



LE PROGRAMME PILE A COMBUSTIBLE chez GENERAL MOTORS¹

Sommaire

- 1 Généralités
- 2 Les premiers développements
- 3 Les développements ultérieurs
- 4 Conclusions

1. Généralités

Chez *General Motors*, le programme de recherches sur les piles à combustible destinées à des véhicules a démarré en interne au milieu des années soixante avec la réalisation, en 1966, du prototype **Electrovan** (fig. 1) sur la base d'un GMC, équipé d'une pile de 32 kW alimentée à partir de réservoirs d'hydrogène et oxygène liquides. GM ne s'est ensuite fait connaître à l'extérieur qu'en 1990. Il incluait les activités du *General Motors Research and Development Center* comme maître d'ouvrage, assisté par plusieurs divisions de *Delphi Automotive Systems*, ainsi que par *DuPont* et le canadien *Ballard Power Systems*.

A partir de 1990, il faisait partie du programme « *Super-Car* » piloté et financé par le Département de l'Energie (*US DoE/Office of Conservation and Renewable Energy*), devenu plus tard *Partnership for a New Generation of Vehicles (PNGV)* regroupant les trois grands constructeurs : General Motors, Ford et Chrysler à partir du début 2002 dans le programme « *FreedomCAR* ».

La stratégie de GM a été de démarrer son programme de développement en s'appuyant sur la meilleure technologie disponible à l'époque (Ballard), tout en développant sa propre technologie qui équipe dorénavant ses véhicules.

2. Les premiers développements

La phase I du projet public s'est achevée en 1994 par la démonstration de faisabilité d'un prototype de pile à combustible de type PEM (cf. Fiche 9.1) d'une puissance de 10 kWe, fournie par Ballard.

La phase II (août 1995 – fin 97) s'est achevée par la démonstration d'un prototype complet (c'est à dire avec tous ses auxiliaires) de 60 kWe, composé de deux modules Ballard de 30 kWe, ainsi que d'une batterie capable de fournir 30 kWe. L'hydrogène nécessaire était fourni par un reformeur de méthanol mis au point par *Arco Products Co*, filiale de *Atlantic Richfield*, et le pétrolier *Exxon Research & Engineering Co*.

¹ <http://www.gm.com>



Figure 1 – Prototype **Electrovan** (1966)

La phase III (fin 97 – 1999) a inclus la démonstration de plusieurs véhicules qui ont été développés au *Global Alternative Propulsion Center* de G.M.

- En janvier 1998, a été présenté au *Detroit Auto Show*, un prototype de la série *EV-1*, véhicule hybride à pile à combustible équipé d'une pile à combustible couplée à un système de récupération de l'énergie de freinage sur batteries, et d'un reformeur méthanol.
- En mars 1998, au Salon de Genève, a été présenté le prototype **Sintra**, équipé d'une pile Ballard de 50 kWe net, alimentée par un reformeur méthanol (voir figure 2)
- En septembre 1998, a été présenté au Mondial de l'Automobile de Paris, le prototype *OPEL/Zafira* équipé de deux piles Ballard de 25 kWe, couplées à une batterie *Ovonic* de 6.3 kWh et à un reformeur méthanol.



Figure 2 – Le prototype **SINTRA** (mars 1998)

3. Les développements ultérieurs

Les divers prototypes qui ont suivi ont été présentés, soit par GM, soit par les deux autres sociétés du groupe, Opel en Allemagne et Vauxhall en Grande Bretagne.

- en janvier 2000, au *North American International Show* de Detroit, a été montré le prototype **Precept**, (Fig. 3) équipé d'un stockage d'hydrogène (4,9 kg) sur hydrures. La densité de stockage annoncée (4 à 5%) et des informations évoquant un hydrure sous forme de gel, font penser à un

hydrure de type liquide. La pile à combustible était de technologie « maison », délivrant 100 kW nominal avec 400 cellules (1kW/l et 1 kW/kg).



Figure 3 – Le prototype **Precept** (2000)

- En mars 2000, a été présentée, au Salon de Genève, une version améliorée du prototype OPEL/Zafira, baptisée **HydroGen1**. Ce prototype (voir figure 4) a été montré dans de nombreux pays et a été le premier véritablement opérationnel chez GM. Il était équipé d'un réservoir contenant 75 litres d'hydrogène liquide (équivalent à 5 kg d'hydrogène) pour un volume total de 130 litres et une masse totale de 50 kg ; le stockage semble avoir été fabriqué par Linde. La pile à combustible était « maison » : sa puissance nominale était de 86 kW (pour une puissance maximum de 129 kW) ; elle comportait 200 cellules, dans un volume de 59 litres et pour une masse de 86 kg, ce qui en faisait, à cette époque, le module le plus performant en termes de volume et masse. La propulsion de *HydroGen1* était assurée par un moteur électrique triphasé de 55 kW (75CV). Le véhicule pesait 1575 kg. L'autonomie était de 400 km pour une vitesse max. de 140 km/h.

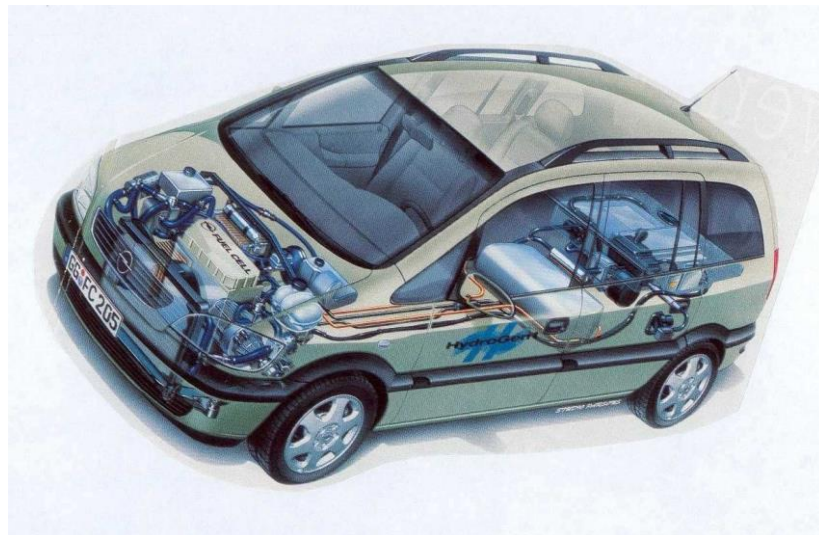


Figure 4 – Le prototype **HydroGen1** (mars 2000)

- en juin 2001, des articles de presse² ont évoqué le prototype **HydroGen2**. Il était présenté comme plus performant que son aîné : une pile « maison » « *Stack 2000* » PEM de 94 kW, plus compacte

² Hydrogen & Fuel Cell Letter, juin 2001, Vol. XVI/n°6
3/12

et plus légère (1,6 kW/l), le système d'humidification externe ayant été supprimé et la pile fonctionnant à une pression proche de la pression atmosphérique.

- En septembre 2001, le modèle **HydroGen3** a été dévoilé (voir figure 5). Il était présenté comme une version améliorée du précédent. Il était équipé d'une pile délivrant 94 kW en nominal (140 CV), dont les dimensions étaient de 820x140x500, constitué de 640 cellules. La pleine puissance était obtenue en 30 secondes à partir d'une température de -20°C . Les caractéristiques spécifiques étaient : 1.75 kW/l et 1.27 kW/kg. Selon les versions, HydroGen3 était équipé, soit d'un réservoir d'hydrogène liquide (4,6 kg), soit d'un réservoir d'hydrogène sous pression à 350 bars (3,1 kg).



Figure 5 – Le prototype **HydroGen3** dans sa version H₂ liquide (septembre 2001)

- En octobre 2001, un prototype **Chevrolet S-10** a été présenté à Tokyo (voir figure 6). Son originalité était de comporter un reformeur d'essence dont le rendement annoncé était de 80% et qui démarrait en 3 minutes (modèle GEN III). Il était équipé d'une pile PEM de 25 kWe. Le prototype a été testé pendant 1400 heures. Ce reformeur a été développé avec l'industriel *Chevron*. Le rendement global du système était donné à 40%.
- En janvier 2002, GM a présenté son nouveau concept « skate-board » **AUTOmomy** (figure 7). Il s'agissait d'un châssis polyvalent avec 4 roues motrices dans lequel tout le système énergétique était intégré.
- En août 2002, GM a présenté la **Hy-Wire** (figure 8), premier prototype basé sur le concept AUTOmomy. Il était équipé d'une pile PEM de 94 kW (1,6 kW/l et 0,94 kW/kg) et l'hydrogène (2 kg environ) était stocké sous 350 bars, dans 3 réservoirs cylindriques fournis par *Quantum*.



Figure 6 – Le prototype **Chevrolet S-10**, avec reformeur à essence (octobre 2001)

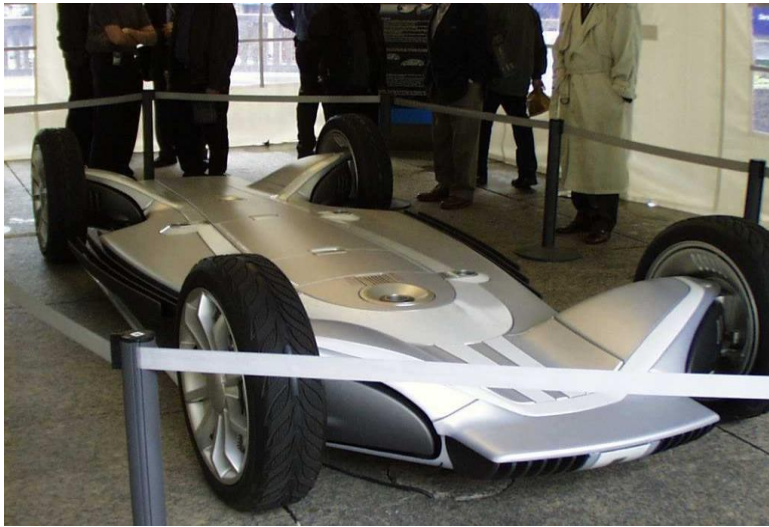


Figure 7 – Le prototype **AUTOnomy** (janvier 2002)



Figure 8 – Le prototype **Hy-Wire** (août 2002)

- En juillet 2003, un exemplaire **HydroGen3** a été mis en service à Tokyo pour le compte de la société *FedEx*, loué 400\$/mois.

- En mai-juin 2004, une version 2004 de **HydroGen3**, équipée du modèle de pile identique à celui de la **Hy-Wire**, a effectué avec succès un marathon de 10 000 km en Europe.
- En janvier 2005, au *North American International Auto Show (NAIAS)*, GM a sorti un nouveau prototype sur la base de sa plate-forme **AUTOmomy** : la **Sequel** (voir figure 9). Il était équipé d'un moteur électrique de 60 kW pour entraîner les roues avant et de moteurs roues de 25 kW pour chacune des roues arrière. La pile de 73 kW était hybridée avec une batterie Li-ion de chez *Saft – USA* capable de fournir une puissance de 65 kW. Le véhicule embarquait 8kg d'hydrogène stocké à 700 bars, pour une autonomie de 480 km. La plate-forme de la **Sequel** est représentée sur la figure 10.



Figure 9 – Le prototype **Sequel** (janvier 2005)



Figure 10 – Le châssis de la **Sequel**.

- En septembre 2006, GM a présenté un nouveau prototype baptisé « **Equinox** » (voir figure 11) dont les principales caractéristiques sont données dans le tableau (figure 12) ci-dessous :



Figure 11 – Le prototype **Equinox** (ou **GM HydroGen4**) (2006)

Partenaires du projet	GM/ Opel/ Chevrolet
Véhicule	Série Chevrolet Equinox
Situation	Petite série de 100 véhicules pour 2007
Nombre de passagers	5
Système de propulsion	<p>Pile à combustible de 115 kW, hybridée avec une batterie 35 kWh NiMH (1.8 kWh). Concept similaire à celui de la GM Sequel (Pile de 4ème génération)</p> <p>Durée de vie du stack : 50,000 Miles (80,000 km)</p> <p>Couple : 320 Nm</p>
Combustible	Hydrogène
Stockage	700 bars, 4.5 kg
Autonomie	320 km
Accélération	Environ 12 s de 0 à 100 km/h
Démonstration	Environ 100 véhicules à Los Angeles, Washington D.C. et New York
Objectifs	1 000 véhicules en 2010; 100 000 véhicules d'ici 2015

Figure 12 - Caractéristiques de l'**Equinox**

La pile à combustible qui l'équipait était dite « génération 4 » et pouvait démarrer sous des températures négatives. Sa puissance spécifique atteignait 2,9 kW/litre. A noter que le compresseur à vis (amenée d'air à la cathode) du modèle HydroGen3 avait été remplacé par un turbocompresseur électrique, ce qui a amélioré le rendement et l'acoustique. GM annonce alors le lancement en production de 100 exemplaires. Ce prototype sera baptisé **GM HydroGen4** en Europe et mis en œuvre par le constructeur **Opel**. De fait le volume de fabrication aura atteint 119 exemplaires.

- En mai 2007, GM annonce que sa **Chevy Sequel** entre dans le livre des records : c'est la première fois qu'un véhicule à pile à combustible atteint une autonomie de 300 miles (480 km).
- En septembre 2007, GM annonce le démarrage d'une phase de tests de 18 mois portant sur les 100 prototypes de l'**Equinox** qui circuleront sur les routes américaines dans le cadre du « *Project Driveway* ». GM a mis en place une division de recherche baptisée **FCA** (*Fuel Cell Activities*) qui réunit 600 personnes dont 400 ingénieurs. Courant 2008, il a été annoncé une dizaine d'exemplaires en test à Berlin dans le cadre du *Clean Energy Partnership* (CEP).
- En décembre 2008, neuf exemplaires démarrent leurs tests en Allemagne. L'hydrogène est fourni par Total. Elles sont mises gratuitement à la disposition de diverses structures et industriels en échange du suivi des performances, pendant deux années.
- En avril 2009, *General Motors Corp.* et *Shanghai Automotive Industry Corp. Group* (SAIC), qui ont signé des accords de collaboration, annoncent le lancement du prototype **SAIC's Shanghai Brand Fuel Cell Vehicle** équipé de la pile GM génération 4 et du même réservoir 700 bars que celui de l'Equinox. Dix prototypes seront construits et seront mis en service à l'occasion de l'Expo Shanghai 2010.
- En mai 2009, GM confirme sa collaboration avec le japonais *Suzuki Motor Co. Ltd.* avec qui a été conçu le prototype **SX4-FCV** (voir figure 13) présenté en octobre 2009 au *Tokyo Motor Show*. Il utilisait la pile GM hybridée avec une supercapacité et un réservoir 700 bars de conception japonaise.



Figure 13 – Le prototype Suzuki **SX4-FCV** (2009)

- En août 2009, GM présente la *génération 5* de sa technologie. Elle fournit la même puissance électrique (93 kW_e) mais elle gagne beaucoup en taille et en masse, donc en coût (voir la figure 14). En particulier la masse de platine utilisée est passée de 80g à 30g. Les ingénieurs de GM prévoient que cette génération 5 aura une durée de vie de 120 000 miles (près de 200 000 km).



Volume de la pile	104 litres	64 litres
Charge en platine	80 g	30 g
Volume du système	405 litres	191 litres
Masse du système	250 kg	130 kg

Figure 14 – Photos de la *génération 4* (à gauche) et de la *génération 5* (à droite) (2009)

- En février 2010, GM annonce la fin de sa collaboration avec **Suzuki**, ce dernier ayant fait le choix d'une alliance avec **Volkswagen**.
- En octobre 2010, GM annonce avoir accompli 2 millions de km sur une centaine de prototypes, prévoit une commercialisation en 2015 et estime que la masse de platine mise en œuvre devrait progressivement diminuer pour atteindre 2 g en 2025 par stack.
- En décembre 2010, GM livre à la Navy à Honolulu (Hawaii) le premier exemplaire d'une série de 20 Equinox fournies dans le cadre de la « H2I -*Hawai Hydrogen Initiative* » (figure 15)

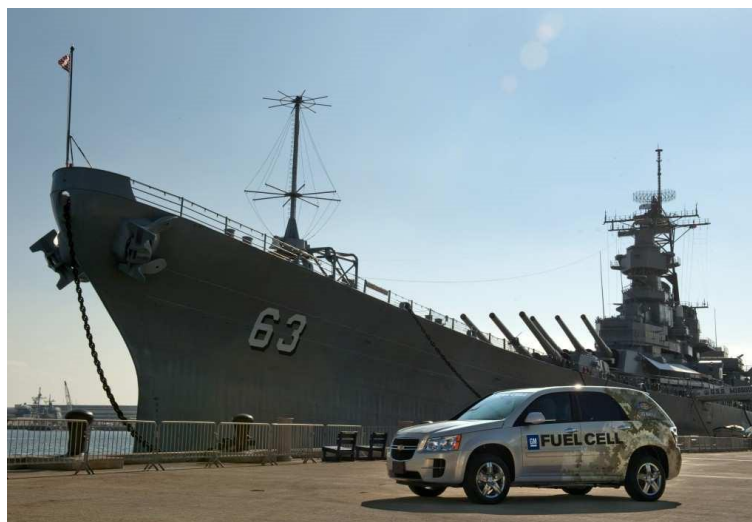


Figure 15 – La première **Equinox** livrée à la Navy à Honolulu (décembre 2010)

- Depuis 2012, les activités pile à combustible de GM sont abritées par la filiale *Pontiac*.

- En juillet 2013, GM annonce une collaboration avec Honda pour développer la génération suivante, à l'échéance 2020.
- En 2013, GM annonce l'inauguration d'une nouvelle installation, le "*state-of-the-art Fuel Cell Development Laboratory at GM Powertrain World Headquarters in Pontiac, Mich*".
- En octobre 2013, GM annonce avoir accumulé 100 000 miles en conditions réelles avec l'un des exemplaires Equinox et plus de 3 millions de miles avec l'ensemble de sa flotte de véhicules à pile à combustible.
- En novembre 2015, GM signe un contrat pluri-annuel avec l'*US Army Tank Automotive Research, Development and Engineering Center* portant sur le développement d'un véhicule tout-terrain équipé d'une pile à combustible (cf. Fig. 16).



Figure 16 - Prototype de véhicule tout-terrain pour l'US Army (2015)

- En octobre 2016, GM fête un anniversaire et fait savoir qu'après 50 années de développement sur le sujet (les débuts en janvier 1966), il a dépensé 2,5 milliards de \$ jusque là.
- Le 3 octobre 2016, est présenté le **Chevrolet Colorado ZH2 Hydrogen Fuel Cell-Powered Off-Road Vehicle** (cf. Fig. 17), construit sur la base du véhicule civil *Colorado*. Il sera testé en conditions extrêmes, par l'US Army, au cours de l'année 2017. Il est équipé d'un module convertisseur pouvant assurer une alimentation électrique jusqu'à 50 kW pour des applications externes. Il est aussi équipé d'une pile à combustible d'une puissance nominale de 93 kW (cf. Fig. 18), qui alimente 4 roues motrices.



Figure 17 - Le démonstrateur **Colorado ZH2** (2016)



Figure 18 - La pile de la **Colorado ZH2**

- En mars 2017, GM et Honda annoncent la mise en place d'une structure exécutive conjointe baptisée : *Fuel Cell System Manufacturing, LLC (FCSM)*. Cette décision est une suite de l'accord préliminaire de 2013 entre les deux compagnies. La Présidence est prise par GM et la Vice-Présidence par Honda. Une rotation de ces postes est prévue tous les deux ans. Les investissements des deux compagnies sont égaux et d'un montant total de 85 M\$. Les activités se dérouleront sur le site GM de Brownstown. Une production de masse est visée pour 2020.
- En juin 2018, GM élargit son domaine d'intervention et signe un accord exclusif avec les français *Liebherr-Aerospace* pour le développement d'un APU (Auxiliary Power Unit) à pile à combustible à hydrogène pour des applications aéronautiques.

4. Conclusions

Pour la pile à combustible, General Motors s'est appuyé essentiellement sur *Ballard* jusqu'en 1999 puis sur ses développements propres. Concernant le stockage d'hydrogène GM a testé les diverses solutions qui se sont offertes :

- Un reformer de méthanol embarqué jusqu'en 1999,
- Puis un court moment, un stockage sur hydrures,
- Puis un court passage sur un reformer d'essence,
- Pour finir sur de l'hydrogène stocké, d'abord sous forme liquide puis finalement sous pression, d'abord à 350 bars jusqu'en 2004, puis finalement, comme tous les constructeurs, sous 700 bars.

General Motors a construit 13 modèles différents (plus deux autres avec Suzuki et SAIC). Ils peuvent se classer essentiellement en deux types :

- Des prototypes de type « concept-car » pour mettre en pratique les idées les plus novatrices (le séduisant concept *AUTO*nomy en est l'exemple le plus frappant),
- Une mini-flotte destinée à des tests en vraie grandeur, dans plusieurs pays et dans des conditions d'utilisation variées : c'est le cas des **Equinox** (ou **HydroGen4**), construites à 119 exemplaires.

GM aura accumulé une expérience sur plus de 3,1 millions de km parcourus en 2016.

Les principaux choix techniques retenus jusque-là par General Motors sont les suivants :

- La pile à combustible est de conception « maison » et apparemment très performante comparée à ses concurrentes, en particulier la toute nouvelle *génération 5*.
- Après avoir testé plusieurs modes de stockage de l'hydrogène, GM a fait le choix de l'hydrogène sous pression à 700 bars (technologie composite *Quantum*).
- L'hybridation est mise en œuvre avec des batteries Li-MH, bien que G.M. ait testé la solution « super capacité » grâce à sa collaboration passée avec Suzuki.

Il apparaît que, pendant la période 2011-2013, *General Motors* s'est limité à poursuivre les tests avec les *Equinox* en service, en particulier à Hawaï.

Depuis le début 2017, GM (*General Motors Global Fuel Cell Business*) s'est lancé dans une collaboration ambitieuse avec Honda avec la création d'une structure commune, et semble se concentrer sur les applications militaires mais sans éliminer les applications civiles.