



## La pile à combustible Applications aux transports publics urbains

**David Corgier**

**Summary** Using fuel cell for urban public transports

Fuel cell for transports is one of the technologies for the future regarding its advantages compared to Diesel engines, GNV, hybrids and trolley busses: zero emission locally, no infrastructure needed in the city centres and potentially alternative energy sources for the hydrogen production. Many fuel cell bus demonstration projects have been launched and achieved for almost ten years all over the world, mainly in the United States and in Europe. These projects are described with the main vehicle technical characteristics and the test program objectives and results. Then, the future test program with the problems to tackle are depicted.

**Mots-clef** Hydrogène, pile à combustible, bus, hybride.

**Key-words** Hydrogen, fuel cell, bus, hybrid.

Outre l'épuisement à terme des énergies fossiles et la nécessité de développer des solutions utilisant des énergies renouvelables, les acteurs du transport public se voient contraints de réduire la pollution en milieu urbain ainsi que les émissions de gaz à effet de serre. Plusieurs solutions existent pour répondre à cette problématique :

- L'utilisation de carburants alternatifs : gaz naturel, GPL, aquazole nécessitant des infrastructures de remplissage lourdes, ou des circuits d'approvisionnement carburant alternatifs coûteux pour l'exploitant, et un niveau d'émission non nul.
- L'hybridation de chaînes de traction pour autobus, permettant de réduire sensiblement les émissions et la consommation, tout en conservant un carburant bon marché sans contrainte pour le remplissage.
- L'électrification des lignes de transports pour les trolleybus ou les tramways, avec des coûts d'infrastructure importants et une pollution visuelle non négligeable.

Aucune de ces solutions existantes et industrialisées ne permet de concilier un niveau d'émissions polluantes quasiment nul, un coût d'infrastructure limité et l'absence de pollution visuelle.

La technologie pile à combustible se positionne ainsi comme une des solutions pouvant satisfaire aux besoins du marché du transport public urbain tout en respectant l'environnement.

Notons également que ce marché est un candidat à l'utilisation de cette technologie en raison de l'attente des usagers, des critères de décision des responsables politiques soucieux de l'environnement urbain, mais aussi pour des raisons techniques (absence de transmission, facilité d'intégration par rapport à l'automobile, flottes captives).

De nombreux projets d'expérimentation ont vu le jour depuis une douzaine d'années et sont exposés ci-dessous avec une synthèse technique et leurs développements futurs. Les perspectives de cette technologie sont ensuite développées avec la définition des points durs, ainsi que les actions à mener pour voir la pile à combustible s'imposer dans les transports publics urbains.

### Les projets d'expérimentation de transports publics à pile à combustible aux États-Unis

#### Le projet Ballard

La société Ballard au Canada a joué le rôle de pionnier dans les applications pile à combustible pour le transport terrestre. Dès 1993, un premier prototype d'autobus a été mis au point par Ballard en vue de démontrer la faisabilité de la technologie pile à combustible PEM (proton exchange membrane) alimentée en hydrogène stocké à bord. Par la suite, un programme de démonstration en partenariat avec les réseaux de transports locaux américains et canadiens a été lancé.

Un modèle d'autobus dit « prototype commercial » a alors été conçu par Ballard et construit sur une base « new flyer ». La pile à combustible est alors constituée d'une mise en parallèle de deux séries de dix « stacks » de 13 kW électriques chacun (650 Vcc/400 A). La puissance brute délivrable est alors de 260 kW électrique, ce qui permet d'exploiter 205 kW pour la traction en raison de la consommation des composants auxiliaires (en particulier du système de compression d'air). L'hydrogène est stocké sous forme gazeuse comprimé à 200 bar, dans des réservoirs cylindriques en



# APPLICATIONS AUX TRANSPORTS TERRESTRES

matériaux composites montés sur le toit du véhicule, d'une manière similaire aux autobus fonctionnant au gaz naturel.

Ce modèle de véhicule a satisfait au standard de performance américain UTA (Urban Transit Authority) avec un niveau de consommation énergétique de 4,18 kWh/mile (soit 2,6 kWh/km ou 80 g d'hydrogène/km). L'autonomie annoncée de ce véhicule est de l'ordre de 400 km et la capacité est de 60 voyageurs.

En 1997, le programme d'essais et d'expérimentation a démarré à Chicago avec le Chicago Transit Authority (CTA), suivi du programme mené à Vancouver avec le British Columbia Transit (BC Transit). Chaque réseau a testé puis exploité sur des lignes commerciales trois véhicules, et ceci dans des conditions d'exploitation représentatives. Pour chaque réseau, une station de remplissage spécifique a été construite avec la possibilité de réaliser des remplissages complets des réservoirs en 15 minutes environ dans le cas du CTA, grâce à un évaporateur d'hydrogène liquide. L'hydrogène est alors produit par vapo-reformage de gaz naturel, liquéfié, puis transporté sur le site de remplissage par camions.

Ces programmes sont achevés à ce jour et ont permis d'atteindre les objectifs de Ballard qui étaient principalement :

- De collecter des données expérimentales sur les systèmes piles à combustibles en usage réel. Chaque véhicule a été en effet instrumenté pour l'acquisition des données physiques, afin d'obtenir un retour d'expérience exploitable pour les développements futurs et d'évaluer le vieillissement des composants constituant le système pile à combustible.
- De définir, avec les réseaux, la spécification « produit » du bus à pile à combustible.
- D'impliquer les réseaux de transport et les autorités locales dans la mise en œuvre de l'hydrogène comme carburant pour le transport. Les aspects comme la sécurité hydrogène, la maintenance, la formation du personnel ont pu être abordés et traités pour préparer les phases à venir d'expansion de la technologie pile à combustible dans les transports publics.
- De connaître la réaction des usagers par rapport à l'usage de l'hydrogène comme carburant et de la technologie pile à combustible en particulier.

## Le projet de Georgetown University

A partir de 1994, l'université de Georgetown a entamé un programme d'expérimentation de la

technologie pile à combustible sur des autobus avec le méthanol comme carburant.

Un premier prototype de bus hybrides (génération 1/Fuel cell test bed bus), équipé d'une pile PAFC (phosphoric acid fuel cell) de 55 kW, et d'un reformer de méthanol développé par Fuji, a été réalisé et testé en partenariat avec le DOE (Department of Energy).

L'étape suivante, soutenue par le US Department of Transportation, a été le développement d'un prototype hybride sur un châssis NOVA Bus (génération 2), équipé d'une pile IFC (international fuel cell) de 110 kW, également de type PAFC. Ce véhicule a été réalisé puis testé à l'université de Georgetown à partir de 1998.

Ensuite, un autre prototype hybride a été réalisé en 2000, cette fois-ci avec une pile à combustible de type PEM et un reformer développés par XCELLSiS (intégrateur de système pile à combustible, joint venture entre Ballard, Daimler, Chrysler et Ford, anciennement nommé « dbb »). Ce dernier véhicule offre un niveau de performance remarquable, avec une vitesse maximale annoncée de 105 km/h pour une autonomie de 560 km.

Cette étape a permis de progresser techniquement pour le système pile et son reformer associé, et a surtout mis en avant que :

- La technologie PAFC est moins adaptée aux applications de transport terrestre que la technologie PEM,
- Le système reformer a des performances de mise en marche et de réponse aux transitoires encore pénalisantes pour s'imposer à court terme.

L'avenir de ce programme est l'étude et la réalisation d'un quatrième prototype non hybride, équipé d'un système pile à combustible de 240 kW associé à un reformer de méthanol.

Les performances visées pour le démarrage à froid et les transitoires sont, respectivement, de 15 minutes et de 50 kW/s. La mise en service de ce véhicule n'est pas encore précisée.

## Le projet californien

Dans le cadre du « California fuel cell partnership », des modèles de bus à pile à combustible ZEBus P-4 développés par XCELLSiS sont ou seront expérimentés par deux réseaux californiens. Les deux premiers véhicules sont déjà à l'essai par l'agence de transport SunLine Transit Agency dans la région de Palm Spring. Par la suite, AC Transit, localisé dans la baie de San Francisco, participera à ce programme d'expérimentation prévu dans les centres urbains et sur les autoroutes, dans des conditions réelles d'exploitation.

# APPLICATIONS AUX TRANSPORTS TERRESTRES



Le modèle ZEBus P-4 est développé sur un châssis « new flyer » dans une configuration similaire aux véhicules expérimentés à Chicago et Vancouver (205 kW de puissance nette, hydrogène comprimé dans des réservoirs composites...).

L'objectif du projet est de mettre en circulation 20 bus à pile à combustible d'ici 2003 et de préparer la mise sur le marché de véhicules à pile à combustible afin de :

- Développer et documenter les procédures d'évaluation des bus à pile à combustible,
- Évaluer les performances, les émissions, les coûts liés à chaque véhicule exploité,
- Définir l'infrastructure hydrogène et les adaptations nécessaires dans les dépôts des exploitants.

## Les projets d'expérimentation de transports publics à pile à combustible en Europe

En comparaison aux programmes américains, les programmes européens sont plus nombreux mais restent plutôt modestes pour le nombre de prototypes réalisés et l'envergure des expérimentations.

### Les projet NEBUS et CUTE par EVOBUS – groupe Daimler Chrysler

En 1997, le NEBUS (new electric bus) a été présenté au public par EVOBUS (groupe Daimler Chrysler). Ce prototype de bus à pile à combustible alimenté en hydrogène est équipé d'une pile à combustible Ballard de 250 kW, intégrée dans un système développé par XCELLSiS, filiale commune de Daimler et Ballard.

Ce véhicule a une capacité de 62 passagers et une autonomie de 250 km grâce à 21 kg d'hydrogène stocké sous pression dans des réservoirs composites à 300 bar. Les autorités allemandes (le TÜV) ont homologué ce véhicule qui circule sur les routes allemandes sans restriction.

Par la suite, le NEBUS a participé à de nombreuses démonstrations publiques en Europe, mais également aux États-Unis, et sert de base de données expérimentales pour le développement d'une version « commerciale » future.

Le projet CUTE (clean urban transport for Europe) lancé en 2000, est le prolongement direct du projet NEBUS. Il consiste à expérimenter dans 9 villes européennes, 30 bus à pile à combustible identiques sur une base CITARO. Les villes partenaires sont Reykjavik, Amsterdam, Barcelone, Hambourg,

Londres, Luxembourg, Porto, Stockholm et Stuttgart.

Il est prévu que les véhicules, développés par Daimler Chrysler et XCELLSiS, soient livrés à partir de la fin 2002 et expérimentés pendant deux ans par les réseaux de transport. La capacité prévue des bus est de 70 passagers, pour une autonomie de 250 km.

Ces véhicules considérés comme les premières versions commerciales sont au prix de 1,25 millions d'euros, incluant 2 ans de maintenance.

En marge de ce projet européen, trois exemplaires identiques de ces bus seront également expérimentés en Australie, par la ville de Perth, à partir de la fin 2002.

### Les projets MAN

Dans le cadre d'un projet européen, MAN a développé avec Siemens KWU, en 2000, un bus à pile à combustible, le « Fuel cell city bus ». Doté d'un système pile à combustible de 120 kW, ce véhicule est également équipé de réservoirs d'hydrogène comprimé à 250 bar lui permettant de disposer d'une autonomie de 250 km environ.

Dans le cadre d'un projet à Berlin, MAN est en train de réaliser un autre véhicule à pile à combustible, mais avec un système pile à combustible Air Liquide/Nuvera, et un stockage d'hydrogène liquide cryogénique.

Ce dernier projet fait partie d'un plus vaste programme d'expérimentation de véhicules roulant à l'hydrogène sur Berlin, avec des bus équipés de moteur à combustion interne également développés par MAN.

Ces bus restent des véhicules de démonstration de faisabilité technique et n'ont pas encore été mis en situation d'exploitation réelle.

### Le projet NEOPLAN

En partenariat avec les pouvoirs publics de Bavière, Neoplan et Proton Motor ont développé un prototype de bus à pile à combustible courant 2000. Ce véhicule a une architecture hybride avec une pile de 80 kW alimentée en hydrogène stocké sous pression. Ce prototype a été exposé lors de symposium mais à l'heure actuelle, il ne semble pas avoir été mis en exploitation.

### Le projet SCANIA

Dans le cadre d'un projet européen, Scania vient de mettre au point un bus hybride en coopération avec Air Liquide/Nuvera, fournisseur d'un système



# APPLICATIONS AUX TRANSPORTS TERRESTRES

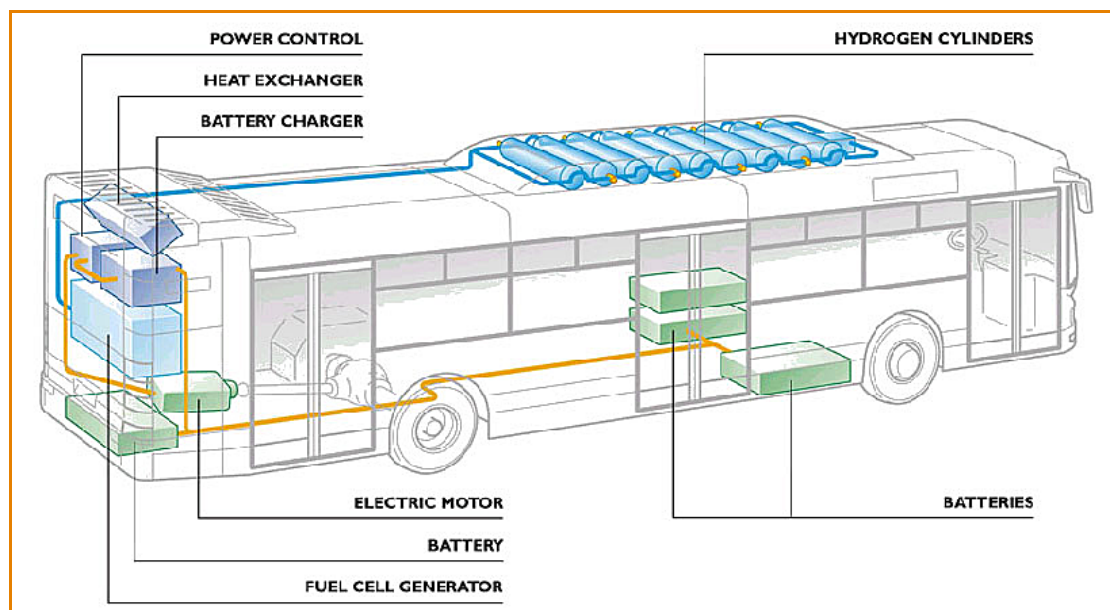


Figure 1 - Le véhicule de démonstration Irisbus Cityclass de Turin.

pile de 60 kW. Ce véhicule, équipé de réservoirs d'hydrogène sous pression, reste un véhicule de démonstration de faisabilité et aucune mise en exploitation ne semble envisagée à court terme.

## Le projet IRISBUS

Ce projet consiste au développement et la construction de trois véhicules pour des réseaux de transport urbain partenaires du projet en France, Italie et Espagne (Paris, Turin et Madrid). La finalité est d'évaluer, en situation d'exploitation, l'ensemble constitué du véhicule et des infrastructures d'alimentation en carburant.

Ces trois véhicules sont de type surbaissé intégral de 12 m, avec une architecture électrique hybride et un stockage d'hydrogène comprimé. Les systèmes pile à combustible sont de fournisseurs alternatifs (IFC et Air Liquide/Nuvera) et de puissance de l'ordre de 65/75 kW suivant le type de véhicule équipé.

A ce jour, seul le véhicule de Turin a été achevé et est en cours d'essais avant mise en circulation par le réseau de Turin (*figure 1*). Les deux autres véhicules sont au stade de l'étude de conception et doivent être réalisés d'ici fin 2002 pour le véhicule de Madrid, et d'ici la mi-2003 pour le véhicule de Paris.

Les principaux objectifs du programme sont :

- l'évaluation des filières énergétiques sur le plan environnemental et économique,

- l'acquisition du savoir-faire pour le constructeur et les réseaux exploitants,
- la mise au point de la réglementation concernant la sécurité et la réception à titre isolé des véhicules par les autorités nationales respectives,
- l'évaluation de l'acceptabilité de l'hydrogène par le personnel des réseaux et par les usagers.

## Les points durs

Ces projets ont permis aux constructeurs de bus et de systèmes pile à combustible d'acquérir un savoir-faire technologique important. De plus, ils ont donné l'occasion à certains réseaux de transport d'être confrontés aux particularités de cette nouvelle technologie, et de l'hydrogène comme carburant en particulier. Toutefois, de nombreux points durs restent à surmonter, avec par ordre croissant :

- Bâtir une réglementation adaptée aussi bien aux États-Unis qu'aux pays européens afin de permettre l'exploitation des bus par les réseaux, et surtout l'installation de stations de remplissage en hydrogène dans les dépôts des réseaux de transport.
- Créer des infrastructures de distribution d'hydrogène suffisantes afin de permettre la poursuite des expérimentations sur des sites appropriés (zones urbaines denses). Ceci est conditionné par l'existence réelle d'un marché de l'hydrogène comme vecteur d'énergie et par une réglementation favorable.

# APPLICATIONS AUX TRANSPORTS TERRESTRES



- Disposer à un coût raisonnable d'hydrogène généré par des filières favorables à la protection de l'environnement.
- Réduire les coûts des composants et des infrastructures, ceci notamment par le développement industriel et commercial d'autres applications dans le domaine des piles à combustible et de l'hydrogène.
- Obtenir des données expérimentales sur la durée de vie des piles à combustible utilisées dans des zones urbaines denses avec une mauvaise qualité de l'air.
- Disposer de piles à combustible insensibles au gel et aux températures extrêmes.
- La fabrication de l'électricité à bord du véhicule sans captage, donc sans pollution visuelle. Plusieurs étapes ont déjà été franchies en particulier aux États-Unis et en Allemagne. Il est clair, en analysant les projets, que les réglementations américaines et allemandes ont favorisé l'émergence de ces projets, d'où la possibilité offerte aux industriels comme Ballard, IFC ou XCELL-SiS, de progresser beaucoup plus rapidement sur le plan technique que leurs concurrents. Reste en France à travailler pour imposer la technologie avec comme priorité d'obtenir les autorisations indispensables pour expérimenter et réaliser le remplissage des réservoirs de ces véhicules.

## Conclusion

L'application de la pile à combustible pour la traction des véhicules urbains routiers présente potentiellement quatre principaux avantages :

- la diversification des sources énergétiques, dans le cas notamment de l'utilisation de l'hydrogène,
- la meilleure utilisation de l'énergie grâce aux très bons rendements de la pile et de la chaîne de traction électrique,
- la possibilité d'obtenir un fonctionnement « zéro émission » dans le cas de l'hydrogène ou en tous cas une réduction drastique des polluants locaux avec les autres carburants,



### David Corgier

est chef du secteur Chaînes de traction électriques à la direction des études d'Irisbus France\*.

\* avenue des Combats du 24 Août 1944,  
69200 Vénissieux.  
Tél. : 04 72 96 00 33. Fax : 04 72 96 03 51.  
E-mail : ddavid.corgier@renaultvi.com