



Eidgenössische Technische Hochschule Zürich  
Swiss Federal Institute of Technology Zurich



# PAC-Car I

véhicule ultra efficient à pile à combustible

## Compte Rendu de Projet

GP 08.07.2003

### Contacts :

#### **Prof Lino Guzzella**

Institut für Mess- und Regeltechnik  
ETH Zentrum, ML K 32.1  
Sonneggstrasse 3  
CH-8092 Zürich  
phone +41-1-632-5448  
fax +41-1-632-1139  
E-mail: [guzzella@imrt.mavt.ethz.ch](mailto:guzzella@imrt.mavt.ethz.ch)

#### **Dr Gino Paganelli**

Institut für Mess- und Regeltechnik  
ETH Zentrum, ML K 40.1  
Sonneggstrasse 3  
CH-8092 Zürich  
phone +41-1-632-5131  
fax +41-1-632-1139  
E-mail: [paganelli@imrt.mavt.ethz.ch](mailto:paganelli@imrt.mavt.ethz.ch)

#### **Dr Jean-Jacques Santin**

UVHC - Campus du Mont Houy -  
Bâtiment ISTV2  
59313 Valenciennes cedex 9 - France  
phone +33 3 27 51 18 19  
fax +33 3 27 51 18 29  
E-mail: [jean-jacques.santin@univ-valenciennes.fr](mailto:jean-jacques.santin@univ-valenciennes.fr)

## Introduction

PAC-Car est le premier véhicule à **pile à combustible** ayant participé avec succès au Shell Eco-marathon. Alimentée par de l'hydrogène, la pile à combustible fournit l'électricité nécessaire à sa propulsion et ne produit aucun gaz polluant.

Ce dossier présente le principe de fonctionnement du véhicule ainsi que l'organisation et les résultats du projet. L'innovation ne se limite pas à l'implantation d'une pile à combustible dans un véhicule Shell Eco-marathon, les solutions retenues forment un ensemble cohérent n'ayant jamais fait l'objet d'une implantation dans un véhicule<sup>1</sup>. La plupart des composants font encore partie du domaine de la recherche et ont été réalisés sur mesure.

## L'innovation

### *L'utilisation d'une pile à combustible*

PAC-Car n'est pas un véhicule électrique ! Certes, PAC-Car est propulsé par un moteur électrique, mais l'unique source d'énergie utilisée pour sa propulsion est un combustible : **l'hydrogène**.

L'hydrogène est converti directement en énergie électrique au moyen d'une pile à combustible, sans combustion. L'énergie électrique produite par la pile est utilisée pour alimenter le moteur électrique de traction de PAC-Car.

Le principe de la chaîne de traction de PAC-Car est représenté dans Figure 1. Elle comprend :

- Un réservoir d'hydrogène (carburant) [1]
- Une pile à combustible [2]
- Un convertisseur de traction (électronique de puissance) [3]
- Un moteur électrique de traction [4]

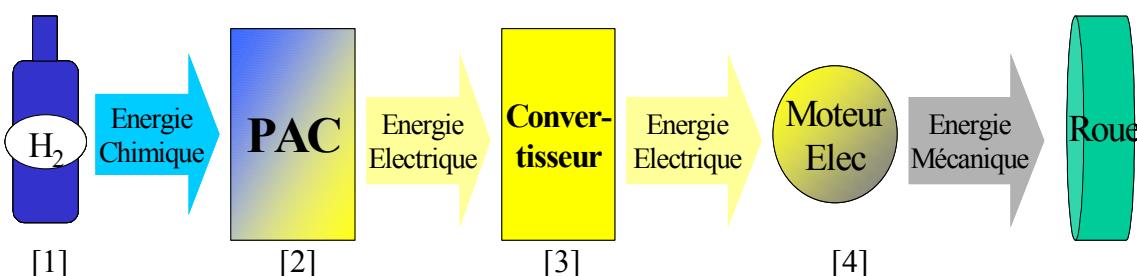


Figure 1 : chaîne de traction de PAC-Car.

## *La pile*

<sup>1</sup> Cette pile a d'abord été conçue pour PowerPac ([www.powerpac.ch](http://www.powerpac.ch)) qui a reçu le Swiss Technology Award 2003. PowerPac est un générateur électrique portable de 1 kW fonctionnant à l'hydrogène. La même technologie a été reconduite pour PAC-Car.

La pile à combustible mise en œuvre dans PAC-Car est appelée pile à membrane échangeuse de protons (PEMFC : Proton Exchange Membrane Full Cell). Son principal avantage est de fonctionner à température ambiante (70°C maximum), d'où l'absence de période de préchauffage.

La cellule d'une PEMFC est constituée (Figure 2) d'une membrane polymère prise entre deux électrodes, le tout étant intégré entre deux plaques bipolaires.

- La membrane, épaisse de quelques dizaines de microns, joue le rôle d'un électrolyte solide et permet aux protons de passer de l'anode vers la cathode.
- Les électrodes sont réalisées par dépôt, de part et d'autre de la membrane, de particules de différents matériaux comme le carbone (conducteur) et le platine (catalyseur).
- Les plaques bipolaires assurent la distribution des gaz, la collecte des électrons et l'évacuation des produits formés (eau à la cathode).

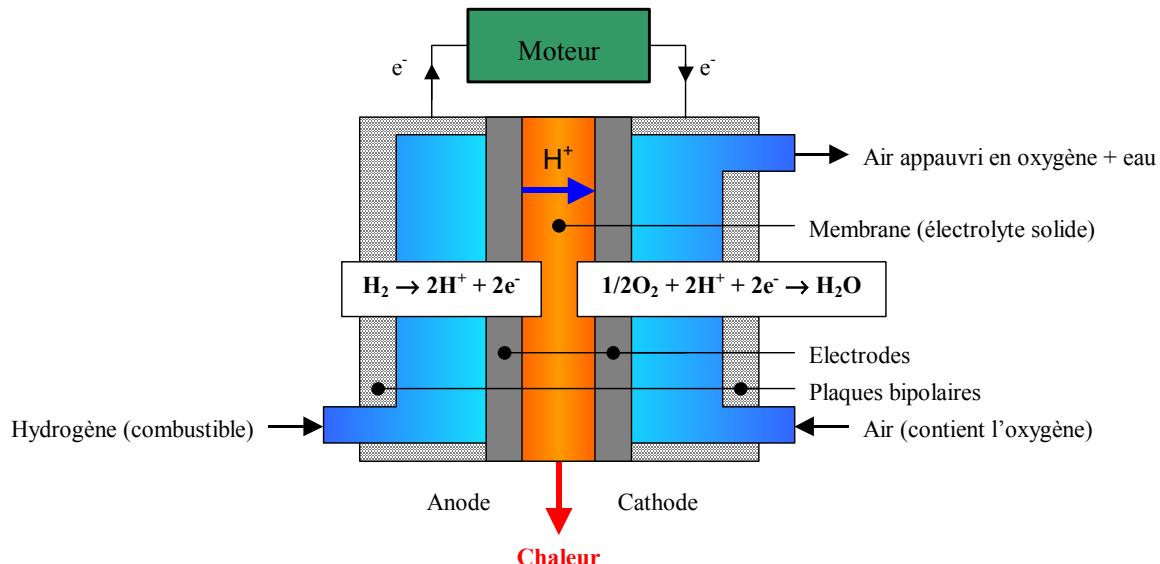


Figure 2 : schéma de principe d'une cellule de PEMFC.

L'un des principaux inconvénients de la PEMFC est la nécessité d'hydrater en permanence la membrane, sous peine d'une baisse de rendement ou de la voir se déchirer. Il est donc nécessaire de contrôler très précisément l'hygrométrie des gaz employés, ce qui représente une opération délicate et coûteuse en énergie.

#### • La PEMFC de PAC-Car

La grande innovation apportée par l'Institut Paul Sherrer (PSI) et l'Ecole polytechnique de Zürich (ETH) consiste à utiliser des plaques de graphite pur (Figure 3) conçues pour collecter l'eau produite par la réaction et assurer une auto humidification de la membrane en permanence.

La tension moyenne d'une cellule étant voisine de 0,7V, plusieurs cellules sont montées en série pour former un « stack » entre deux plaques terminales. La pile à combustible de PAC-Car est constituée de 20 cellules délivrant une tension sous charge de l'ordre de 14V (Figure 4).

Les principales caractéristiques de la pile sont résumées dans le Tableau 1.



Figure 3 : photo d'une plaque bipolaire développée par PSI et ETH.

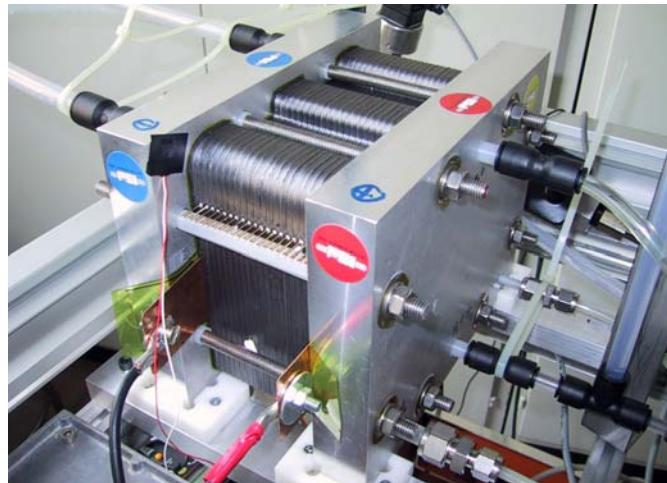


Figure 4 : la pile à combustible de PAC-Car.

Conception	PSI/ETH
Type	PEM
Nombre de cellules	20
Surface active par cellule (cm <sup>2</sup> )	120
Puissance maximale (W)	900
Tension nominale (V)	18
Pression maximale d'utilisation (bar)	2
Pression normale d'utilisation (bar)	1,5
Humidification	Interne
Température de fonctionnement (°C)	2 à 70
Dimensions l x L x h (mm)	180 x 200 x 160
Poids (kg)	5

Tableau 1 : caractéristiques de la pile à combustible de PAC-Car.

## Le réservoir d'hydrogène

La technologie retenue pour le stockage de l'hydrogène est celle des « hydrures métalliques <sup>a</sup> ». Dans un tel réservoir, l'hydrogène n'est pas stocké sous la forme d'un gaz sous pression mais sous forme solide. L'hydrogène est chimiquement combiné (adsorbé) à des particules solides appelées hydrures métalliques. Ce procédé, qui est une des voies les plus prometteuses pour le stockage de l'hydrogène, a été retenu car il élimine tout risque de fuite d'hydrogène importante, ceci pour les raisons suivantes :

- la pression interne est très faible : inférieure à 3 bars en utilisation normale, elle peut atteindre 30 bars dans des cas extrêmes, alors que le stockage sous forme gazeuse nécessite des pressions comprises entre 250 et 700 bars ;
- la libération d'hydrogène est endothermique, ce qui se traduit par une diminution de la température du réservoir lors de son utilisation. Or, cette baisse de température inhibe la libération de l'hydrogène des particules d'hydrures métalliques. Cette propriété constitue une auto-limitation naturelle du débit d'hydrogène ;
- la libération de l'hydrogène emprisonné dans les hydrures métalliques est un processus naturellement très lent. Même lorsqu'il est soumis à une source de chaleur qui compense la chute de température, la libération de tout l'hydrogène contenu dans le réservoir nécessite au moins une heure. Toute fuite accidentelle importante est donc tout simplement impossible, même en cas de rupture du réservoir.

Le réservoir employé est fabriqué spécialement par la société HERA, leader reconnu dans cette technologie (Shell Hydrogen en est l'un des trois partenaires fondateurs). Ses caractéristiques sont fournies dans le Tableau 2.



Figure 5 : le réservoir à hydrures métalliques développé par HERA.

Marque et référence	HERA SL 015C
Capacité de stockage en hydrogène (g)	14,4
Type d'Hydrures métalliques	Hydralloy C5
Pression maximale absolue (bar)	30
Pression normale d'utilisation (bar)	2 à 10
Température d'utilisation (°C)	15 à 40
Dimensions Ø x L (mm)	66 x 300
Poids (g)	1500

Tableau 2 : caractéristiques du réservoir d'hydrogène.

## **Les composants du système pile à combustible**

La pile seule ne peut pas fonctionner. Elle est accompagnée d'accessoires destinés à réguler sa température et son alimentation en hydrogène et en air.

La Figure 6 est une photo du système pile à combustible de PAC-Car au banc d'essai. Des tests ont été réalisés pour analyser son comportement dans les conditions réelles de la course (charge simulée correspondant au circuit de Nogaro).

La Figure 7 donne une vue d'ensemble du système pile à combustible, on peut y distinguer les circuits d'hydrogène, d'air et d'eau de refroidissement.

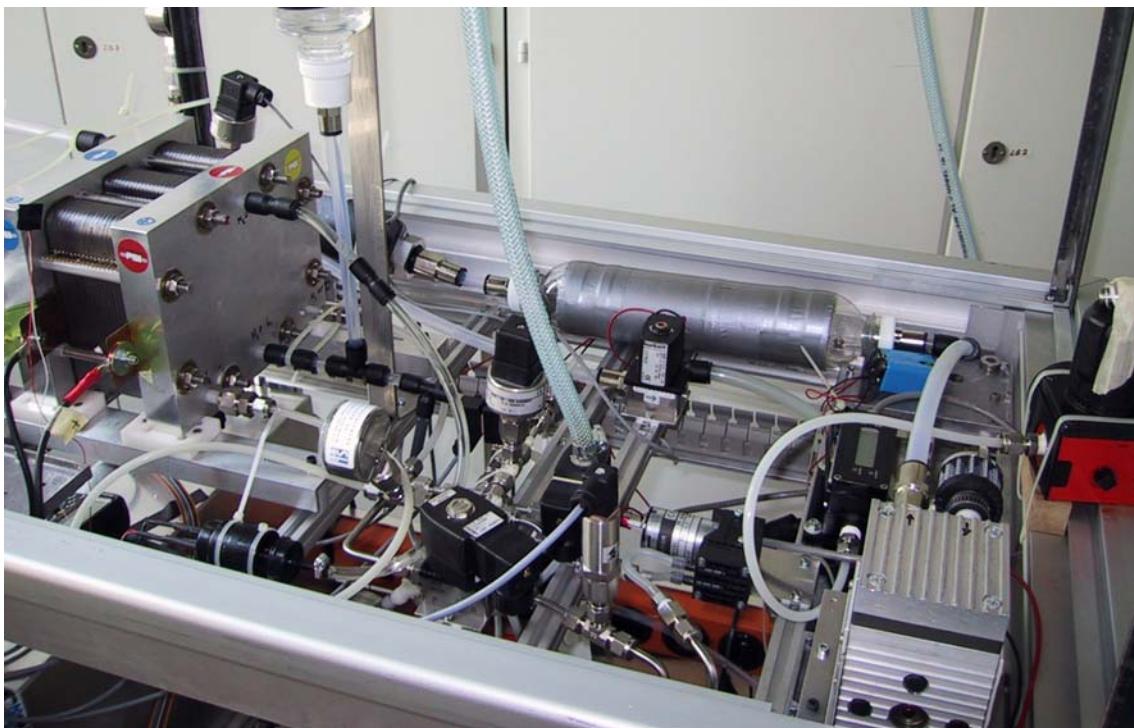
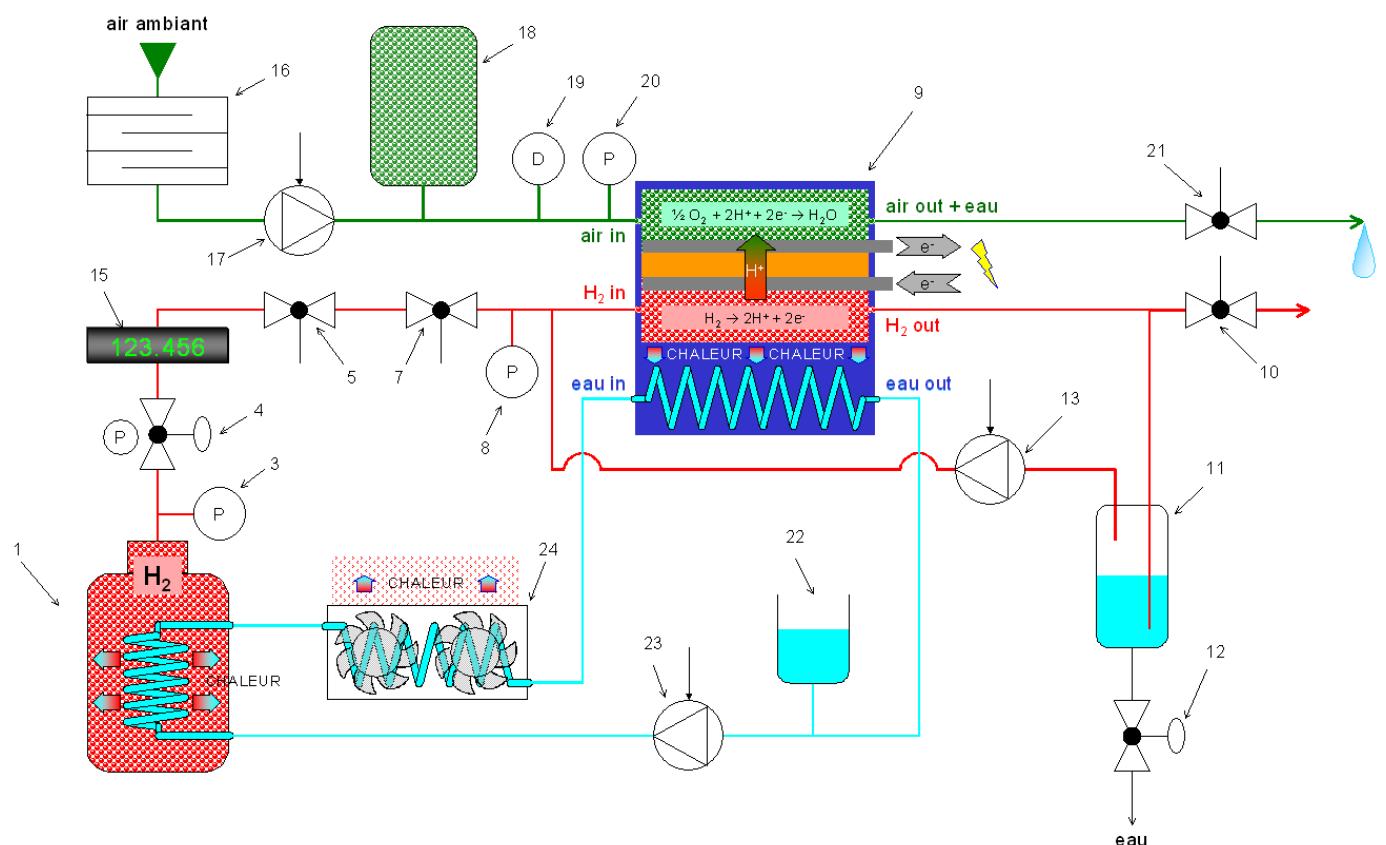


Figure 6 : le système pile à combustible de PAC au banc d'essai à l'ETH.



- 24 Radiateur calorifugé avec ventilation pilotée
- 23 Pompe à eau
- 22 Vase d'expansion
- 21 Vanne de régulation de pression du circuit d'air
- 20 Capteur de pression d'air (pour le pilotage de 21)
- 19 Débitmètre d'air (pour le pilotage de 9)
- 18 Accumulateur d'air
- 17 Compresseur d'air piloté
- 16 Filtre à air
- 15 Débitmètre d'H<sub>2</sub> électronique (mesure de la consommation de carburant)
- 13 Pompe de recirculation d'H<sub>2</sub>
- 12 Vanne de purge automatique du séparateur d'eau
- 11 Séparateur d'eau
- 10 Vanne de purge télécommandée
- 9 Pile à combustible
- 8 Capteur de pression (pour le pilotage de 7)
- 7 Vanne de régulation de pression télécommandée
- 5 Vanne d'arrêt rapide télécommandée (arrêts d'urgence)
- 4 Régulateur de pression manuel
- 3 Capteur de pression (pour le pilotage du ventilateur de 24)
- 1 Réservoir d'hydrogène à hydrures métalliques

Figure 7 : synoptique et nomenclature du système pile à combustible de PAC-Car.

## Le système de contrôle

Les organes accessoires nécessaires au fonctionnement de la pile (compresseur, pompes, électrovannes...) sont alimentés par la pile elle-même et sont contrôlés par microprocesseur. Celui-ci garantit le fonctionnement autonome, optimal et sans danger de l'ensemble du système. Il surveille « l'état de santé » de la pile, détecte la présence éventuelle d'hydrogène à l'intérieur du véhicule et mémorise l'ensemble des paramètres de fonctionnement du véhicule à des fins d'analyse. Le synoptique de la Figure 8 présente le système de contrôle dans son ensemble.

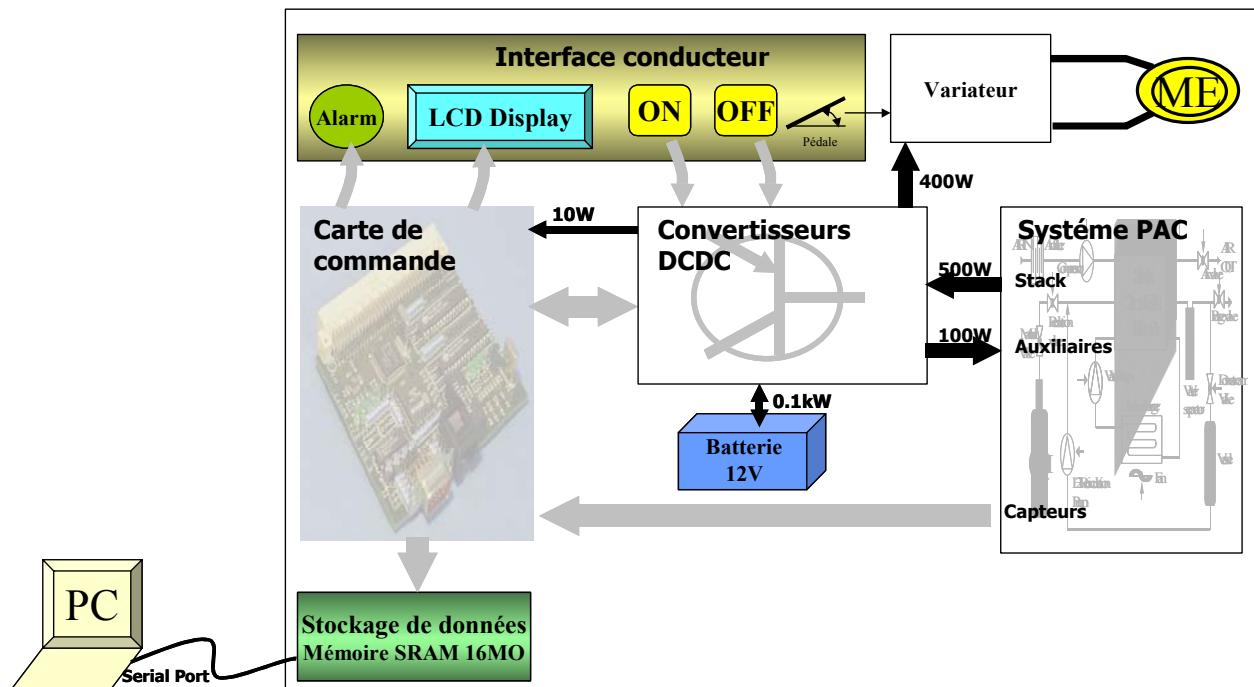


Figure 8 : circuit de commande de PAC-Car.

## La mesure de la consommation

La consommation en hydrogène peut être évaluée par pesées successives du réservoir. Cependant la masse d'hydrogène stockée (moins de 15g) est infime par rapport à celle du réservoir (1500g). Une balance d'une extrême sensibilité serait donc nécessaire pour une évaluation précise de la consommation d'hydrogène.

PAC-Car est donc équipée d'un débitmètre massique de précision placé à la sortie du réservoir (constructeur : Universal Flow Monitors (UFM), référence : FlowStream OFS series, Mass Flow Meters for Gases, documentation au format PDF disponible sur <http://www.UniversalFlow.com>).

Afin de pouvoir comparer les performances de PAC-Car avec les autres concurrents utilisant de l'essence, la consommation d'hydrogène peut être rapportée en quantité équivalente d'essence sur la base du pouvoir calorifique inférieur (PCI) du carburant<sup>2</sup>.

<sup>2</sup> La combustion d'1 g d'hydrogène peut délivrer une quantité d'énergie de 119,93 kJ, correspondant à la combustion de 2,8 g (ou 3,76 ml) de SSP 95, de 2,8 g (3,33 ml) de gazole ou 2,6 g (4,7 ml) de GPL.

## Le véhicule

Abstraction faite du système pile à combustible, de la motorisation et de la transmission, la version 2003 de PAC-Car est constituée d'un véhicule ayant participé à plusieurs reprises au Shell Eco-marathon.

Les deux principales raisons de ce choix sont:

- les efforts ont pu être concentrés sur la pile ;
- l'expérience accumulée cette année devrait permettre de concevoir un nouveau véhicule, mieux adapté aux particularités du système pile à combustible (motorisation électrique, encombrement, poids).



Figure 9 : PAC-Car dans sa version 2003, design : A. La Vecchia, ETH Web Office.

La propulsion est assurées par 2 moteurs électriques à courant continu FAULHABER. D'une puissance unitaire maximale de 200 W, ils ont été choisis pour leur excellent rendement (plus de 80% mesuré au banc). La transmission mécanique (Figure 10) fait appel à une courroie crantée (rapport de réduction de 17) et à une roue libre.

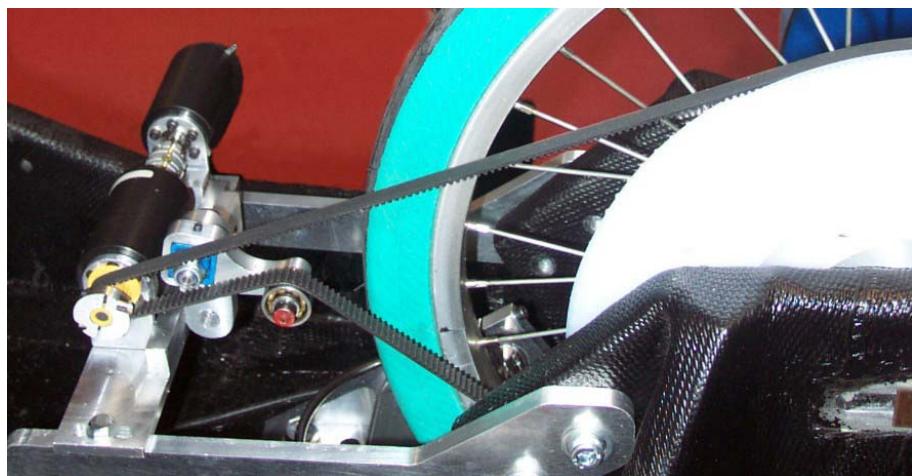


Figure 10 : gros plan sur la transmission mécanique.



*Figure 13 :le compartiment moteur de PAC-Car.*

## L'équipe

PAC-Car est le fruit d'une équipe internationale constituée d'étudiants, d'enseignants et de chercheurs de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Zürich (ETH) en Suisse et de l'Université de Valenciennes et du Hainaut Cambrésis (UVHC) en France.

L'ETH possède une expérience unique dans le domaine de la PEMFC, elle s'est donc attelée à la mise en œuvre du système pile à combustible et du convertisseur électrique.



L'UVHC bénéficie d'une longue expérience du Shell Eco-marathon, avec plusieurs participations depuis 1994, dont l'une avec un véhicule hybride thermique-électrique en 1998<sup>3</sup>. Elle s'est chargée de la conception et de la réalisation du véhicule 2003 (châssis, transmission, moteur électrique, carrosserie).

---

<sup>3</sup> 3<sup>ème</sup> prix de l'innovation technique.

## Les résultats

PAC-Car a participé à la 19<sup>ème</sup> édition du Shell Eco-marathon qui s'est déroulé les 17 et 18 Mai 2003 sur le circuit Paul Armagnac à Nogaro, France. PAC-Car était enregistré sous le numéro d'équipe 126, 250 véhicules se sont engagés dans cette compétition internationale. Les résultats peuvent être consultés sur le site officiel de Shell [www.shell.fr](http://www.shell.fr)



La consommation de PAC-Car a été officiellement mesurée à :

**15.9g d'hydrogène aux 100km.**

Cette incroyablement faible consommation correspond énergétiquement à quelques 1694km par litre d'essence SP95.

Outre l'efficacité, la fiabilité du système a également été démontrée. En effet PAC-Car a parcouru la remarquable distance d'environ 300km sur la piste de Nogaro sans la moindre défaillance.

L'introduction de l'hydrogène comme source d'énergie au sein du Shell Eco-marathon était une nouveauté. Nous remercions les organisateurs pour les dispositions spéciales qui ont dû être prises pour l'approvisionnement et le remplissage de l'hydrogène ainsi que la mesure de la consommation.

Malheureusement Shell n'a pas accepté d'intégrer PAC-Car au classement général, l'hydrogène ayant été considéré comme un carburant alternatif. Autrement les résultats obtenus par PAC-Car (1694km/l) l'auraient propulsé à la 10<sup>ème</sup> place du classement général. C'est un résultat remarquable compte tenu de la faible optimisation mécanique (aérodynamisme, masse, résistance au roulement) de PAC-Car comparée aux véhicules le précédent. Le véhicule ayant remporté le Shell Eco-marathon (3103km/l) aurait en effet une résistance à l'avancement quatre fois inférieure à celle de PAC-Car. Cela augure du potentiel de progression du projet PAC-Car.



Des images de PAC-Car au Shell Eco-marathon 2003 sont présentés ci-dessous. Enfin la table en annexe donne la liste des apparitions de PAC-Car dans les médias. D'autres photos ainsi que le presse book sont disponibles sur <http://www.imrt.ethz.ch/pac-car/> et <http://www.univ-valenciennes.fr/pac-car/>. On y trouve notamment un lien vers le reportage télévisé diffusé dans l'émission suisse MTW du 22 Mai 2003 sur SFDRS1.

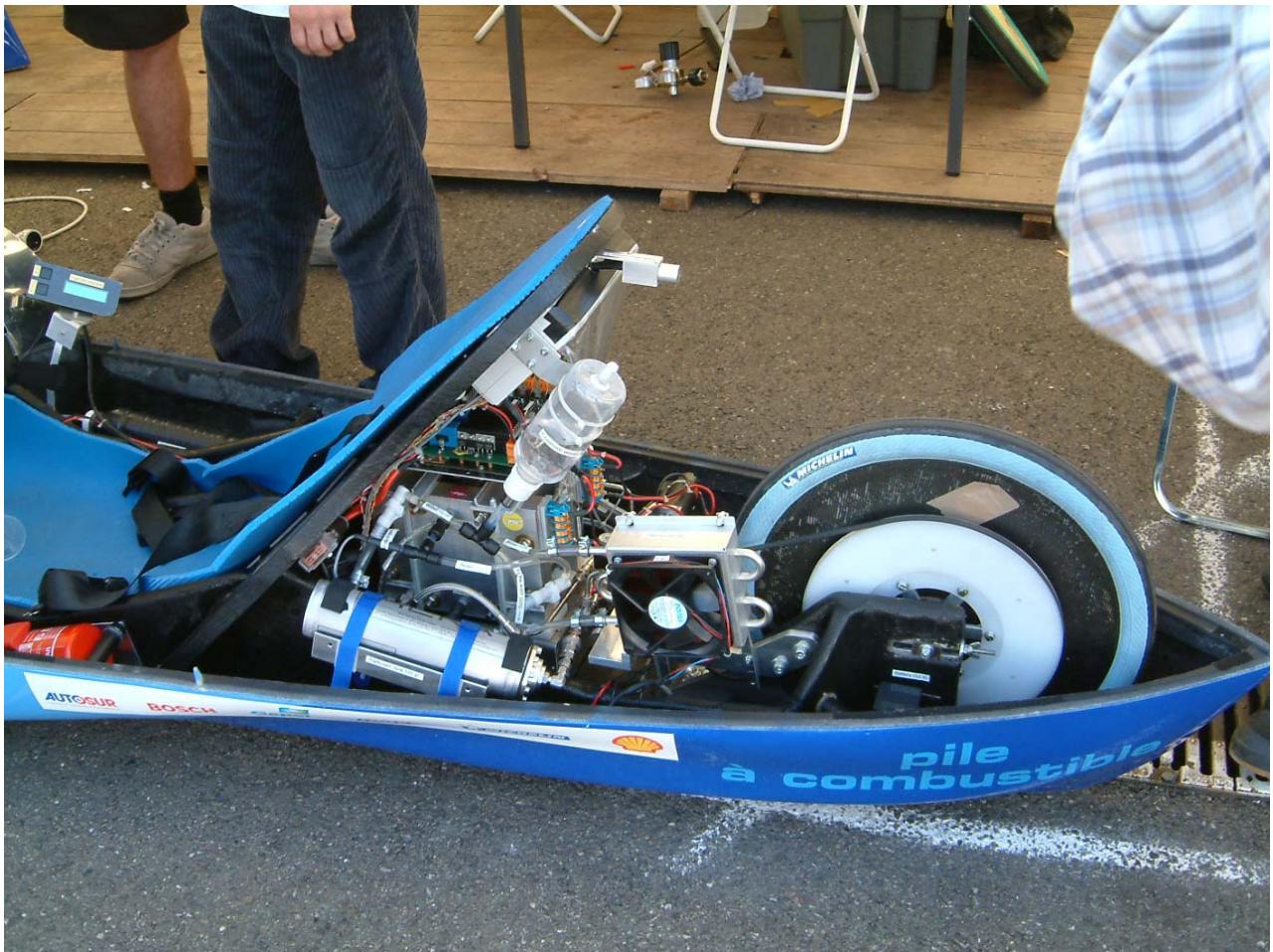


Figure 14 : Shell Eco-marathon 2003, Nogaro, France

## PAC-Car 2003







*PAC-Car au départ du Shell Eco-marathon.*



*Commissaire de course relevant la consommation de PAC-Car*



*PAC-Car sur la piste du Shell Eco-marathon.*

## Les perspectives

Cette fructueuse expérience sera poursuivie par la mise au point de PAC-Car II. Ce véhicule utilisera la même technologie que PAC-Car I mais avec les améliorations suivantes :

- Optimisation du rendement énergétique du système pile à combustible
- Minimisation de la résistance aérodynamique du véhicule
- Minimisation de la masse et de la résistance au roulement

L'objectif principal du projet est l'établissement d'un nouveau record du monde de la plus faible consommation énergétique jamais atteinte par un véhicule roulant motorisé utilisant un combustible comme unique source d'énergie. La performance sera officiellement mesurée pour être inscrite dans le Guinness des records.

## Remerciements

L'aboutissement d'un tel projet n'aurait été possible sans l'aide de nos partenaires :

- **BfE Swiss Federal Office of Energy** pour son soutien financier
- **L'INSTITUT PAUL SCHERRER (PSI)** pour la pile à combustible,
- **HERA** pour le réservoir à hydrures métalliques,
- **FAULHABER** pour les moteurs électriques de traction,
- **ATMI** pour les capteurs d'hydrogène,
- l'Institut des Sciences et Techniques de Valenciennes (ISTV),
- l'Atelier Inter-établissement de Productique (AIP) de Valenciennes.



ANNEXE : Liste des parutions dans les médias

Les articles et reportages peuvent être consultés à partir du site <http://www.univ-valenciennes.fr/pac-car/>

Date :	Référence :
19/06/03	« <b>Thurgauer Zeitung</b> », du 19 juin 2003 : « Wasserstoff im Tank »
17/06/03	« <b>Walliser Bote</b> », du 17 juin 2003 : « 1700 Kilometer mit 1 Liter Benzin »
06/06/03	« <b>Auto-Information</b> », du 06 juin 2003 : « ETH mit Wasserstofffahrzeug am Shell-Marathon »
02/06/03	<b>auto-innovations.com</b> , juin 2003 : « Comment gagner le Shell Eco-marathon ? »
30/05/03	« <b>L'Observateur du Valenciennois</b> » paru le 30 mai 2003 : « La pile à combustible, comment ça marche ? »
29/05/03	« <b>ETH Live International</b> » paru le 29 mai 2003 : « ETH Team in Eco-Marathon »
28/05/03	Article de Jacky Etienne dans le « <b>Journal de l'Université de Valenciennes</b> », mai 2003 :
28/05/03	Flash de 3' environ sur « <b>France Bleu Nord</b> », mercredi 28 mai 2003, vers 8h40.
27/05/03	« <b>Blick</b> » paru le 27 mai 2003 : « Autonews : 1,0l auf 1700 km »
27/05/03	<b>Emission télévisée sur « 3Sat Online »</b> , mardi 27 mai 2003 « Die sparsamsten Fahrzeuge der Welt».
25/05/03	« <b>Auto-Moto</b> » sur « <b>TF1</b> », dimanche 25 mai 2003.
22/05/03	<b>Emission télévisée sur « SF DRS MTW »</b> , jeudi 22 mai 2003 « Die sparsamsten Fahrzeuge der Welt ».
22/05/03	« <b>Neue Zürcher Zeitung</b> » du 22 mai 2003 : « Mit einem Liter über 1700 Kilometer ».
22/05/03	« <b>Bulletin VSE</b> » du 22 mai 2003 : « Sparmobil PACCcar».
21/05/03	« <b>La Voix du Nord</b> » (toutes éditions) du mercredi 21 mai 2003 : « Conduite économique ».
20/05/03	« <b>ETH Live</b> » paru le 20 mai 2003 : « Chance GePACkt »
20/05/03	<b>News télévisées sur « SF DRS »</b> , mardi 20 mai 2003 : « Wasserstoff-Auto ».
04/03	Communiqué de presse final de <b>Shell</b> : «... seul regret des concurrents de la catégorie "énergies alternatives" : ne pas être classés avec les autres concurrents ».

PAC-Car 2003

04/03	Communiqué de presse de Shell <b>Prix de l'innovation</b> « mention spéciale pour PAC-Car »
18/05/03	« <b>La Dépêche du midi</b> » Gers-Gascogne, dimanche 18 mai 2003 : « ElectroRoller et PAC-Car : le duel »
14/05/03	« <b>La Feuille d'Annonces</b> » du 14 mai 2003 : « Quatre prototypes de l'Université de Valenciennes au 19 <sup>ème</sup> Shell-éco-marathon. Le maximum de kilomètres avec le minimum de carburant ! »
13/05/03	<b>Poster</b> sur le fonctionnement de la pile à combustible de PAC-Car au Shell éco-marathon 2003.
12/05/03	Article de Jacky Etienne dans le <b>« Journal de l'Université de Valenciennes »</b> , mai 2003.
11/05/03	« <b>La Voix du Nord</b> » (édition du Valenciennois) du dimanche 11 et du lundi 12 mai 2003 : « Quatre prototypes de l'Université de Valenciennes au dix-neuvième Shell éco-marathon : moins de carburant et toujours plus de kilomètres ».
11/05/03	« <b>La Voix du Nord</b> » (toutes éditions, pages éco) du dimanche 11 et du lundi 12 mai 2003 : « Marathoniens Valenciennois ».
mai 2003	Article dans la revue interne Shell : « <b>La Route</b> » de mai-juin 2003, n°472, pages 33 à 35.
05/04/03	Communiqué de presse de Jacky Etienne, <b>service communication de l'Université de Valenciennes</b>
28/04/03	Article dans la revue interne à notre sponsor <b>FAULHABER</b> (en Allemand).
28/04/03	Communiqué de presse de <b>Shell</b> sur les « Derniers échos à J-20... »
15/04/03	Communiqué de presse de l'UVHC au sujet de la participation de <b>PAC-Car au Shell éco-marathon 2003</b> .
Avril 2003	PAC-Car poster exhibited in the <b>Semicon exhibition in Munich</b> by ATMI, one of our sponsor (H2 sensors).
28/02/03	Communiqué de presse de Shell au sujet de la <b>participation des équipes de la région Nord pas de Calais</b> .
28/02/03	Communiqué de presse de Shell sur les <b>évolutions marquantes de l'édition 2003</b> .