bar l'alimentation d'acide formique est arrêtée automatiquement par le logiciel de contrôle.
- Le réacteur est chargé avec un excès de catalyseur. C'est une mesure efficace pour prévenir une agglomération d'acide formique dans le réacteur et des instabilités de production de gaz et de pression.

### Surtempérature

- La température du réacteur est mesurée avec une double redondance de senseurs: Un senseur utilisé pour le contrôle de température de réaction est placé à l'intérieur du réacteur. Deux senseurs supplémentaires sont situés sur la surface extérieure du réacteur, pour vérifier la mesure primaire et à la surface extérieure de l'élément chauffante, ceci pour éviter une surchauffe de l'élément en réglant l'alimentation de manière adéquate.

### Basse température

- Pour éviter une désactivation du catalyseur et une agglomération d'acide formique, l'alimentation d'acide formique est automatiquement arrêtée à des températures en dessous de 90°C

- Le générateur est chargé avec un large excès de catalyseur comparé à la masse nécessaire pour la production d'hydrogène nominale. Même à basse température (<90°C) cette quantité est capable d'atteindre la production d'hydrogène visé sans accumulation d'acide formique

#### **Corrosion**

- Tous les composants en contact avec de l'acide liquide ou du gaz humide sont réalisés en matières anticorrosives: de l'acier inox (1.4404 et 1.4435), du silicone, du polycarbonate, du PVC et du PTFE. L'EPDM est utilisé comme matière principale pour les joints.

En cas de défaillance de ces mesures préventives, le design contient plusieurs mesures d'identification et de récupération de fuites, soit liquides, soit de gaz:

- Un bac de rétention en PVC est en place pour recueillir des fuites liquides
- Tout le système est installé dans un cadre en profils inox, fermé avec des plaques en polycarbonate. Un système de ventilation assure une concentration d'hydrogène en dessous des limites d'explosion même en cas de fuites importantes.
- Un capteur de haute sensibilité est placé à l'entrée des ventilateurs. En cas de détection de traces d'hydrogène (>0.5vol%) la production est arrêtée automatiquement par le logiciel de contrôle.
- Une valve de retenue installée entre la pompe et le premier échangeur de chaleur "préchauffe acide" évite une libération d'hydrogène en cas de fuite dans le système de pompage.

## **2 Pile à combustible**

### **2.1 Concept de fonctionnement**

La pile à combustible de type PEM utilisée pour ce projet a une puissance électrique nominale de 2 kW. Elle est alimentée en mélange 90% H<sub>2</sub> – 10% CO<sub>2</sub>. Ce mélange provient du générateur d'hydrogène à base d'acide formique (mélange 50% H<sub>2</sub> – 50% CO<sub>2</sub>) puis du lavage via le bulleur. Les trois ventilateurs montés sur la pile se chargent d'aspirer l'Oxygène nécessaire ainsi que de refroidir le cœur de la pile (stack). Le fonctionnement de la pile est entièrement automatisé.

### **2.2 Concept de contrôle et de sécurité**

L'automatisation de la pile permet de gérer la purge du circuit carburant, la vanne d'entrée de l'hydrogène, la pompe pour l'humidification des cellules ainsi que les ventilateurs (apport d'air et refroidissement de la pile). Si un quelconque problème survient lors du fonctionnement de la pile (pression d'hydrogène trop faible ou trop élevée, température du stack trop élevée, tension des cellules trop faible, ...), la vanne principale d'alimentation de H<sub>2</sub> se ferme automatiquement et la pile s'arrête immédiatement.

Le rejet de H<sub>2</sub> dans l'atmosphère via la purge est mineur car la majeure partie de ce gaz est convertie en électricité par la pile. Cette faible quantité de gaz qui se dissipe librement dans l'atmosphère ne représente pas de danger, la propriété de diffusion de l'hydrogène assure une dilution rapide dans un environnement non confiné et ventilé naturellement, le système étant installé à l'air libre sur le bateau.



**Figure 3 : Pile à combustible 2 kW fournissant l'énergie électrique à la motorisation**

---

### 3 Intégration et fonctionnement sur le bateau

La pile à combustible fonctionne en parallèle avec des batteries 48V de bord. La puissance nécessaire pour les moteurs du bateau peut être tirée des deux sources d'énergie en même temps, ou d'une seule selon leur disponibilité. Les batteries ont surtout un rôle de stockage, disponible en cas de problème avec la pile à combustible ou en cas de besoin temporaire supérieur à la pile, par exemple pour une manœuvre.

Une batterie séparée 24V assure les fonctionnalités de sécurité et auxiliaires du bateau.

Tout le système de réacteur et de pile est disposé dans des cadres ventilés disposés à l'air libre sur le pont du bateau. Il n'y a donc aucun confinement des gaz, ni de possibilité de migration des gaz dans les parties creuses de l'embarcation.

Les systèmes électriques sont protégés avec les systèmes de sécurité habituels (disjoncteurs, fusibles). Le système de réacteur/pile à combustible est un prototype destiné à tester et démontrer la faisabilité d'un tel concept pour la navigation. L'utilisation du système est de quelques semaines, le temps de réaliser les tests. Toutes les précautions sont prises pour que ceux-ci se déroulent dans les meilleures conditions. Si toutefois le système devait s'arrêter, l'autonomie des batteries du bateau permettra le retour de l'embarcation dans un port à proximité.

### 4 Attestation de sécurité

L'installation testée sur le bateau correspond au descriptif ci-dessus ne présente aucun danger pour l'environnement ni pour les personnes, dans son usage tel que prévu.

- 5 Les soussignés confirment que toutes les précautions ont été prises pour assurer un fonctionnement sûr du prototype.

Lausanne et Yverdon, le 22 août 2012 :



EPFL : Prof. G. Laurency



HEIG-VD : Prof. J.-F. Affolter

---

## 5 Travaux effectués & résultats

Les travaux effectués avaient comme but de combiner les deux composants – le générateur hydrogène et la pile combustible PEM – et de les préparer aux exigences de leur opération sous les conditions spécifiques d'un bateau ouvert.

### 1. Adaptations constructives

Plusieurs mesures constructives étaient prises initialement au niveau de fonctionnement et de sécurité de procédé:

- L'installation d'un deuxième capteur de pression du générateur d'hydrogène comme redondance en cas de panne d'équipement
- Installation des
- Installation d'une ventilation de l'enveloppe du générateur avec détecteur hydrogène
- Remplacement des connexions et tubes plastique par des composants en acier inox

### 2. Optimisation énergétique

Plusieurs mesures étaient pris pour minimiser la consommation électrique de l'installation et les pertes de chaleur du générateur d'hydrogène:

- Un contrôle variable de la puissance des ventilateurs de refroidissement utilisés dans la pile a combustible était introduit au système de control.
- L'isolation du générateur était doublé a 50mm d'épaisseur autour des éléments chauffants électriques.

### 3. Etude de la performance de la pile a combustible PEM avec de l'hydrogène dilué avec du CO2

- Tests de performance initiale

La performance de la pile a combustible de 2kWel (puissance nominale) a été évalué avec différents qualités d'hydrogène. Les expériences avaient comme but l'évaluation des effets de la dilution d'hydrogène a la surface du catalyseur dans la pile sur ses caractéristiques de puissance. Entre les différents tests la pile a été régénérée en utilisant de l'hydrogène pur.

Hydrogène pur: Pour une alimentation de l'hydrogène pur, la pile produisait une puissance électrique de 1700W

50vol% hydrogène dans CO2: La dilution de l'hydrogène avec 50vol% de CO2 avait comme résultat une baisse importante de la puissance électrique a 372W max – un niveau qui peut pas s'expliquer avec la baisse de concentration seulement. De plus, la fonctionnement de la pile sous ces conditions était limité a env. une heure d'opération avant la désactivation complète.

50vol% hydrogène dans CO2 avec humidification: Saturer l'air de refroidissement (le coté O<sub>2</sub>) avec de l'eau à comme résultat une augmentation de la puissance initiale a 510W. Par contre, le temps d'opération est diminué radicalement a 2min

80vol% hydrogène dans CO2: Augmenter la fraction d'hydrogène dans le gaz d'alimentation augmente aussi la puissance maximale fourni par la pile. Avec 80vol% d'hydrogène la puissance maximale est de 1033W

80vol% hydrogène dans CO2 avec humidification: La réponse de la pile a une humidification du coté O<sub>2</sub> a cet qualité d'hydrogène est complètement contraire au comportement avec une mélange 50/50. Elle en fait stabilise ou régénère la puissance produit par la pile.

90vol% et 95vol% hydrogène dans CO2 avec humidification: Augmenter la qualité d'hydrogène progressivement fait augmenter la puissance maximale produit par la pile. Par contre, une humidification constante de gaz reste nécessaire pour la stabiliser au niveau initiale. Ce niveau était cependant déjà influencé par la dégradation générale de la pile

Tous les résultats des expériences ci-dessus sont récapitulés dans Tableau 1

**Tableau 1: Performance de la pile pour différents qualités d'hydrogène**

Feed quality	Pure H <sub>2</sub>	50vol% H <sub>2</sub> in CO <sub>2</sub>		80vol% H <sub>2</sub> in CO <sub>2</sub>		90vol% H <sub>2</sub> <sup>‡</sup>	95vol% H <sub>2</sub> <sup>‡</sup>
		dry	wet	dry	wet	wet	wet
P <sub>el,max</sub> , W	1700	372	510	1033	1200	1090	1140
Time to deactivation	—	1h	2min	1h20min	stable*	stable*	stable*

\* régénération complète après humidification  
 ‡ mesures avec pile dégradé

- Dégradation de la performance

Les tests de performance avec des fractions volumétriques de CO<sub>2</sub> importantes avaient comme résultat une détérioration irréversible de la performance de la pile, aussi pendant des cycles de régénération avec de l'hydrogène pur.

Des mesures détaillées des flux de gaz consommés par la pile ont montré des pertes de gaz importantes à travers les membranes d'échange des protons dans la pile: Des tests sans charge électrique montraient un flux de 12SLPM d'hydrogène – ce qui constitue 80% du flux maximum produit par le générateur d'hydrogène. Ces fuites étaient attribuées à des parties de membrane d'échange proton détruites et perforées dans la partie basse du stack. Comme conséquence, une concentration d'hydrogène élevée dans l'air de refroidissement était mesurée, compromettant la sécurité du procédé. Bien que l'origine de ces fuites n'ait pas pu être expliquée en détail, il semble probable qu'un appauvrissement en H<sub>2</sub> dans les éléments de la pile les plus loin de l'entrée/la sortie transformait ces éléments en résistances électriques. Le réchauffement résultant aurait endommagé les membranes jusqu'à leur destruction. Cette explication est confortée par des images IR, prises de la pile pendant son opération avec de l'hydrogène pur. Ils démontrent une température élevée des régions endommagées de la pile. (Annexe Z)

En bloquant les parties du stack endommagées, il était possible de réduire les fuites à 4-5SLPM – un niveau qui permettait d'utiliser la pile pour les tests d'accouplement au générateur d'hydrogène, malgré la baisse substantielle en efficacité globale.

#### 4. Traitement/purification de gaz

Le fonctionnement réduit et problématique de la pile avec le mélange de gaz fourni par le générateur, nécessitait la purification d'hydrogène à une qualité en dessus de 95%.

Deux technologies différentes étaient testées pour leur efficacité de absorber le CO<sub>2</sub>.

Une colonne à bulles avec 5 étages était construite pour contacter le mélange de gaz avec de l'eau en contre-courant. Toutefois, il s'avérait que le contact interphasique était insuffisant pour baisser le contenu en CO<sub>2</sub> aux niveaux nécessaires pour une opération stable de la pile. Au lieu d'une absorption continue, la purification d'hydrogène était réalisée en introduisant un absorbeur de CO<sub>2</sub> entre le générateur d'hydrogène et la pile, utilisant du Chemisorb S, (BETE, Belgique) comme absorbant solide. Les absorbeurs étaient fabriqués d'une tube en PVC avec une capacité de 15l env. Basé sur des tests à petite échelle, ce volume était suffisant pour une opération du système indépendante de 2h à puissance maximale.

A cause d'une production de chaleur importante dans le lit d'absorbant et comme conséquence des températures de gaz élevées, les absorbeurs étaient refroidis à l'eau.

Avec ce système de purification à la base d'absorbants solides des puretés d'hydrogène en dessus de 99.5mol% étaient mesurées à l'entrée de la pile – assez pour une opération stable et efficace de la pile.

---

## 5. Mise au point et essais du système complète

Malgré la perte constante de performance de la pile, celle-ci a été accouplée au générateur d'hydrogène, en combinaison avec l'absorbeur CO<sub>2</sub>. Des premiers tests de cette installation complète ont révélé le besoin pour plusieurs modifications/adaptations supplémentaires du système de contrôle du procédé intégral:

Le concept de contrôle du générateur était adapté aux besoins de la pile d'une pression constante à l'entrée de gaz. À cet effet un capteur de pression était ajouté à la sortie du générateur d'hydrogène, son signal était introduit comme valeur réelle dans le régulateur PID du flux de gaz. Aussi, un module était ajouté aux contrôles du générateur qui lui permet de réagir rapidement à des changements importants et instantanés de la consommation d'hydrogène dans la pile.

Le concept de contrôle de la pile a été adapté aux caractéristiques du générateur en changeant le mode de démarrage.

Des tests avec l'installation aux contrôles adaptés ont montré une production stable d'électricité à la base d'acide formique. Le système se comporte bien au démarrage aussi bien que pendant l'opération stable ou des changements instantané de puissance.

## 6. Intégration et tests de fonctionnement sur le bateau

La pile endommagée en combinaison avec le générateur d'hydrogène et le système de purification était installé sur le bateau afin de procéder à différents tests d'intégration. Comme le générateur consomme, d'après les essais effectués en laboratoire, plus que la production de la pile défectueuse, les tests apportaient les preuves du fonctionnement qualitatives plutôt que quantitatives.

La pile à combustible fonctionne en parallèle avec deux batteries 48V de bord. La puissance nécessaire pour les moteurs du bateau peut être tirée des deux sources d'énergie en même temps, ou d'une seule selon leur disponibilité. Les deux batteries ont surtout un rôle de stockage, disponible en cas de problème avec la pile à combustible ou en cas de besoin temporaire supérieur à la pile, par exemple pour une manœuvre.

Une batterie séparée 24V assure les fonctionnalités de sécurité et auxiliaires du bateau.

Tout le système (le réacteur, la pile et les absorbeurs) est disposé dans des cadres ventilés disposés à l'air libre sur le pont du bateau. Il n'y a donc aucun confinement des gaz, ni de possibilité de migration des gaz dans les parties creuses de l'embarcation.

Le fonctionnement du système de refroidissement (pompe & tubes) du réacteur et du système de purification d'hydrogène était vérifié.

Afin de pouvoir tester les fonctionnalités de la pile, sa gestion électronique et son intégration sur le bateau il a été décidé d'effectuer les premiers tests sur le bateau à l'aide d'une bombonne d'hydrogène pur. Cela nous a permis de tester la recharge des batteries par pile à combustible:

### **Caractéristiques de la pile « en fonctionnement de charge des batteries »**

Tension : 24.2V

Courant : 24A

Puissance : 580W

Consommation : 10-11/min

Rendement de la pile : 29%

### **Charge des batteries:**

Batterie de gauche :

Tension : 51.9V

Courant : 3.3A

Puissance : 171.27W

Batterie de droite :

Tension : 52.2V

Courant : 4.8A

Puissance : 250.56W

Puissance totale fournie pour la charge des batteries : 421.83W

Consommation de l'électronique de la pile : ~100W

Il est possible de constater que la pile fonctionne et charge correctement les batteries, par contre, suite à l'état dégradé de celle-ci, la puissance maximale fournie ne dépasse pas les 580W. De plus, les 4SLPM d'hydrogène perdu aux fuites de la pile limitent l'efficacité à une basse 29%. De ce fait et afin de ne pas vider les batteries, le générateur d'hydrogène qui consomme déjà 600W pour son fonctionnement ne va pas être branché pour l'instant. Par contre avec ces 580W fournie par la pile (sans compter la puissance utilisée pour le chauffage du réacteur), le bateau pourrait avancer à une vitesse d'environ 5 km/h.



Figure 4. Installation du système combiné sur le bateau à Grandson en Sept. 2013

## 6 Conclusions

Les parties du projet qu'étaient finis jusqu'à présent démontrent que la production d'hydrogène à la base d'acide formique et son utilisation dans une pile à combustible est tout à fait faisable. Les particularités du procédé étaient considérées et intégrées dans les modifications du concept de contrôle et engineering détaillé des composants.

Il est bien clair qu'un chauffage électrique du réacteur, comme celle utilisée dans le générateur d'hydrogène ne constitue pas de solution efficace, même en combinaison avec une pile en état de marche complète. Avec 30% de l'hydrogène perdu dans la pile, la puissance délivrée par la pile ne suffit pas à l'alimentation électrique du générateur. Il n'est donc pas possible, si le générateur fonctionne, de recharger les batteries, ni de faire avancer le bateau. Ceci nous indique que l'efficacité du système est insuffisante.

Par contre, le système, équipé avec une nouvelle pile en état fonctionnelle pourrait être utilisée - comme prévu - pour démontrer la fonctionnalité d'un tel système sous des conditions réelles dans une application mobile.

## 7 Résumé et prochaine activités

Fin Septembre 2012 nous avons dû constater que avec la pile à combustible que nous avons travaillé il n'était plus possible de continuer à travailler, les pertes en hydrogène étant trop importantes (voir description ci-dessus). Comme la date de livraison de la nouvelle pile sera début 2013 nous avons dû renoncer aux essais du bateau sur l'eau.

Ce programme va néanmoins être poursuivi en mars et avril 2013. A ce jour même si nous n'avons pas encore plus complété les tests sur l'eau, les buts principaux de ce projet ont pu être atteints.

Les paramètres clés pour poursuivre le développement ont pu être collectés et confirmés. Le rendement du système global montre aussi que une application du générateur d'hydrogène en combinaison avec une pile à combustible est probablement pas la plus intéressante vu le rendement assez réduit d'une pile PEM (max. 50%). Indépendamment de ce fait (connue depuis longtemps) la mise en œuvre d'une unité semi industrielle a aussi clairement montré que au niveau du générateur il y avait encore des potentiels d'optimisation. Entre autres ceux-ci se trouvent au niveau du système de chauffage d'un système de catalyse hétérogène et du design du générateur lui-même.

Comme les ressources financières du projet arrivent à leur fin (voir rapport financier ci-dessous) la suite des activités dépendra aussi de possibilités de trouver le financement nécessaire autant du côté public que privé.