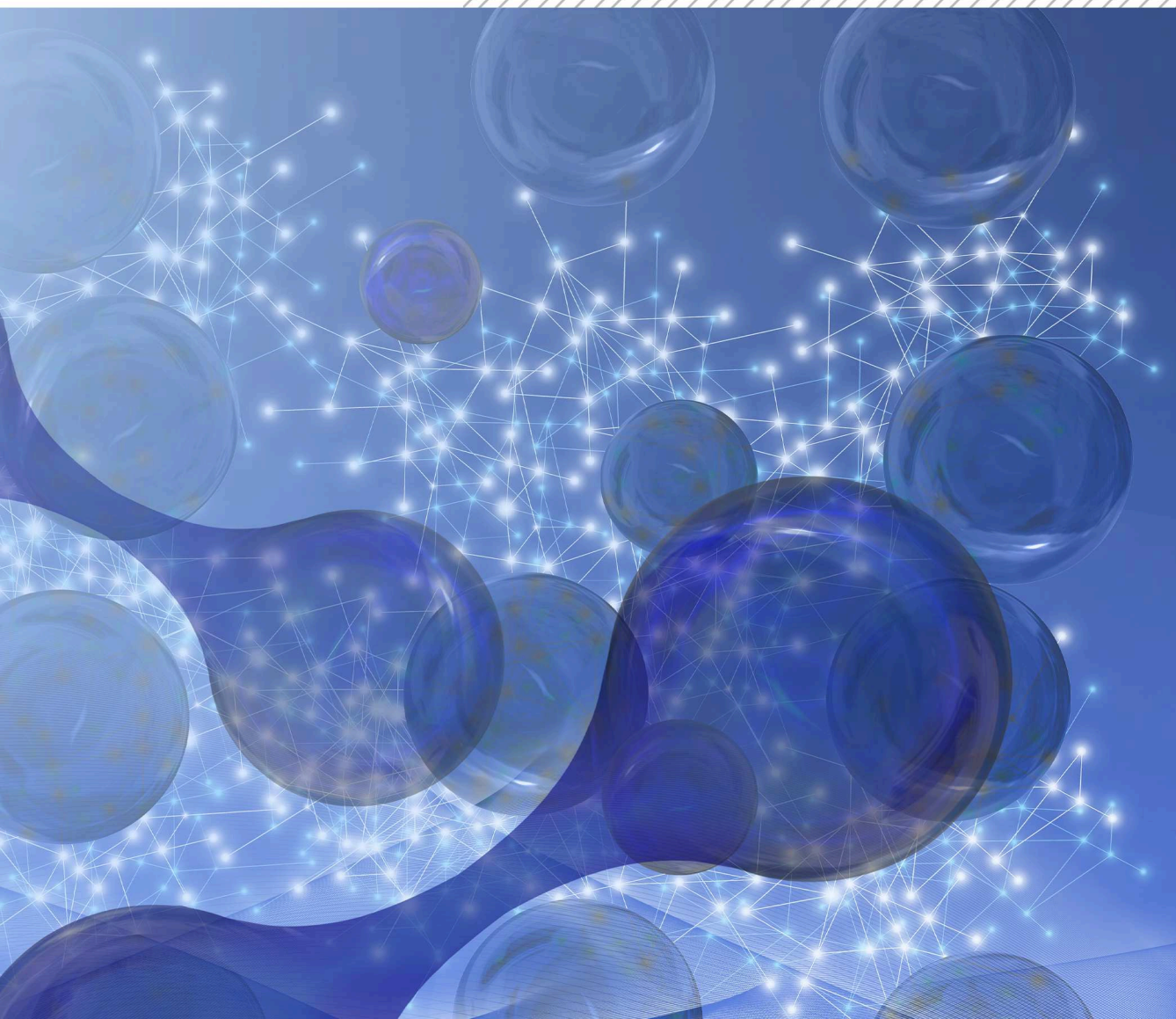




TECHNIQUES
DE L'INGÉNIEUR

LES FOCUS
TECHNIQUES DE L'INGÉNIEUR



HYDROGÈNE

PILES À COMBUSTIBLE APPLIQUÉES À
LA MOBILITÉ ÉLECTRIQUE -
LA MOBILITÉ HYDROGÈNE

Août / 2022



Date de publication :
10 février 2022

Piles à combustible appliquées à la mobilité électrique - La mobilité hydrogène

Cet article est issu de : **Ingénierie des transports | Véhicule et mobilité du futur**

par **Joseph BERETTA**

Mots-clés

stockage hydrogène | piles à
combustible | véhicule
électrique | transports
terrestres

Résumé La mobilité est en évolution technologique et sociétale. Nous assistons à une mutation rapide vers la mobilité électrique principalement aujourd'hui à batterie. Un manque d'autonomie et une recharge trop longue sont souvent cités comme les principaux freins au développement des véhicules électriques. Les véhicules à pile à combustible avec un stockage d'hydrogène sous forme comprimée à 350 ou 700 bar peuvent parcourir plus de 500 km, en une seule recharge d'une durée de 3 à 5 minutes ; ils apparaissent plus que jamais comme une alternative crédible aux véhicules actuels. Cet article traite de la technologie des piles à combustible appliquée aux transports terrestres en analysant les aspects technologiques, environnementaux, économiques et politiques.

Keywords

hydrogen storage | fuel cells |
electric vehicle | land
transportation

Abstract Mobility is evolving both technologically and socially. We are witnessing a rapid shift to electric mobility, mainly today, with battery. A lack of autonomy and charge time too long are often cited as the main obstacles to the development of electric vehicles. Fuel cell vehicles with hydrogen storage in compressed form at 350 or 700 bars can travel more than 500 km, in a single charge lasting 3 to 5 minutes, they appear more than ever as a credible alternative to current vehicles. This article discusses fuel cell technology applied to land transportation by analyzing technological, environmental, economic, and political aspects.

Pour toute question :

Service Relation clientèle
Techniques de l'Ingénieur
Immeuble Pleyad 1
39, boulevard Ornano
93288 Saint-Denis Cedex

Par mail :
infos.clients@teching.com

Par téléphone :
00 33 (0)1 53 35 20 20

Document téléchargé le : **18/08/2022**

Pour le compte : **7200106152 - éditions ti // céline BLONBOU // 90.25.198.236**

Piles à combustible appliquées à la mobilité électrique

La mobilité hydrogène

par **Joseph BERETTA**

Président d'honneur Avere-France

Président Automobile Technology & Mobility Expertise (AT&ME)

1. Notions de base	BM 4 850v2 – 2
1.1 Différents types de pile	– 4
1.2 Architecture des piles à combustible	– 6
2. Générateur électrique embarqué pile à combustible PEMFC dédié à la mobilité	– 7
2.1 Système global	– 7
2.2 Architecture d'un groupe électrogène à pile à combustible	– 11
2.3 La pile	– 14
3. Le vecteur hydrogène pour les transports	– 15
3.1 Stockage d'hydrogène	– 15
3.2 Production embarquée d'hydrogène	– 17
3.3 Distribution de combustible (infrastructure)/avitaillement des véhicules hydrogène	– 18
4. Véhicules pile à hydrogène commercialisés	– 22
4.1 Automobile et utilitaires légers	– 22
4.2 Véhicules industriels (poids lourds)	– 23
4.3 Bus et car	– 24
4.4 Train	– 25
5. Aspects environnementaux et énergétiques	– 25
5.1 Production et distribution de l'hydrogène	– 25
5.2 Usage du véhicule, considérations énergétiques	– 26
5.3 Seconde vie, recyclage et valorisation pour les véhicules à hydrogène	– 26
5.4 Analyse de cycle de vie du véhicule léger (ACV)	– 27
5.5 ACV poids lourds	– 27
5.6 ACV bus	– 27
6. Aspects économiques	– 29
6.1 Coûts du système pile à combustible	– 29
6.2 Coûts pour les véhicules légers	– 30
6.3 Coûts pour les véhicules lourds	– 31
6.4 Coûts des stations d'avitaillement en hydrogène	– 32
6.5 Coût complet d'usage des véhicules PAC	– 32
7. Engagement des états	– 33
7.1 Europe	– 33
7.2 France	– 34
7.3 Allemagne	– 35
7.4 Japon	– 35
7.5 Chine	– 36
7.6 États-Unis	– 36
8. Conclusion	– 37
9. Sigles, notations et symboles	– 38
Pour en savoir plus	Doc. BM 4 850v2

Le véhicule électrique à hydrogène est avant tout un véhicule électrique, fonctionnant avec une chaîne de traction électrique identique à celle utilisée dans les véhicules électriques à batteries déjà largement répandus. Il n’y a pas lieu d’opposer le véhicule électrique à batterie et le véhicule électrique à pile à combustible utilisant de l’hydrogène. La seule différence, c’est la façon dont l’énergie est stockée et délivrée au moteur électrique. Dans un véhicule à batterie, l’énergie et la puissance proviennent de la batterie. Pour le véhicule à pile à combustible (PAC), l’énergie est stockée sous forme d’hydrogène dans un réservoir, la puissance est définie par la taille de la pile à combustible qui génère l’énergie électrique pour le moteur.

Pour une étude générale sur les piles à combustible, le lecteur se reportera aux articles Combustible hydrogène – Production [BE 8 565], Combustible hydrogène – Utilisation [BE 8 566], Transport électrique routier – Véhicules à pile à combustible [D 5 570] et Hydrogène [J 6 368].

1. Notions de base

Historique des véhicules pile à hydrogène

Les dates clés de l’histoire des véhicules pile à hydrogène.

1839 : The « *fuel cell effect* » Sir William Grove, avocat, philosophe et chimiste anglais du XIX^e siècle, développa une des premières piles à combustible, sur ses propres deniers et à l’aide de grandes quantités de platine fournies gracieusement alors par Johnson Matthey.

1889, Ludwig Mond et Carl Langer furent les premiers à donner à la pile à combustible son nom et sa forme actuelle : des cellules connectées en série par des plaques bipolaires. Ils purent obtenir des courants de 2 à 2,5 A (environ 3 mA/cm²) pour une surface de 700 cm² à une tension de cellule de l’ordre de 0,73 V et pour un chargement total en platine de 1 g de noir de platine (soit 1,43 mg de platine par cm²). Ces résultats constituent les premiers éléments chiffrés représentatifs d’un calcul d’ingénieur pour une application stationnaire. Un kilowatt électrique aurait demandé environ un kilogramme de platine soit environ 12 000 €. Ce coût prohibitif mit un frein important à leurs travaux.

1955 : « the Bacon Cell » Francis Thomas Bacon développe à l’université de Cambridge des piles alcalines (AFC) de l’ordre de 6 kW avec des électrodes de platine et circulation de potasse (KOH) fonctionnant à 150/200 °C. Elles furent testées sur des machines-outils et un chariot élévateur.

À la suite de ces travaux, les premières applications « automobiles » firent leur apparition sous forme de démonstrateurs.

1959 : Harry Ihrig (de Allis Chalmers Company) dévoilait le premier tracteur équipé d’un système de pile alcaline de 15 kW, comportant un empilement de plus de mille cellules. Enfin, ces premières réalisations furent suivies, quelques années plus tard, par un véhicule Austin alimenté par une pile alcaline de 6 kW développée par K.V. Kordesh de Union Carbide. La pile était associée à des batteries plomb acide d’une puissance de 16 kW. L’autonomie était annoncée à 300 km pour 2 kg d’hydrogène dans des bouteilles sous pression d’une masse de 82 kg.

1960 : Thomas Grubb et Léonard Niedrach de General Electric inventent une membrane chargée de platine et échangeuse de proton qui donnera naissance à la PEMFC (*Proton Exchange Membrane Fuel Cell*) sur la mission Gemini 5. Mais elle ne sera pas utilisée dans les transports car les premières membranes

disponibles à cette époque (polystyrène-divinylbenzène inséré dans une matrice fluor carbonée inerte) n’avaient pas les qualités requises (stabilité, conductivité protonique suffisante), si bien que les travaux développés sur les PEMFC furent abandonnés au profit du développement des piles alcalines (AFC).

1960-1980 : Réalisation de plusieurs prototypes de véhicule utilisant des piles AFC (*Alkaline Fuel Cell*).

Présentation en 1966 du General Motors Electovan (figure 1) équipé d’une pile à combustible AFC de 32 kW de puissance continue remarquablement dense en énergie (pour l’époque) et d’une puissance pic de 160 kW. Elle était composée de 32 modules d’électrode mince reliés en série. Le contrôleur du moteur et du groupe motopropulseur était monté sous et entre les sièges avant. Sous le plancher se trouvaient les modules à pile à combustible interconnectés par quelques 550 tuyaux en plastique. Le stockage « carburant » était assez unique : des réservoirs cryogéniques d’hydrogène et d’oxygène et un réservoir d’électrolyte qui contenait quelques 170 litres d’hydroxyde de potassium. L’électrolyte pesait déjà 250 kg et le van 3,2 tonnes. L’Electovan pouvait atteindre 110 km/h avec une autonomie de 240 km. Pour des raisons de sécurité, l’Electovan n’a pas été testé sur route. Peu de temps après sa présentation à la presse, le projet a été abandonné pour des problèmes de coûts.

1980 : Il faut noter cependant que, dès le début des programmes spatiaux, notamment les missions Gemini, les piles à électrolytes polymères solides avaient été sélectionnées pour leur simplicité de construction (assemblage tout solide) et la fiabilité de leur fonctionnement. Ce n’est qu’au début des années 1980, à la suite de la mise au point des membranes Nafion par Dupont de Nemours, que les piles à combustible à membrane échangeuse de protons (PEMFC) connurent un développement spectaculaire.

1990-2007 : L’automobile s’intéresse aux piles à combustible et au développement des prototypes de véhicules équipés de piles PEMFC : Renault Fever (1997), les modèles Daimler-Chrysler Nocar 4 (1999 et 2000) et le petit utilitaire Sprinter (2001) ainsi que des prototypes General Motors, modèle Opel/Zafira/HydroGen1 (2000-2003), Taxi PAC (figure 2) et projet hydrogen de Peugeot, la Lada Antel 2 (2004) (figure 3). Pour une liste complète le lecteur pourra consulter [D 5 570].

2007-2014 : Diffusion en très petite série, véhicules en location par Honda, Toyota, Opel.

2014 et + : Commercialisation par Toyota de la Mirai, par Hyundai du SUV Ix35 fuel cell. C’est le début d’une commercialisation en petit volume.

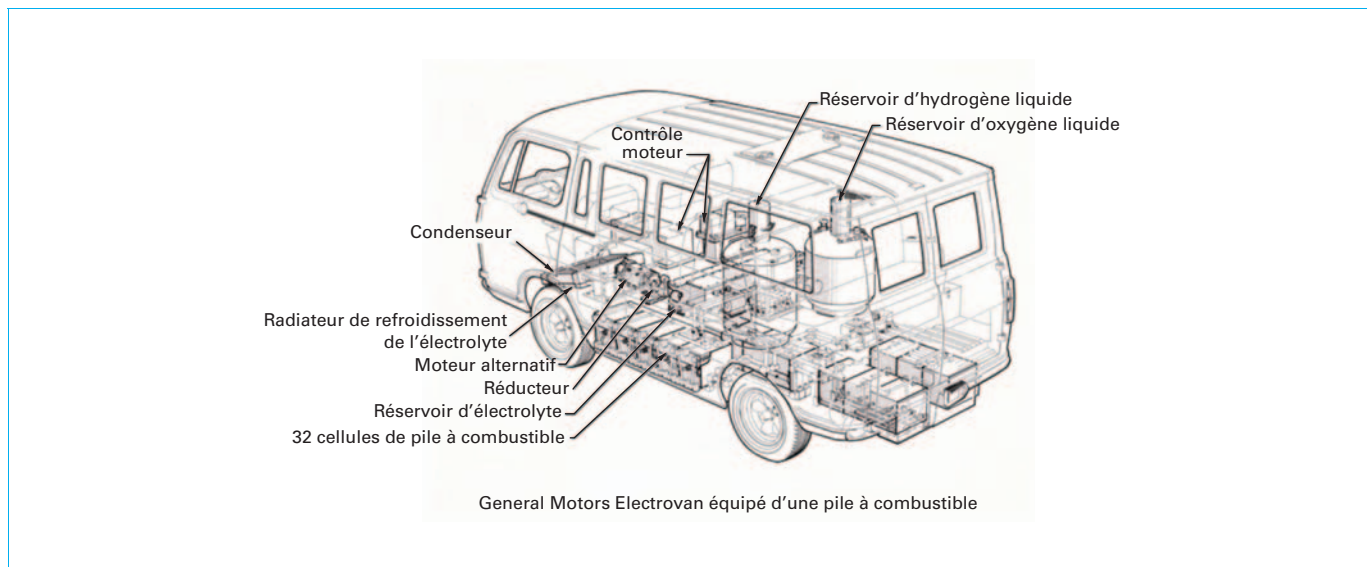


Figure 1 – GM Electrovan (1966)

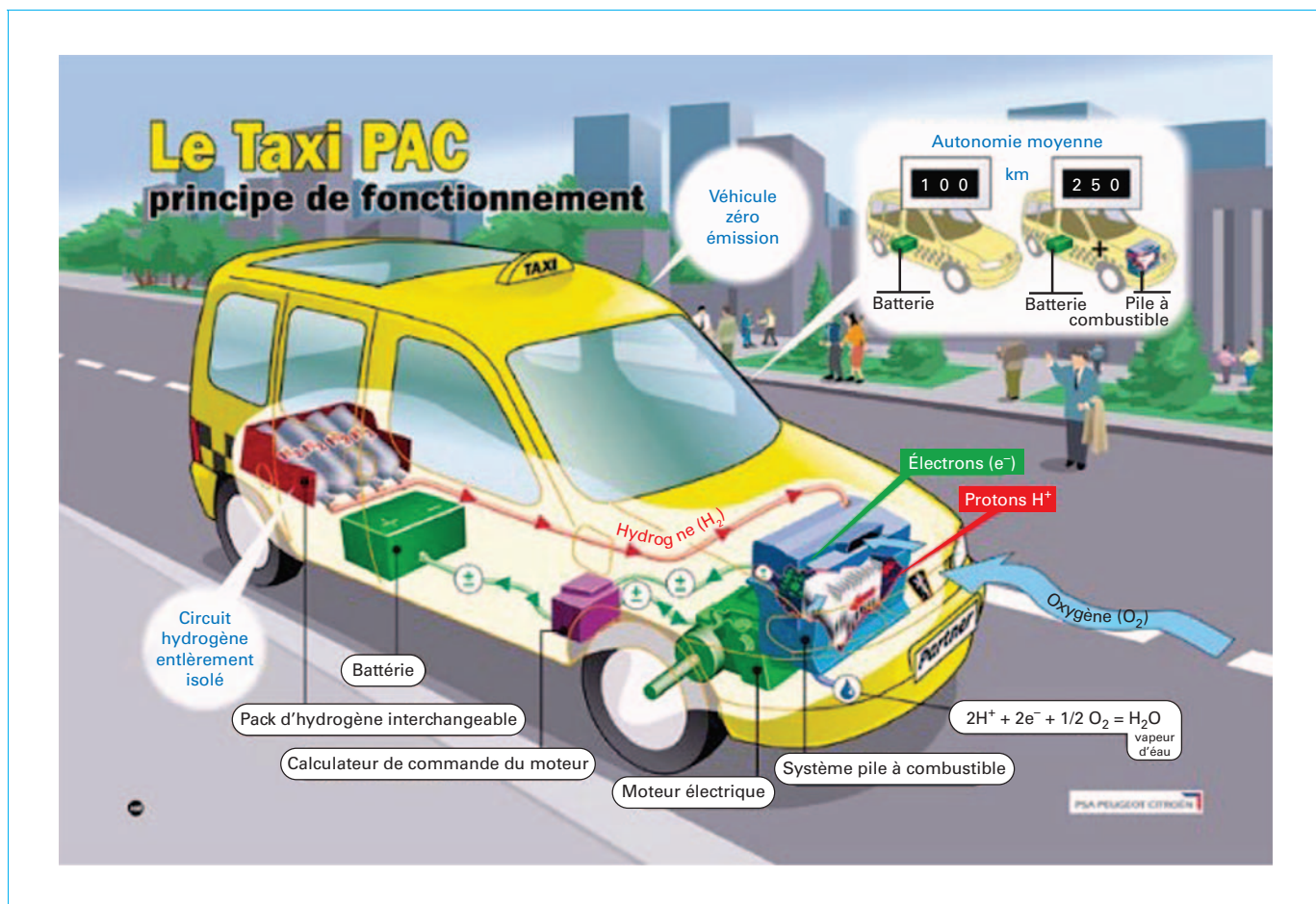


Figure 2 – Taxi pile à combustible (PAC) du groupe PSA (Stellantis)

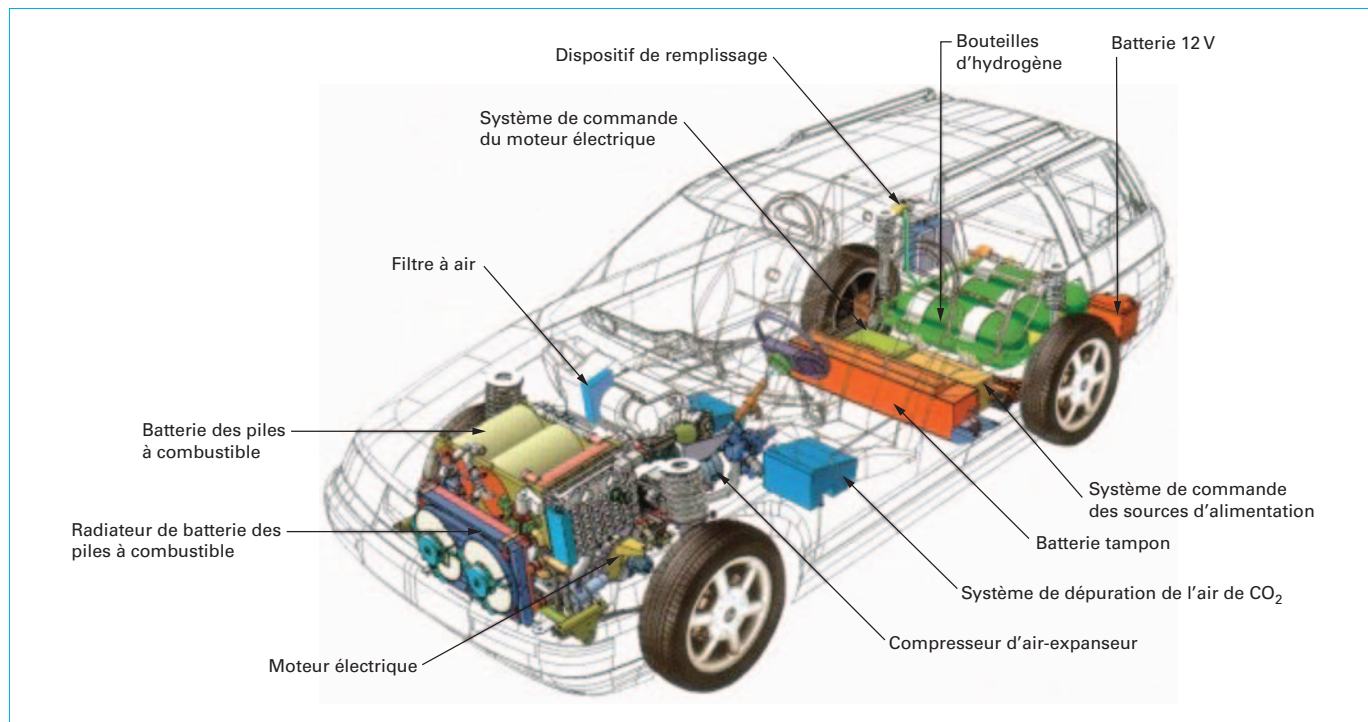


Figure 3 – Lada Antel

Tableau 1 – Réactions aux électrodes, électrolytes et catalyseurs utilisés pour les différents types de piles à combustible

Type de pile	Anode (catalyseur)	Électrolyte	Cathode (catalyseur)	Température [°C]
PEMFC	$H_2 \rightarrow 2 H^+ + 2 e^-$ (Pt)	Polymère acide H^+ (solide)	$1/2 O_2 + 2 H^+ + 2 e^- \rightarrow H_2O$ (Pt)	60 à 90
DMFC	$CH_3OH + H_2O \rightarrow CO_2 + 6 H^+ + 6 e^-$ (Pt)	Polymère acide H^+ (solide)	$1/2 O_2 + 2 H^+ + 2 e^- \rightarrow H_2O$ (Pt)	60 à 90
PAFC	$H_2 \rightarrow 2 H^+ + 2 e^-$ (Pt)	H_3PO_4 (85 à 100 %) H^+ (liquide)	$1/2 O_2 + 2 H^+ + 2 e^- \rightarrow H_2O$ (Pt)	160 à 220
AFC	$H_2 + 2 OH^- \rightarrow 2 H_2O + 2 e^-$ (Pt, Ni)	KOH (8 à 12 N) OH^- (liquide)	$1/2 O_2 + H_2O + 2 e^- \rightarrow 2 OH^-$ (Pt-Au, Ag)	50 à 250
MCFC	$H_2 + CO_3^{2-} \rightarrow H_2O + CO_2 + (Ni + 10 \%Cr)$	$Li_2CO_3 / K_2CO_3 / Na_2CO_3$ CO_3^{2-} (liquide)	$1/2 O_2 + CO_2 + 2e^- \rightarrow CO_3^{2-}$ (NiO lithié)	650
SOFC	$H_2 + O^{2-} \rightarrow H_2O + 2 e^-$ (cermet Ni-ZrO ₂)	ZrO ₂ -Y ₂ O ₃ O ²⁻ (solide)	$1/2 O_2 + 2 e^- \rightarrow O^{2-}$ (pérovskites $LaxSr_{1-x}MnO_3$)	750 à 1 050

PEMFC : Proton Exchange Membrane Fuel Cell ; **AFC** : Alkaline Fuel Cell ; **DMFC** : Direct Methanol Fuel Cell ; **MCFC** : Molten Carbonate Fuel Cell ; **PAFC** : Phosphoric Acid Fuel Cell ; **SOFC** : Solid Oxide Fuel Cell.

1.1 Différents types de pile

Depuis les années 1960 et le début des programmes spatiaux américains de recherche et développement sur les piles à combustible, plusieurs types de classifications ont été utilisés, basés sur des critères tels que le combustible, la température d'utilisation, la nature de l'électrolyte, la géométrie des systèmes, etc. À présent la communauté scientifique a adopté une classification par type d'électrolyte

(correspondant le plus souvent à une température de fonctionnement). Le tableau 1 décrit, pour chaque type de pile, les réactions aux électrodes, les catalyseurs utilisés et l'ion transporté dans l'électrolyte.

Si de nombreuses applications sont envisageables pour ces différents types de piles, en ce qui concerne le transport terrestre public ou particulier, seules les piles **AFC et PEMFC** ont, à ce jour, été utilisées pour la traction, et les piles **SOFC (Solide Oxide Fuel Cell)** envisagées comme source auxiliaire de puissance (APU).

1.1.1 Piles à combustible à membrane échangeuse de protons (PEMFC)

Dans les PEMFC, l'électrolyte utilisé est une membrane polymère à conduction protonique assurée par des fonctions sulfoniques. La classe de produit commercial la plus couramment employée est une membrane perfluorosulfonique, c'est-à-dire que la fonction acide est de type sulfonique et que tous les atomes d'hydrogène associés à des carbones ont été remplacés par des atomes de fluor. Cette substitution permet d'obtenir une acidité très supérieure à celle des acides forts conventionnels (acide sulfurique, chlorhydrique, perchlorique, etc.), et d'assurer à ce polymère proche du Téflon® une grande stabilité chimique dans des environnements réducteurs et oxydants que sont respectivement les milieux anodiques et cathodiques de la pile. Cette membrane est par ailleurs très hydrophile et nécessite d'être parfaitement hydratée pour une conductivité protonique optimale. En effet, le mode de conduction se rapproche fortement d'une conduction liquide pour laquelle le proton est solvate, lors de son déplacement, par plusieurs molécules d'eau. La température de fonctionnement est ainsi limitée à 100 °C afin d'éviter une perte d'hydratation de l'électrolyte par évaporation à pression atmosphérique. La gestion de l'eau dans ce type de pile est un des savoir-faire que doit maîtriser le concepteur tant au niveau de la membrane que du système complet. Un fonctionnement à haute pression pourrait faciliter cette gestion de l'eau mais affecterait par ailleurs le fonctionnement de la pile (cf. 3.1.3).

Le catalyseur utilisé dans ce type de pile à combustible doit être du platine pur ou allié à un métal de transition, afin de résister à l'environnement chimique très acide et de présenter une activité catalytique suffisante à l'électroréduction de l'oxygène et à l'électro-oxydation de l'hydrogène. Réduire les quantités de ce métal a été, au cours des dernières décennies, l'une des principales actions réalisées pour rendre compétitive dans des applications « grand public » cette source d'énergie. Ces quantités, exprimées en milligrammes de platine par unité de surface d'électrode, ont été divisées par cent depuis le début des programmes spatiaux des années 1960 jusqu'à aujourd'hui avec, qui plus est, une augmentation sensible des performances (figure 4). Et les progrès se poursuivent.

Ces progrès ont été rendus possibles par l'utilisation d'électrodes constituées de très petites particules de platine (quelques nanomètres) supportées sur des poudres de carbone développant une grande surface électro-active de catalyseur (jusqu'à plus de 5 m²/g de Pt). Cette amélioration s'est combinée à l'addition d'électrolyte dans la porosité des électrodes, permettant d'utiliser le catalyseur non seulement à l'interface électrode/électrolyte, mais également sur une épaisseur de quelques micromètres. Les électrodes ainsi obtenues permettent de développer des surfaces réactionnelles 100 fois supérieures à la surface géométrique des électrodes. Au point de vue catalytique, si le platine montre un bon niveau de performance avec de l'air ou de l'hydrogène pur, il reste sensible à l'empoisonnement par des produits sulfurés (à partir de quelques

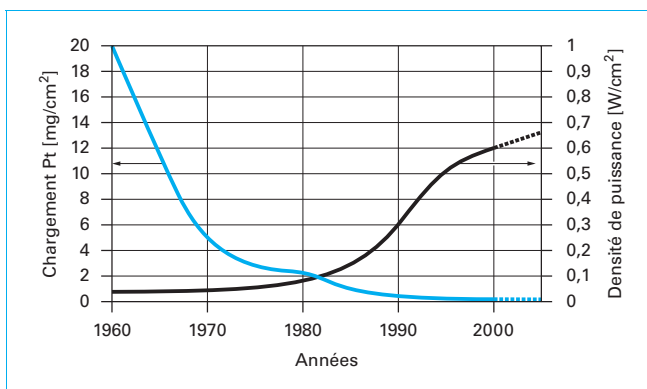


Figure 4 – Évolution du chargement en platine et des performances au cours des dernières décennies (d'après [4])

dixièmes de ppm) ou par le monoxyde de carbone (à partir de quelques dizaines de ppm) lorsque l'hydrogène alimentant l'anode provient du reformage d'hydrocarbures, et à l'empoisonnement par les huiles ou graisses contenues dans l'air du côté cathodique. Si, à la cathode, ce problème peut être résolu par l'emploi de filtres adaptés, à l'anode le gaz doit être désulfuré et le catalyseur doit être modifié en alliant le platine à des métaux de transition. La résistance à ces empoisonnements nécessite généralement une augmentation significative des quantités de platine présentes dans les électrodes.

Enfin, le dernier élément important dans ce type de pile concerne les plaques séparatrices (ou plaques bipolaires). Leurs fonctions sont de séparer, dans un empilement, l'anode d'une cellule de la cathode de la cellule suivante, d'acheminer le courant électrique d'une cellule à l'autre, et de distribuer les gaz à la surface des électrodes. Ces plaques devront donc être conductrices électroniques, isolantes ioniques, et résister chimiquement à un environnement oxydant (oxygène de l'air), à un environnement réducteur (hydrogène) et à l'eau (produit de la réaction). Elles sont la plupart du temps constituées de graphite imprégné de résine phénolique et usinées afin de dessiner sur chacune des faces des canaux de distribution des gaz. Si le graphite est très stable chimiquement et très bon conducteur, son usinage devient très coûteux pour des productions de série. Il est maintenant dans une grande majorité d'application remplacé par des métaux emboutis ou par des composites moulés ou injectés à base de carbone, les principaux freins rencontrés étant respectivement la résistance à la corrosion des métaux dans ce milieu agressif et les faibles conductivités et tenue mécanique des composites.

Ces plaques bipolaires assurent généralement la fonction de plaque de refroidissement par le passage dans leur épaisseur d'un fluide caloporteur.

1.1.2 Piles à combustible alcalines (AFC – Alkaline Fuel Cell)

Ce sont historiquement les premières piles à avoir connu un développement « industriel » pour une application spécifique, la conquête spatiale. En effet, depuis le programme Apollo, des piles à combustible alcalines ont été présentes dans tous les vols habités de la NASA. Ces piles, possédant un électrolyte alcalin (potasse), présentent l'avantage de pouvoir fonctionner sans l'utilisation de métaux nobles avec, pour catalyseurs, du nickel Raney à l'anode et de l'argent à la cathode. De plus, la cinétique de réduction semble plus favorable en milieu alcalin qu'en milieu acide.

Les inconvénients majeurs des piles alcalines sont :

- la très grande sensibilité de l'électrolyte au gaz carbonique, provoquant la précipitation de carbonates diminuant rapidement la conductivité ionique. Le gaz carbonique est présent dans l'air et dans l'hydrogène quand il provient du reformage d'hydrocarbures. Cette présence impose soit l'adjonction d'une unité de décarbonation en amont de la pile, soit la nécessité d'une circulation et d'un traitement de l'électrolyte. Cette circulation pourrait être mise à profit pour évacuer tout ou partie de l'excès de chaleur produit par le fonctionnement de la pile. Dans tous les cas, la complexité du système entourant la pile s'en trouve augmentée ;
- la corrosion des électrodes et autres pièces métalliques provoquée par l'électrolyte liquide qui conduit à des choix de matériaux au coût élevé, et limite la durée de vie. Ce constat serait à corriger en cas de mise au point d'une membrane anionique solide ;
- comme l'eau formée se retrouve dans l'électrolyte il est nécessaire de mettre en place un système pour séparer l'eau de la potasse ce qui grève le coût, la masse et le volume.

Les recherches et développements ont grandement diminué sur ce type de pile car elles restent très en retrait en performances massiques et volumiques, par rapport au concurrent direct la PEMFC. Les recherches plus amont concernent le développement de membranes alcalines à conduction par ions hydroxydes. Aujourd'hui seules quelques entreprises comme Energy PLC2 (Royaume-Uni) et GenCell Energy (Israël) sont encore actives sur les piles AFC pour les applications stationnaires.

1.1.3 Piles à combustible à oxyde solide (SOFC)

Ce sont les piles fonctionnant aux plus hautes températures, de 800 à 1 000 °C. Du fait de cette température élevée, elles présentent l'avantage de ne pas nécessiter l'utilisation de métaux nobles pour augmenter les cinétiques de réaction et de pouvoir être alimentées par d'autres combustibles que de l'hydrogène pur. En effet, un gaz tel que le monoxyde de carbone, considéré comme un poison jusqu'à 200 °C, devient un combustible au-delà de 600 à 700 °C puisqu'il s'oxyde presque aussi facilement que l'hydrogène. De même le méthane (ou le gaz naturel), inerte électrochimiquement au-dessous de 300 à 400 °C, devient un combustible à haute température. Ces piles sont principalement constituées de céramiques de différentes natures pouvant être associées à un métal comme dans le cas des anodes en nickel cermet (association céramique-métal). La conduction ionique se fait par ions oxydes (O²⁻) dans un électrolyte de type zirconie yttrée. Aux électrodes, comme dans le cas de tous les autres types de pile, les réactions se dérouleront sur les sites où seront présents trois phases :

- un conducteur électronique apportant ou évacuant des électrons pour les réactions respectives de réduction et d'oxydation ;
- un conducteur ionique (oxyde) évacuant les ions de la cathode pour les transporter à l'anode ;
- un milieu poreux acheminant les gaz réactifs et éliminant les produits de réaction ou n'ayant pas participé à la réaction.

Les SOFC évoluant à très haute température, les coefficients de dilatation de chacun des constituants jouent un rôle prépondérant sur le cyclage thermique et la durée de vie ; des coefficients trop éloignés auraient un effet désastreux sur le plan des contraintes mécaniques. Le cyclage thermique est également limité par la nature des joints d'étanchéité des cellules. Les seuls joints efficaces à haute température sont des joints en verre, mais qui ne supportent pas le refroidissement car ils craquent lors de la solidification une fois en place. Plusieurs architectures ont été développées dont la configuration tubulaire (Westinghouse) et la configuration planaire. Si la configuration tubulaire ne requiert qu'une très faible surface d'étanchéité, la configuration planaire, en revanche, expose de grandes surfaces. Les recherches en cours visent à diminuer les températures de fonctionnement aux environs de 700 °C afin de pouvoir utiliser des matériaux métalliques comme constituants des joints et comme interconnecteurs. Pour atteindre ces températures, de nouveaux matériaux d'électrodes et d'électrolyte doivent être développés ainsi que les procédés de dépôts associés. Un autre axe de recherche consiste à utiliser, dans les électrodes, des matériaux conducteurs mixtes (ioniques et électroniques) afin de simplifier la structure des électrodes et de favoriser le triple contact entre les phases ioniques, électroniques et gazeuses.

Les constructeurs automobiles se sont intéressés aux SOFC car ces piles peuvent utiliser directement les combustibles fossiles classiques déjà distribués, mais elles présentent encore un temps de mise en température élevé et ne résistent pas aux cyclages marche/arrêt.

1.2 Architecture des piles à combustible

Quel que soit le type de pile à combustible, la tension maximale (à circuit ouvert) aux bornes d'une cellule est de l'ordre du potentiel thermodynamique de l'eau (1,23 V), fonction des conditions de température et de pression et des concentrations de réactifs et de produits suivant la loi de Nernst. Dès qu'un courant est produit, cette valeur diminue significativement du fait de l'apparition aux électrodes des surtensions d'activation et de concentration et des pertes chimiques. Les tensions d'utilisation nominales sont habituellement de 0,6 à 0,8 V par cellule unitaire en fonction de la technologie considérée.

Quant aux densités de courant générées, elles varieront de 0,1 à 1 A/cm². Afin de dimensionner une pile en courant et tension, il faudra donc agir respectivement sur la taille et le nombre de cellules connectées en série. Cette mise en série pourra se faire

principalement suivant la technologie planaire (empilement filtre-pressé) ou la technologie tubulaire :

- dans le cas d'un empilement planaire, toutes les cellules sont empilées et connectées électriquement en série. Chaque cellule est séparée de la suivante par une plaque bipolaire dont la fonction est de distribuer les réactifs sur chaque électrode, de séparer les compartiments anodique et cathodique de deux cellules consécutives de façon étanche, et d'acheminer le courant d'une cellule à l'autre (figure 5). Ces plaques bipolaires (ou interconnecteurs) peuvent également être utilisées pour gérer thermiquement les piles, par addition dans l'épaisseur de la plaque d'un circuit de refroidissement. L'avantage principal de cette configuration est sa compacité. L'inconvénient majeur est le maintien de l'étanchéité. En effet, un joint doit entourer complètement les électrodes pour empêcher les réactifs de fuir vers l'extérieur de la cellule. Ce joint s'appuiera d'une part sur l'électrolyte et d'autre part sur la plaque bipolaire ;

- en ce qui concerne la configuration tubulaire, à ce jour réservée aux SOFC, des tubes (ou doigts de gant) de céramiques recouvertes du matériau d'anode sur leur face externe et du matériau de cathode sur leur face interne sont plongés dans l'environnement combustible alors que le comburant (l'air) circule à l'intérieur. Cette configuration permet de ne requérir une étanchéité qu'à l'extrémité des tubes. De plus cette géométrie adaptée aux hautes températures permet aux contraintes thermiques dues aux différences de coefficients de dilatation de se répartir de façon radiale à la périphérie du tube. L'inconvénient majeur de cette géométrie provient du manque de compacité d'un empilement de tubes et également de la difficulté technique à mettre en série plusieurs tubes consécutifs puisqu'une cathode (intérieur du tube) doit être reliée à une anode (extérieur du tube) dans l'empilement.

À retenir

- Pour le transport terrestre, seules les piles AFC et PEMFC ont été utilisées pour la mobilité électrique.
- Dans les PEMFC, l'électrolyte utilisé est une membrane polymère à conduction protonique assurée par des fonctions sulfoniques. Le catalyseur est du platine pur ou allié à un métal de transition, Fonctionnement à 50/90 °C.
- Les piles AFC possèdent un électrolyte alcalin (potasse), n'utilisant pas de métaux nobles avec, pour catalyseurs, du nickel Raney à l'anode et de l'argent à la cathode. Fonctionnement à 50/250 °C.
- La tension maximale (à circuit ouvert) aux bornes d'une cellule est de l'ordre du potentiel thermodynamique de l'eau (1,23 V), les tensions d'utilisation nominales sont habituellement de 0,6 à 0,8 V.

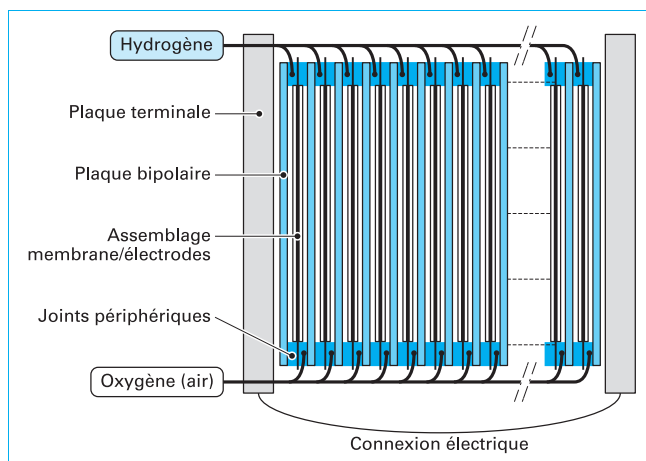


Figure 5 - Configuration filtre-pressé d'un empilement de pile à combustible (exemple d'une PEMFC)

2. Générateur électrique embarqué pile à combustible PEMFC dédié à la mobilité

Pour les applications mobilité la technologie retenue qui répond au cahier des charges automobile est la technologie **PEMFC**.

2.1 Système global

2.1.1 Description

Une pile à combustible ne peut fonctionner seule ; elle a besoin d'être associée à des périphériques auxiliaires qui assureront des fonctions aussi essentielles qu'acheminer les réactifs, évacuer les produits ou gérer la température de l'empilement. Ces auxiliaires, s'ils sont nécessaires au fonctionnement de la pile, n'en sont pas moins des consommateurs d'énergie parasitant directement la production de la pile.

Le système est globalement constitué d'un circuit combustible, d'un circuit comburant et d'une boucle de refroidissement. Un système d'humidification vient généralement compléter cet ensemble. Il peut être couplé à la boucle de refroidissement ou indépendant (figure 6). On distinguera généralement les différents types de systèmes de piles à combustible par la pression à laquelle ils travaillent (dimensionnant la taille du compresseur d'air) et par le combustible qu'ils utilisent : hydrogène stocké sous forme liquide ou gazeuse, hydrogène stocké sous forme d'hydrure, combustible à reformer (généralement un hydrocarbure ou un alcool dont on extrait l'hydrogène par une opération de reformage), combustibles liquides pour oxydation directe. Ces distinctions auront un fort impact sur les performances nettes du groupe électrogène, la qualité des réactifs (présence d'impuretés dans les gaz) et les consommations parasites des auxiliaires affectant le rendement global du système. L'architecture du groupe électrogène sera également fortement dépendante de ces auxiliaires.

Les performances d'un système sont généralement exprimées par rapport à leurs puissances massique et volumique, mais également en termes de rendement. Le rendement du système dépendra

de celui de la pile à combustible affecté des pertes parasites dues aux auxiliaires et variera avec la puissance demandée.

2.1.2 Rendement d'une pile

■ Rendement théorique ε_r

Le rendement théorique d'une pile à combustible à l'équilibre ε_r est donné par la relation suivante :

$$\varepsilon_t = \frac{W_e}{-\Delta H} = \frac{nFE_{eq}}{-\Delta H} = \frac{\Delta G}{\Delta H} = 1 - \frac{T\Delta S}{\Delta H} \quad (1)$$

avec	n	nombre d'électrons échangés dans la réaction,
	F	nombre de Faraday (charge d'une mole d'électrons),
	E_{eq}	tension thermodynamique (potentiel thermodynamique défini par les équations de Nernst),
	W_e	travail électrique fourni,
	ΔH	enthalpie de réaction,
	ΔS	variation (isotherme) d'entropie,
	ΔG	enthalpie libre de réaction (et $\Delta G = \Delta H - T\Delta S$).

■ Rendement pratique ε_E

Le rendement pratique ε_E de la pile prend en compte les surtensions dues aux réactions électrochimiques et aux résistances ioniques et électroniques présentes dans la pile. Typiquement, ce rendement s'exprime par le rapport de la tension de cellule à la densité de courant considérée $E(i)$ à la tension à l'équilibre (à circuit ouvert) E_{eq} de la pile :

$$\varepsilon_E = \frac{E(i)}{E_{eq}} \quad (2)$$

$$E(i) = E_{eq} - \eta_a(i) - \eta_c(i) - \Sigma r i \quad (3)$$

avec	i	densité de courant,
	η_a et η_c	surtensions anodique et cathodique,
	Σr	somme des résistances ioniques et électroniques.

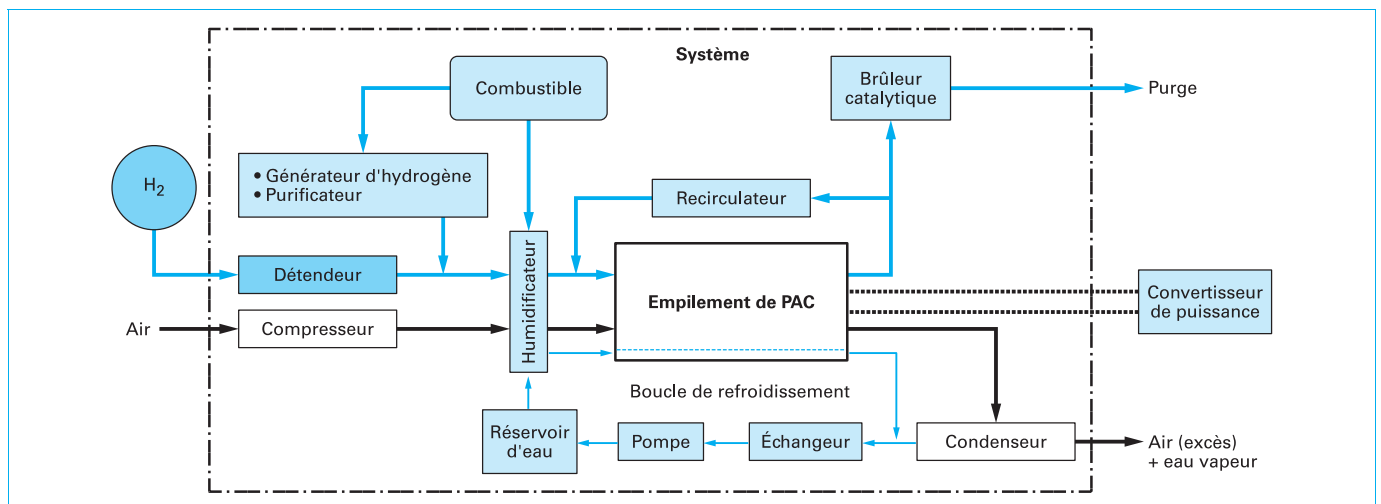


Figure 6 – Schéma de principe d'un système à pile à combustible

Rendement faradique ϵ_F

Enfin, il faut inclure la contribution faradique du rendement ϵ_F correspondant à l'efficacité de la réaction et rendant compte des réactions parasites possibles. Généralement, avec du platine et de l'hydrogène, ce rendement est très proche de 1. Il sera affecté par l'oxydation de CO à l'anode dans le cas d'hydrogène provenant d'un reformeur puisqu'une certaine quantité d'électricité (des électrons) sera utilisée par des réactions annexes, ou par la production d'eau oxygénée à la cathode, montrant une réaction incomplète à deux électrons au lieu de quatre pour produire de l'eau.

Rendement total ϵ_{tot}

Le rendement total de la pile sera le produit de ces trois contributions :

$$\epsilon_{tot} = \epsilon_r \epsilon_E \epsilon_F = \frac{nFE_{eq} E(i)}{-\Delta H E_{eq}} \epsilon_F = -\frac{nF}{\Delta H} E(i) \epsilon_F \quad (4)$$

et $-\frac{\Delta H}{nF}$ peut être considéré comme une tension idéale $E_{idéal}$ ne tenant pas compte des irréversibilités.

Elle est définie à partir de l'enthalpie ΔH , et non de l'enthalpie libre ΔG , et ne prend pas en compte la contribution entropique $T\Delta S$. Cette expression est parfois qualifiée de « **tension de chaleur nulle** », et correspondrait à un fonctionnement purement électrique sans production de chaleur. Cette « tension » prendra deux valeurs très différentes suivant que l'eau produite par la réaction sera sous forme liquide ou gazeuse. Ces deux valeurs correspondent aux notions de pouvoir calorifique supérieur (PCS) et pouvoir calorifique inférieur (PCI), utilisés couramment par les motoristes.

Le rendement d'une cellule de pile à combustible devient donc :

$$\epsilon_{tot} = \frac{E(i)}{E_{idéal}} \epsilon_F \quad (5)$$

Le tableau 2 regroupe les valeurs de tension caractéristique d'une pile à combustible hydrogène/oxygène (air).

Ainsi le rendement maximal d'une cellule correspondra au rapport de la tension thermodynamique à la tension de « chaleur nulle », et sera au maximum de 98 % ou de 85 % selon que l'on considère la tension correspondant au PCI ou au PCS. Si l'on prend en compte les pertes de tension d'une cellule en fonctionnement, dues à la cinétique des réactions électrochimiques, à la diffusion des réactifs dans les électrodes, ou encore aux pertes ohmiques dans les électrodes et dans l'électrolyte, la tension pratique de fonctionnement d'une cellule de pile est inférieure à 1 V.

Exemple

Pour une tension de 0,7 V, avec un rendement faradique proche de 100 %, et en considérant la tension de chaleur nulle correspondant au PCI (cf. tableau 2), le rendement de cellule devient :

$$\epsilon_{tot} = \frac{E(i)}{E_{idéal}} \epsilon_F = \frac{0,7}{1,25} \times 100 = 56 \%$$

La figure 7 illustre les différences de rendements de cellule obtenues selon que l'on considère les tensions de « chaleur nulle » correspondant au PCI ou au PCS.

Rendement matière ϵ_{mat}

Au rendement de cellule il convient encore d'affecter le rendement matière du combustible. Il correspond à la quantité de combustible utilisée par rapport au besoin théorique. Il existe plusieurs modes d'approvisionnement des cellules en combustible : en circulation, en sortie fermée et en recirculation.

Dans le cas de la simple circulation, le combustible est envoyé à l'anode avec un excédent assurant l'élimination des impuretés et de l'eau. Cet excédent de débit de gaz est généralement de l'ordre de 5 à 20 % par rapport au courant débité par la pile. Il est ensuite rejeté vers l'extérieur de la cellule et brûlé pour répondre aux

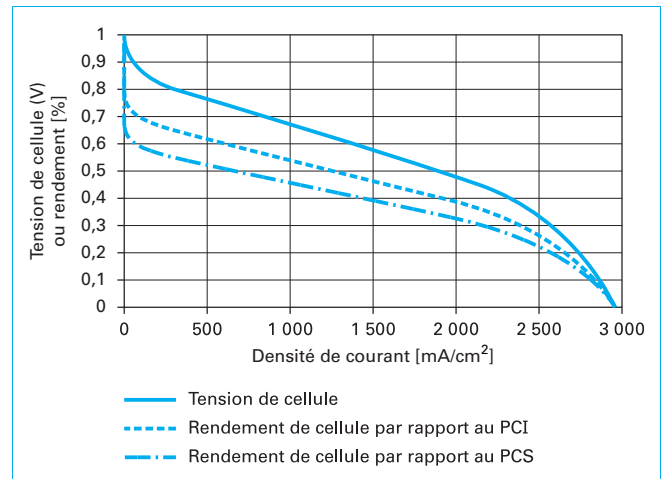


Figure 7 - Courbe de polarisation et rendements correspondants

Tableau 2 – Tensions caractéristiques d'une pile à combustible hydrogène/oxygène dans des conditions standards de pression et de température à 25 °C et sous 1 bar

Tension caractéristique	Définition	Valeurs des enthalpies et enthalpie libre [kJ/mol]	Équivalent des expressions en tension
Tension thermodynamique	$-\frac{\Delta G_{H_2O}}{nF}$	$\Delta G_{H_2O} = -237,3$	1,23 V
Tension de « chaleur nulle » (PCI)	$-\frac{\Delta H_{H_2O}^{gaz}}{nF}$	$\Delta H_{H_2O}^{gaz} = -242,0$	1,25 V
Tension de « chaleur nulle » (PCS)	$-\frac{\Delta H_{H_2O}^{liq}}{nF}$	$\Delta H_{H_2O}^{liq} = -286,0$	1,48 V

besoins en chaleur des composants du système (reformeur, échangeur, humidificateur).

Dans le cas de la sortie fermée (*dead-end*), la quantité de combustible consommée correspond exactement au courant débité. Ce mode présente l'avantage théorique d'une consommation optimisée de combustible. Cependant, du fait du fonctionnement en mode fermé, la présence d'impuretés dans le circuit anodique, même à de très faibles quantités, est rédhibitoire, et leur concentration progressive entraîne la nécessité de purges régulières du circuit. Ces impuretés peuvent provenir du mode de production de l'hydrogène, mais également de la diffusion de la cathode vers l'anode d'espèces non réactives contenues dans le comburant.

Les purges correspondent généralement à une surconsommation de l'ordre de 2 à 5 %.

Enfin, pour ce qui concerne la recirculation, le combustible est envoyé à l'anode avec un fort excédent pouvant atteindre 100 %. Le réactif non consommé est réinjecté en tête de cellule à l'aide d'un recirculateur (pompe). Comme dans le cas précédent, ce mode est propice à la concentration d'impuretés et nécessite des purges régulières du circuit anodique, induisant des surconsommations de l'ordre de 2 à 5 %.

Le rendement matière sera défini comme étant le rapport de la consommation théorique calculée à partir du courant débité (et éventuellement du nombre de cellules) au débit réel de gaz.

Exemple

Dans le cas précédent, avec une surconsommation de 5 %, le rendement de cellule deviendrait :

$$\epsilon_{\text{tot}} = \frac{E(i)}{E_{\text{idéal}}} \epsilon_F \epsilon_{\text{mat}} = \frac{0,7}{1,25} \times 100 \times \frac{1}{1,05} = 53 \%$$

Rendement des auxiliaires ϵ_{aux}

Ce rendement rend compte de la consommation parasite des auxiliaires nécessaires au fonctionnement de la pile tels que le compresseur d'air, les pompes de circulation du fluide de refroidissement ou de recirculation du combustible, le reformeur, le convertisseur et tout autre appareil du système consommateur d'électricité. Il ne varie pas nécessairement d'une façon linéaire en fonction de la demande de puissance, en raison de l'existence des consommations résiduelles. Chaque auxiliaire contribuera à diminuer le rendement global. La figure 8 montre l'évolution du rendement depuis la cellule jusqu'au système.

Exemple

Les courbes de la figure 8 sont établies à partir des mêmes hypothèses que pour les calculs précédents. Ainsi pour une tension moyenne de 0,7 V par cellule, le rendement, initialement de 56 % chute à 53 %, si l'on considère la perte de combustible, puis à 43 % du fait des auxiliaires présents dans le système.

Cette figure 8 illustre également le comportement du rendement d'un système de pile en fonction de la puissance avec, en particulier, un rendement très faible aux basses puissances, dû à des consommations résiduelles parasites des auxiliaires même si la pile ne débite pas de courant.

2.1.3 Influence de la température et de la pression des réactifs sur les performances de la pile

Les performances électrochimiques d'une pile à combustible seront fortement dépendantes des conditions de température et de pression. En effet une augmentation de température permettra :

- (i) d'améliorer les cinétiques électrochimiques des réactions aux électrodes et donc de diminuer les surtensions d'activation ;
- (ii) d'augmenter la diffusion des gaz dans les électrodes, repoussant les limitations en courant de la pile ;

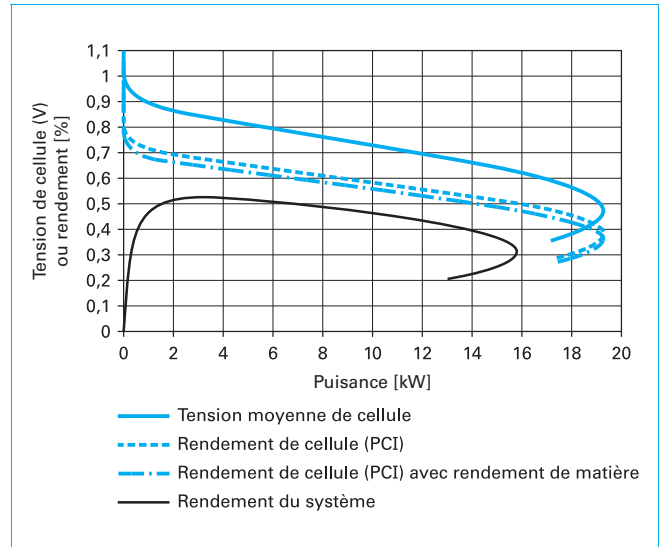


Figure 8 – Évolution du rendement de la cellule au système pour un empilement simulé de 100 cellules de 200 cm², fonctionnant avec un compresseur d'air

(iii) de diminuer la chute ohmique, notamment dans la membrane conductrice protonique, grâce à une augmentation de la conductivité ionique.

Cependant, une augmentation trop importante de la température avec les électrolytes actuels au-delà de 90 à 100 °C provoquerait, par assèchement de la membrane, une chute rapide des performances. C'est la raison pour laquelle la pile est généralement refroidie et maintenue à une température de l'ordre de 80 °C, et les gaz la plupart du temps humidifiés avant de pénétrer dans la pile afin qu'ils ne puissent réduire le contenu en eau de la membrane en se chargeant à son contact. De même, l'augmentation de la pression des réactifs permettra d'améliorer considérablement les performances de la pile. Cependant, si l'élévation de température est due à la production de chaleur par les réactions électrochimiques de la pile elle-même et aux échauffements par effet Joule, la pressurisation de l'air sera coûteuse en énergie. En effet, un compresseur devra être associé à la pile à combustible. Un compromis devra donc être trouvé afin d'évaluer, d'une part, les pertes d'énergie dues au compresseur et, d'autre part, le gain apporté par la compression des gaz, le gain moyen de performances devant rester supérieur aux pertes moyennes.

Les figures 9 et 10 illustrent l'intérêt d'augmenter la température de la cellule et la pression des gaz, ainsi que le gain net de performance obtenu, prenant en compte l'énergie de compression (figure 11 et tableau 3).

L'effet de l'augmentation de la température est de diminuer la pente de la partie linéaire de la courbe de polarisation, de diminuer la perte en tension aux faibles densités de courant et de repousser le courant limite vers de plus fortes valeurs. L'effet de l'augmentation de la pression est de diminuer les surtensions d'activation et de repousser également encore le courant limite en favorisant la diffusion des gaz dans les électrodes.

À présent, si l'on considère l'énergie consommée par la compression de l'air correspondant à la production d'une mole d'eau par la pile, elle peut être exprimée par :

$$E_{\text{compression}} = \frac{n_{\text{H}_2}}{2} \frac{St_{\text{air}}}{X_{\text{O}_2}} \frac{\gamma}{\gamma - 1} RT \left[\left(\frac{P_{\text{sortie}}}{P_{\text{entrée}}} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}} - 1 \right] \quad (6)$$

avec S_{air} rapport à la stœchiométrie côté cathodique,
 X_{O_2} fraction molaire d'oxygène dans l'air,
 γ rapport des capacités thermiques (C_p/C_v) pris égal à 1,4 dans le cas de l'air,
 P pression à l'entrée et à la sortie du compresseur.

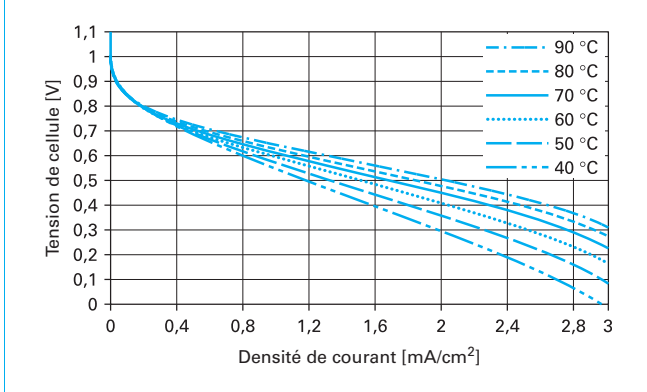


Figure 9 – Évolution simulée de la courbe de polarisation d'une cellule de pile fonctionnant à 1,5 bar pour différentes températures

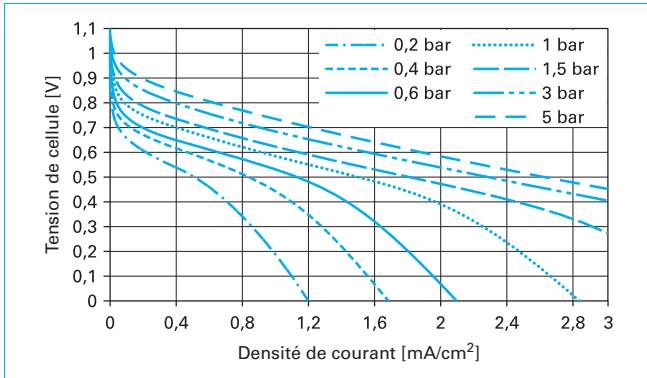


Figure 10 – Évolution simulée de la courbe de polarisation d'une cellule de pile fonctionnant à 80 °C, à différentes pressions d'hydrogène et d'oxygène

À partir de cette relation, il est possible de quantifier l'énergie consommée par la compression de l'air rapportée au pouvoir calorifique du combustible (PCI) pour différentes stœchiométries (figure 11).

Les courbes de la figure 11 ne prennent en compte que l'énergie théorique de compression ; en toute rigueur, il convient de diviser ces valeurs par le rendement du compresseur (de 50 à 80 %), soit une augmentation de l'énergie consommée de 25 à 100 %. Cette dépense d'énergie est à comparer au gain engendré par l'augmentation de la pression (figure 10).

Considérant un rendement de compression de 80 % et un facteur stœchiométrique de 2, le tableau 3 illustre la consommation parasite obtenue et le gain engendré en performance à différentes pressions et pour différentes densités de courant caractéristiques des trois régions de la courbe de polarisation :

- 0,1 A/cm² pour la partie dominée par les phénomènes d'activation ;
- 1 A/cm² pour la partie linéaire dominée par les phénomènes ohmiques ;
- 2,8 A/cm² pour la partie de la courbe où la tension est limitée par les phénomènes de diffusion.

Le tableau 3, établi pour des simulations à 80 °C, montre que, si les performances d'une cellule de pile à combustible augmentent logiquement avec la pression, le résultat net obtenu n'est positif,

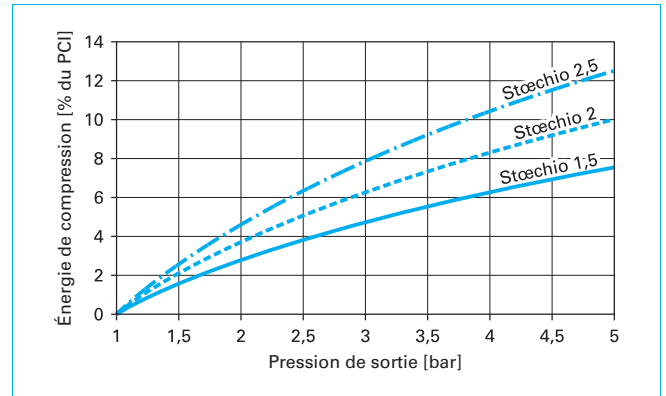


Figure 11 – Évolution de l'énergie nécessaire à la compression (exprimée en pourcentage du pouvoir calorifique inférieur) en fonction de la pression et du rapport à la stœchiométrie en oxygène

Tableau 3 – Exemples de gains et de consommations parasites dus à la compression des réactifs

Pression [bar]	Perte [% PCI]	Perte [mV]	Gain par rapport à 1 bar [mV]			Différence [mV]		
			0,1 A/cm ²	1 A/cm ²	2,8 A/cm ²	0,1 A/cm ²	1 A/cm ²	2,8 A/cm ²
1,5	2,6	33	35	38	312	+ 2	+ 6	+ 279
2	4,7	59	60	64	374	+ 1	+ 5	+ 315
3	7,9	99	95	100	415	- 4	+ 1	+ 316
4	10,5	131	120	126	442	- 11	- 5	+ 311
5	12,6	157	140	145	462	- 17	- 12	+ 305

(1) Cette perte inclut le rendement du compresseur.

(2) La différence est positive lorsque la compression apporte un gain global de performance et négative lorsqu'elle engendre une perte.

pour les densités de courant faibles et moyennes, que jusqu'à environ 3 bar. Seules les fortes densités de courant justifient la compression par un gain net d'environ 300 mV (25 % du PCI) quelle que soit la pression d'oxygène.

Dans ces exemples n'est pas prise en compte la possible récupération de l'énergie mécanique contenue dans les gaz en sortie de pile. Ainsi, le compresseur, conditionnant l'air avant la pile, pourra être couplé à une turbine (électriquement ou mécaniquement sur un même axe) en sortie de pile afin de diminuer l'énergie de compression. Plus le facteur stœchiométrique sera grand, plus il y aura d'air en sortie de pile, et plus cette récupération sera importante.

2.1.4 Humidification et refroidissement

L'humidification des réactifs peut jouer un rôle primordial dans le fonctionnement des piles de type PEMFC (cf. § 2.1.1). Pour éviter l'assèchement de l'électrolyte et la dégradation des performances, un apport d'eau aux gaz réactifs est généralement prévu en entrée de pile. Cet apport se fera soit par un humidificateur indépendant de la pile, généralement par contact direct avec de l'eau liquide, soit par l'injection de gouttelettes d'eau dans l'un ou (et) l'autre des réactifs. Quel que soit le mode d'humidification utilisé, cela met en jeu la vaporisation de l'eau, phénomène endothermique. Cette consommation d'énergie, dans le cas de l'injection directe d'eau, peut être utilisée pour refroidir la pile. Dans le cas général d'utilisation d'un humidificateur à membrane ou par bullage, une source thermique présente dans le système doit fournir cette énergie. Pour cette raison, le circuit d'humidification est régulièrement couplé au circuit de refroidissement, afin d'utiliser l'excès de chaleur produit pour humidifier les gaz. Le fluide caloporteur est ensuite dirigé vers un échangeur à air (radiateur) avant d'être réinjecté dans la pile. Ce circuit de refroidissement ne se limite pas à la pile et à l'humidificateur, le système est en effet constitué de nombreuses sources de chaleur telles que les réactions électrochimiques, le compresseur, les pompes, les convertisseurs électriques et éventuellement le vaporeformeur, associés à deux « puits » principaux que sont les deux humidificateurs de réactifs et, dans une moindre mesure, la détente de l'hydrogène lorsqu'il est stocké sous haute pression.

Cet échangeur représente, à l'heure actuelle, un des points « durs » des systèmes de piles à combustible basse température. Du fait des faibles différences de température entre la température de fonctionnement de la pile (70 à 85 °C) et la température

ambiante (0 à 45 °C), la surface d'échange entre le circuit de refroidissement et l'air doit être très importante, imposant l'intégration dans les véhicules de radiateurs de très grandes dimensions. Des recherches et développements sont en cours pour optimiser ces échangeurs et surtout pour augmenter la température de fonctionnement des piles.

2.2 Architecture d'un groupe électrogène à pile à combustible

2.2.1 Dimensionnement de la pile. Cahier des charges

Le dimensionnement d'un groupe électrogène à pile à combustible (hybridé ou non) se fera sur la base des performances du véhicule sur un cycle normalisé ou à vitesse constante, ou par rapport à une accélération ou un démarrage (à plat ou en côte). La puissance nominale sera définie par rapport à une performance soutenue, comme le maintien de la vitesse maximale ou d'une vitesse imposée au cours de l'ascension d'une côte, alors que le pic de puissance sera défini par rapport à une performance instantanée (accélération, démarrage). Ces performances, nominale ou instantanée, seront traduites en termes de puissance et de temps, avec des profils adaptés à chaque catégorie de véhicule. Depuis le 1^{er} janvier 2019, le WLTP (*Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedure*) du MVEG (Motor Vehicle Emission Group, directive 91/441 relative aux émissions – directive 93/116 relative aux consommations). Ces deux cycles sont présentés sur la figure 12.

Ce nouveau protocole, de portée mondiale, permet de mesurer les rejets d'émissions et la consommation des véhicules thermiques, mais aussi l'autonomie des véhicules électriques, tout en étant plus proche des conditions d'utilisation réelle. Ce cycle, beaucoup plus réaliste que le cycle NEDC (*New European Driving Cycle*) remplace définitivement le cycle NEDC, couvre un maximum de conditions réelles de conduite : circulation en cycles urbain, extra-urbain ou encore mixte. Pour un véhicule électrique par exemple, une autonomie de 400 km NEDC laisse place à une autonomie d'un peu plus de 300 km WLTP.

La vitesse d'un véhicule peut être traduite en puissance P (en kW) constante à fournir en fonction de sa masse, des frottements dus au roulement, de son coefficient de pénétration dans l'air et,

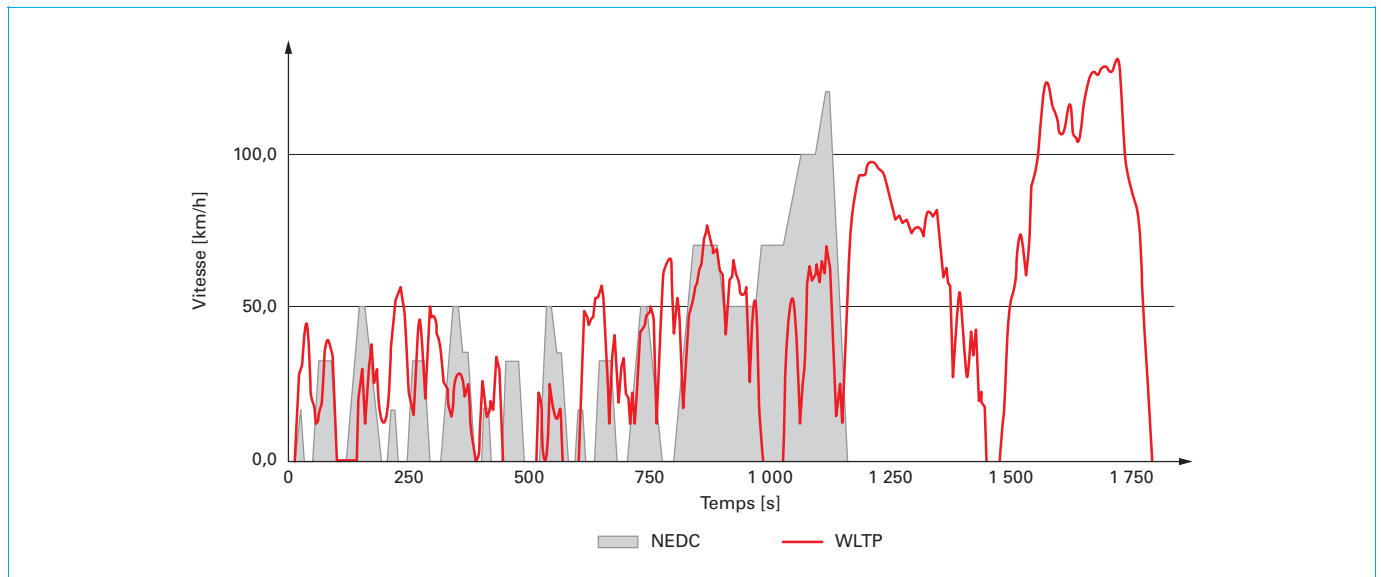


Figure 12 – Cycles routiers normalisés, NEDC (*New European Driving Cycle*) et WLTP (*Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedure*)

occasionnellement, de la pente de la route –dans le cas du cycle d’homologation, la pente est nulle– par l’équation :

$$P = \frac{V}{1000} \left[\left(\frac{1}{2} \rho_{\text{air}} (V)^2 SCx \right) + (Mg \sin \alpha) + (Mg Cr \cos \alpha) \right] \quad (7)$$

- avec M masse du véhicule (en kg),
- V vitesse du véhicule (en m/s),
- SCx maître couple (surface frontale x coefficient de pénétration dans l’air) (en m²),
- ρ_{air} masse volumique de l’air (en kg/m³),
- Cr coefficient de roulement du véhicule,
- α pente de la route (angle par rapport à l’horizontale),
- g accélération due à la pesanteur.

L’addition d’un terme dynamique intégrant l’accélération (positive ou négative) permet de rendre compte de la puissance (en kW) à fournir pour suivre le profil de vitesse :

$$P_{\text{acc}} = \frac{Mg_{\text{veh}} V}{1000} \quad (8)$$

avec g_{veh} accélération instantanée du véhicule pour passer de la vitesse V , d’un instant du profil, à la vitesse suivante.

La somme des équations permet de transformer le profil de vitesse en profil de puissance pour un système particulier (masse, SCx et Cr fixés).

Exemple

Pour un véhicule de 2 000 kg, possédant une surface frontale de 2,5 m², un coefficient de pénétration dans l’air de 0,3 et un coefficient de roulement de 0,01, le profil de puissance correspondant à un cycle MVEG serait celui présenté figure 13.

Cette figure 13 illustre la demande en puissance associée au profil de vitesse. Celle-ci, positive lors des accélérations, devient négative lors des freinages ou des décélérations. Cet excès pourra être récupéré dans des stockages temporaires d’énergie sous forme mécanique ou électrochimique dans des systèmes hybrides.

2.2.2 Les différentes options

Les principales technologies qui étaient en liste pour équiper des véhicules à pile à combustible étaient les PEMFC, les AFC et les SOFC. Pour la simplicité de mise en œuvre c’est la technologie PEMFC qui est aujourd’hui retenue pour les véhicules terrestres pile à combustible.

Le dimensionnement de ces piles sera fortement dépendant de l’architecture du groupe électrogène et de l’hybridation envisagée

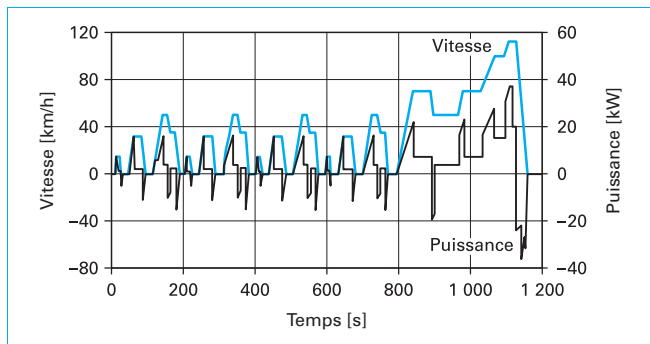


Figure 13 – Profils de vitesse et de puissance suivant un cycle NEDC pour un véhicule de 2 000 kg

(le cas échéant). En effet, il existe au moins quatre types de configurations ayant été développées à ce jour par des constructeurs de véhicules.

Le plus simple est le **groupe purement pile à combustible**. Dans ce cas, la pile devra être dimensionnée sur la puissance électrique maximale à fournir au moteur électrique. Seule une batterie de démarrage fournira aux auxiliaires l’énergie nécessaire pour la mise en route du groupe électrogène.

Le deuxième système consiste à **hybrider la pile par une source auxiliaire de puissance de faible énergie** (supercondensateur, batterie de puissance), qui absorbera les pics de puissance et permettra ainsi de dimensionner la pile sur la puissance nominale du véhicule.

Le troisième système est une évolution du deuxième où la source auxiliaire est une batterie qui permet un roulage en électrique de 30 à 50 km. C’est un hybride rechargeable PAC.

Enfin, la quatrième architecture consiste à **utiliser la pile comme un chargeur de batterie** fonctionnant à une puissance constante inférieure généralement à la puissance nominale du véhicule. Cette architecture est également parfois appelée « *range extender* » (ou augmenteur d’autonomie).

Les véhicules à pile à hydrogène commercialisés aujourd’hui disposent de batteries en complément des piles, afin de pouvoir faire face aux appels de puissance du moteur électrique et récupérer l’énergie au freinage, comme pour les véhicules électriques à batterie. Plusieurs configurations pile à combustible/batterie sont possibles. Une petite batterie par exemple permettra simplement au véhicule de bénéficier de plus de puissance instantanée si nécessaire. À l’inverse, un véhicule déjà équipé d’une batterie conséquente pourra recevoir une pile à combustible de basse puissance afin de prolonger son autonomie (*range extender*). La configuration hybride rechargeable pile à combustible sera commercialisée fin 2021 sur les utilitaires du groupe Stellantis. Dans cet hybride pile à combustible la batterie, rechargeable sur secteur, apporte une autonomie électrique de 50 km et la puissance crête pour garantir les performances sans surdimensionner la PAC. C’est un compromis intéressant qui devient compétitif grâce à la diminution du coût des batteries.

À ces trois exemples de groupes électrogènes destinés à la traction, il faut ajouter le concept de groupe auxiliaire (APU pour *Auxiliary Power Unit*) destiné à alimenter les instruments de bord ou les auxiliaires.

2.2.2.1 Groupe électrogène à PAC

Dans cette configuration, seule la pile alimente le groupe motopropulseur (GMP). Elle est donc dimensionnée pour répondre à toute la demande de puissance (nominale ou maximale). Cette architecture a l’avantage d’un système simple sans gestion de nœuds électriques puisqu’elle ne comprend qu’une seule source (ou stockage) d’énergie ; en revanche, elle présente l’inconvénient de surdimensionner la pile par rapport à la puissance nominale du véhicule et de ne pas permettre la récupération d’énergie lors du freinage. De tels systèmes ont été mis en œuvre par Daimler Chrysler dans le cadre des projets Nekar (*New Electric Car*) successifs (1 à 5 entre 1993 et 2001). Les différents démonstrateurs correspondants ont mis en évidence la possibilité de réaliser de tels véhicules fonctionnant avec différents carburants tels que de l’hydrogène gazeux, sous pression ou liquide, et du méthanol reformé.

Les figures 14 et 15 montrent les niveaux élevés de performance et de rendement atteignables avec des systèmes complets de piles à combustible. Au point de vue de la dynamique de ces groupes électrogènes, des valeurs de 1 à 2 s sont annoncées respectivement pour les systèmes à hydrogène et au méthanol pour passer de 0 à 90 % de la puissance nominale. L’inconvénient de cette architecture est qu’il n’est pas possible de récupérer l’énergie cinétique du véhicule ce qui se traduit par une consommation plus importante que les architectures hybrides, d’autre part le kilowatt de pile à combustible est aujourd’hui plus chère que le kilowatt de batterie. C’est pour ces deux raisons qu’il n’y a pas de véhicule de ce type commercialisé.

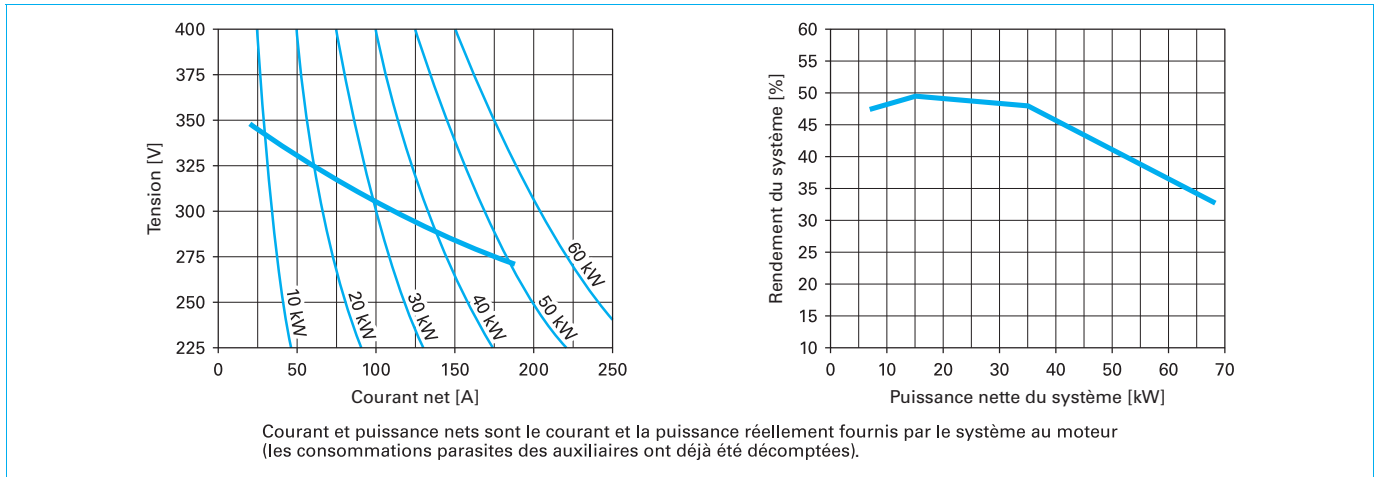


Figure 14 – Performances de systèmes de piles à combustible H₂/air équipant les véhicules Focus FCV et Nectar 4 ADV, fonctionnant entre 70 et 85 °C de température de cellule et entre 1 et 4 bar absolus pour les réactifs (d’après <http://www.fuelcelltoday.com/>)

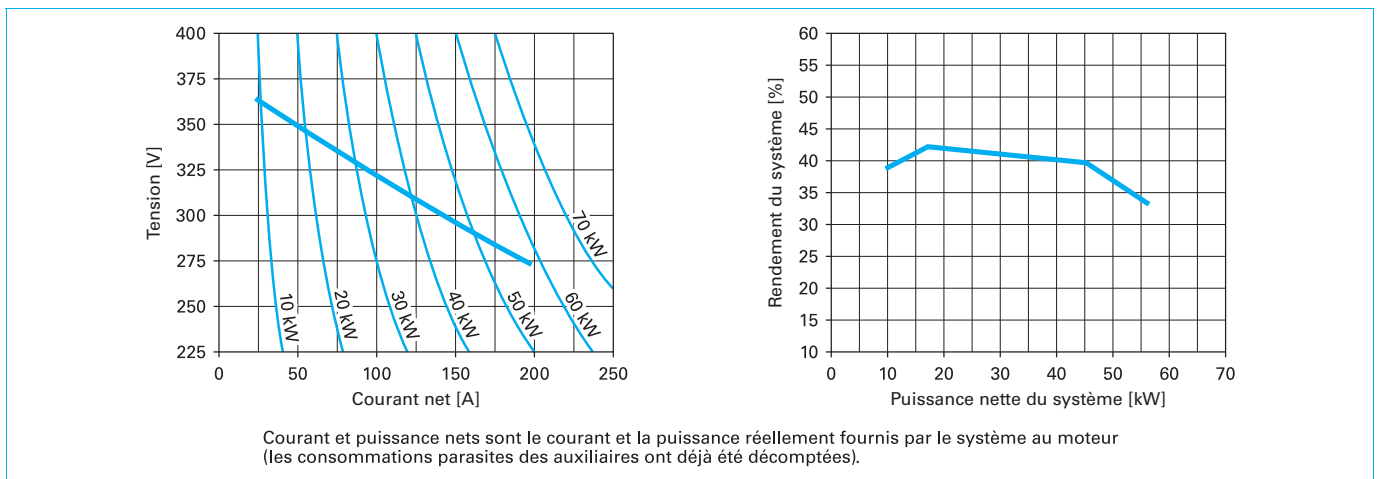


Figure 15 – Performances de systèmes de piles à combustible méthanol/air (incluant un reformeur) équipant les véhicules Premacy FC-EV et Nectar 5, fonctionnant entre 70 et 85 °C de température de cellule et entre 1 et 6 bar absolus pour les réactifs

2.2.2.2 Groupe électrogène hybride à pile à combustible

Dans le cas d’un système hybride, la pile est dimensionnée sur la puissance nominale du véhicule, les pics étant absorbés par la source auxiliaire de puissance. Les sources auxiliaires peuvent stocker l’énergie de façon électrique (batteries de puissance ou supercondensateur) ou mécanique (volant d’inertie). Ce type de système peut permettre une meilleure gestion des phases transitoires comme les accélérations ou les démarrages à froid. En effet, la source hybride peut être dimensionnée en énergie pour alimenter le véhicule pendant plusieurs minutes à la puissance maximale ou en mode dégradé avant que la pile ne soit en mesure de fournir la puissance électrique correspondant à la demande. Cela peut également se révéler être un avantage déterminant dans le cas d’un système fonctionnant avec de l’hydrogène provenant d’un reformeur ou avec de l’air conditionné par un compresseur aux dynamiques transitoires inférieures à celle de la pile. De nombreux prototypes ont été construits au cours des dix dernières années par des constructeurs tels que Toyota, Honda, Mazda, Renault et Peugeot SA.

Cette configuration permet également, par la présence d’un stockage d’énergie réversible, de récupérer l’énergie des véhicules dissipée lors de freinages et transformée en énergie électrique par le

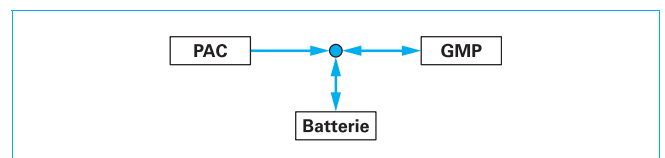


Figure 16 – Nœud électrique d’un système PAC hybridé par une batterie de puissance

moteur (GMP) alors utilisé en alternateur. Cette énergie peut représenter jusqu’à 10 % de l’autonomie du véhicule.

Du fait du fort développement des véhicules hybrides et des véhicules électriques, les inconvénients majeurs de cette hybridation qui était, d’une part, économique, puisqu’elle impose de disposer de deux sources (ou stockage d’énergie) à bord du véhicule et, d’autre part, technique avec la gestion d’un nœud électrique reliant la pile, le groupe motopropulseur et la source hybride (figure 16) sont complètement maîtrisés aujourd’hui.

Ce type de système hybride est généralement piloté par la tension des sources d’énergie. Cela signifie que lorsque la tension demandée

par le bus de puissance provenant du GMP devient inférieure à celle de la pile, celle-ci commence à débiter du courant. Cet échange est unidirectionnel de la pile vers le nœud électrique. En revanche, les échanges entre le nœud électrique et la batterie seront bidirectionnels : quand la tension à l'équilibre (courant nul) de la batterie sera inférieure à celle du bus de puissance, celle-ci pompera de l'énergie électrique pour se recharger et participera, ainsi, à la demande de puissance du véhicule ; par contre, lorsque sa tension à l'équilibre sera supérieure à la tension du bus de puissance, la batterie deviendra source d'énergie et débitera alors de l'énergie électrique dans le GMP. Enfin les échanges entre le GMP et le nœud électrique sont également bidirectionnels et, lors du freinage, le moteur peut se transformer en générateur et alimenter la batterie. En considérant les différentes tensions qui interviennent :

- U_{PAC} : tension du système de pile ;
- U_{SAP} : tension de la source auxiliaire de puissance ;
- U_{max} : tension maximale (chargée) de la source auxiliaire de puissance ;
- U_{GMP} : tension du GMP.

Les différentes phases possibles pour cette architecture sont donc les suivantes :

- $U_{GMP} < U_{PAC}$: mode traction, la pile et/ou la source auxiliaire de puissance (SAP) alimente(nt) le GMP ;
- $U_{PAC} > U_{SAP}$ et $U_{SAP} = U_{max}$: la pile fonctionne en deçà de sa puissance nominale ; elle alimente le GMP et la SAP est au repos ;
- $U_{PAC} > U_{SAP}$ et $U_{SAP} < U_{max}$: la pile fonctionne en deçà de sa puissance nominale ; elle alimente le GMP et recharge la SAP ;
- $U_{PAC} = U_{SAP}$: la pile est à sa puissance nominale et alimente le GMP ; la SAP est au repos ;
- $U_{PAC} > U_{SAP}$: la pile débite dans le GMP au-delà de sa puissance nominale ; la SAP débite dans le GMP ;
- $U_{GMP} > U_{PAC}$: mode récupération ; le GMP débite dans la SAP si sa tension est inférieure à sa tension maximale, sinon l'énergie électrique est dissipée sous forme de chaleur dans une résistance.

Cette configuration est adoptée par les constructeurs automobiles dans leurs programmes de commercialisation, à commencer par les constructeurs japonais Toyota et Honda et coréen Hyundai.

2.2.2.3 Augmenter l'autonomie des véhicules électriques (range extender)

Dans le cadre de cette application, la pile sera utilisée comme un chargeur de batterie. Elle fonctionnera en mode binaire (on/off) à une puissance constante sous-dimensionnée par rapport à la puissance nominale du véhicule. Ce type d'architecture présente l'avantage de profiter des développements déjà réalisés pour les véhicules électriques existants comme la chaîne de traction électrique et la récupération d'énergie au freinage. Plusieurs démonstrateurs ont été construits afin de montrer l'avantage de ce type de véhicule, en particulier en parcours urbain. En effet pour que cette architecture procure une réelle augmentation d'autonomie, avec une recharge de la batterie de traction par une pile à combustible de faible puissance, il ne faut pas que le véhicule soit continuellement sollicité à pleine puissance, entraînant une décharge rapide des batteries comme dans le cas d'un parcours autoroutier. Ainsi des taxis ont été équipés par ce type d'hybridation par la société Zevco (Zero Emission Vehicle Company Limited), utilisant une base de taxi londonien électrique, et par PSA sur la base d'un Partenaire électrique commercial. Renault commercialise une version équipée d'un range extender PAC de son Kangoo électrique.

2.2.2.4 Unité de puissance auxiliaire (APU)

La pile à combustible est utilisée ici pour alimenter les instruments de bord ou les auxiliaires du véhicule, la propulsion étant assurée par une chaîne de traction thermique. Le système de pile

doit fournir environ 1 kW avec un profil d'utilisation indépendant de cycles routiers. La demande énergétique dépendra des conditions extérieures (jour/nuit, ambiance climatique) ou de l'utilisation d'éléments de confort (vidéo, GPS, etc.). Des projets ont été envisagés dans les années 2000 par Delphi, associés à BMW et Renault, pour équiper un véhicule à moteur thermique classique d'une pile SOFC couplée à un reformeur d'essence. L'utilisation d'une pile haute température devait permettre d'accroître la tolérance de la pile aux impuretés et donc de réduire la complexité du purificateur d'hydrogène. Ces projets n'ont pas abouti à la commercialisation de cette technologie pour l'automobile mais reste une solution pour les bus et car mais les contraintes réglementaires sur la réduction des polluants du transport routier vont plutôt orienter vers le remplacement du moteur thermique par une pile à hydrogène couplée à une petite batterie qui fournira à la fois la puissance de traction et l'énergie pour les auxiliaires.

2.3 La pile

À ce jour, les principales voies de développement concernant la pile elle-même portent sur les réductions de coûts des composants (plaques bipolaires, membranes, électrodes et joints), leur durée de vie et leur intégration dans le système.

■ Plaques bipolaires

Pour les applications automobiles, les développements se sont concentrés sur le remplacement des plaques de graphite qui bien que possédant une bonne conductivité électrique et thermique présentent un coût prohibitif dû au temps de procédé, de l'ordre d'une heure par plaque. Les deux candidats pour le remplacement de l'usinage du graphite en termes de procédé sont l'emboutissage de plaques métalliques et l'injection d'un composite carbone/polymère. Si l'emboutissage de métaux présente un temps de procédé record, pouvant être réduit à quelques secondes, et une conductivité électrique optimale due à la présence de métal, les plaques produites souffrent d'une forte sensibilité à la corrosion du fait de l'environnement très acide de la membrane et de la présence à la cathode d'un milieu et de potentiels très oxydants. Pour les plaques métalliques, afin de diminuer la corrosion, les solutions mises en œuvre consistent à protéger lesdites plaques au moyen d'un revêtement présentant également des propriétés de conduction électrique. Il peut notamment s'agir d'un revêtement à base de métaux nobles, ou de carbone dans une matrice polymérique. Les piles équipant la Toyota Mirai sont réalisées par emboutissage de feuilles de titane protégées de la corrosion par un dépôt mince, de carbone. On peut aujourd'hui considérer que ce composant est quasiment arrivé à maturité. Il reste néanmoins quelques avancées à faire pour en diminuer encore le coût.

En ce qui concerne les composites, si la plupart des développeurs savent mouler des plaques à chaud et sous pression, l'injection d'une pâte dans un moule semble toujours poser des problèmes de « peau » créant, à la surface de la plaque bipolaire, une couche isolante de polymère, nécessitant une étape supplémentaire d'abrasion dans le procédé de fabrication. En outre, ce procédé limite, de par la nature composite du matériau, la conductivité intrinsèque des plaques bipolaires.

■ Membranes

Depuis de nombreuses années, des solutions alternatives aux membranes perfluorées ont été explorées sans jamais toutefois parvenir à égaler à la fois leurs performances ($\approx 0,1$ S/cm) et leurs durées de vie (plusieurs dizaines de milliers d'heures). D'après les fabricants de ces polymères (DuPont, Asahi Glass, Asahi Chemical), si le prix du matériau est élevé du fait du développement du marché et de la concurrence, leur prix a diminué permettant d'envisager la commercialisation à grande échelle. Il reste encore des progrès à accomplir en termes de coût, de procédé de production et de recyclage, ainsi qu'au sujet de l'augmentation de la température de fonctionnement.

■ **Température**

En fait d'évolution sur les membranes électrolytes et leur application aux véhicules électriques à pile à combustible, il semblerait que la température de fonctionnement soit le principal défi à relever au cours des années à venir. En effet, comme indiqué précédemment (cf. § 3.1.4), la gestion thermique des piles à combustible embarquées, en particulier les échanges thermiques entre le milieu extérieur et le circuit de refroidissement, devrait être un des points critiques à résoudre avant la mise en circulation. Ainsi une augmentation de température de 80 à 130 °C permettrait de diminuer considérablement la taille des échangeurs facilitant l'intégration du système dans le véhicule. Cette augmentation de température devrait également avoir un impact sur les performances mécaniques et chimiques des matériaux de plaques bipolaires et sur leur durée de vie.

Accroître la température de fonctionnement des piles à combustible devrait également fortement affecter la structure et la composition des électrodes. En effet si à 80 °C un milieu diphasique composé de gaz et d'eau liquide doit être appréhendé, une seule phase gazeuse devrait subsister à 130 °C sous de faibles pressions. De plus, concernant les catalyseurs, ces températures devraient également permettre d'augmenter de façon très significative leur tolérance aux poisons issus du reformatage, le cas échéant, ou provenant de l'air extérieur (huiles, graisses). Ainsi la taille du reformeur pourrait être réduite par la suppression de plusieurs étages de purification des gaz ; de plus, quelle que soit la qualité du combustible ou du carburant, le chargement en métal noble devrait pouvoir être diminué.

Ces changements de température devraient également affecter la nature des joints présents dans les piles à combustible, essentiels au maintien de l'étanchéité. Ils sont pour l'instant constitués de plaques indépendantes de matériaux perfluorés et devraient faire l'objet, dans le futur, de développements en vue de leur intégration aux membranes et aux électrodes pour améliorer leur manipulation et leur efficacité.

À retenir
<ul style="list-style-type: none"> - Le rendement d'une cellule de PAC est de l'ordre de 53 %. - L'augmentation de la température de fonctionnement diminue la perte en tension aux faibles densités de courant et repousse le courant limite. - Les membranes utilisées aujourd'hui limite la température à 80 °C. - L'intégration dans les véhicules impose l'utilisation de radiateurs de très grandes dimensions. - L'hybride à pile à combustible équipé d'une petite batterie est la solution retenue pour les véhicules de série.

3. Le vecteur hydrogène pour les transports

S'il est possible d'affirmer aujourd'hui que le carburant des piles à combustible embarquées dans des véhicules électriques sera de l'air (comprimé ou non), la nature du combustible qui était

beaucoup moins certaine il y a 10 ans est aujourd'hui clairement identifié : c'est l'hydrogène et si possible vert. En effet, même si peu de doutes subsistent quant au gaz réagissant sur les catalyseurs anodiques (de l'hydrogène), la forme sous laquelle l'hydrogène sera embarqué et stocké à bord d'un véhicule va dépendre de son usage et du réseau de distribution de l'hydrogène. Plusieurs solutions coexistent à l'heure actuelle pour stocker l'hydrogène sous sa forme moléculaire, quel que soit son état physique. Par contre, le produire à la demande dans le véhicule à partir de la transformation chimique d'un alcool, d'un hydrocarbure ou d'un hydrure n'est plus possible au regard du durcissement des normes régulant les émissions polluantes et le CO₂ des véhicules ainsi que la prise de conscience de l'impact du transport sur le réchauffement climatique.

Il faut aussi prendre en compte les différences de ce carburant par rapport à la sécurité comme on peut le voir dans le tableau 4, l'hydrogène présente un risque d'explosion bien plus important que les hydrocarbures. La plage d'explosivité est 5 fois plus importante et l'énergie minimale pour l'enflammer est 10 fois plus faible. Ces points peuvent poser un problème dans des lieux confinés et non à l'extérieur car à l'air libre l'hydrogène étant plus léger que l'air se disperse rapidement. Le stationnement de ces véhicules en ouvrage doit être traité de façon sécuritaire.

3.1 Stockage d'hydrogène

Le dihydrogène, composé de deux atomes d'hydrogène, constitue la forme gazeuse de l'hydrogène. Particulièrement léger, il se dissipe rapidement dans l'atmosphère.

Si l'hydrogène possède la densité d'énergie massique la plus élevée parmi les combustibles courants (120 MJ/kg pour l'hydrogène contre 50 MJ/kg pour le gaz naturel et 45 MJ/kg pour l'essence), il est, en volume, le combustible le plus pénalisant du fait de sa faible masse atomique et de son état gazeux à partir de 20 K (-253 °C). Les différentes solutions envisagées à ce jour pour stocker de l'hydrogène à bord d'un véhicule sont sous forme de gaz comprimé dans des réservoirs (de 300 à 700 bar) ou dans des microbilles (sous forme d'hydrures) ou bien sous forme cryogénique.

Le tableau 5 regroupe les différents types de stockage et leurs performances.

■ **Stockage de gaz comprimé**

Le stockage sous pression est actuellement le plus simple à mettre en œuvre ; il ne requiert « qu'une » compression pour charger le réservoir, et tout le combustible est disponible quasi instantanément par détente directe dans le circuit anodique.

Deux principaux types de réservoirs coexistent à l'heure actuelle pour l'application des piles à combustible au transport. Le premier, pour les véhicules particuliers est orienté vers le stockage à très hautes pressions (700 bar) et possède une vessie en aluminium ; le second, mis en œuvre dans les véhicules lourds et les bus, utilise une vessie en polymère de moindre coût et vise des pressions maximales de 350 bar. Ce second domaine de pressions est plus simple par rapport au remplissage des réservoirs et au coût énergétique induit par la compression.

	Plage d'explosivité	Énergie minimale d'inflammation	Vitesse de combustion	Nature de la flamme	Fragilisation des matériaux
Hydrogène	4 à 75 %	17 µJ	3,3 m/s	Flamme peu visible	Risque fissuration si acier non compatible
Hydrocarbures	1 à 15 %	200 µJ	0,5 m/s	Flamme visible	

Tableau 5 – Performance des différents types de stockage d’hydrogène (d’après [8])					
Principe de stockage de l’hydrogène		Concentration massique [g d’H ₂ /kg]	Concentration volumique [g d’H ₂ /L]	Exemple de véhicule	
Stockage liquide (cryogénique)		70	30	Fever (Renault), Daimler	
Stockage gazeux	Vessie + fibres de C	Haute pression (700 bar)	50	Hydro-Gen (PSA) (1) Programme européen Joule 3 coordonné par PSA, avec les participants suivants : Air Liquide, CEA, De Nora, Renault et Solvay. Toyota Mirai, Honda Clarity FC, Hyundai Ix35 et NEXO	
		Basse pression (300 à 350 bar)	40	Taxi PAC Nekar 4 Adv. Kangoo ZE PAC	
		Microbilles	55	–	
Stockage « solide »	Hydrures		10 à 30	Jusqu’à 40	FCEV 1 (Toyota)
	Adsorption sur charbon actif (–196 °C)		108	40	–
	Nanotubes		750 (2) Expériences publiées dans la littérature mais jamais confirmées.		

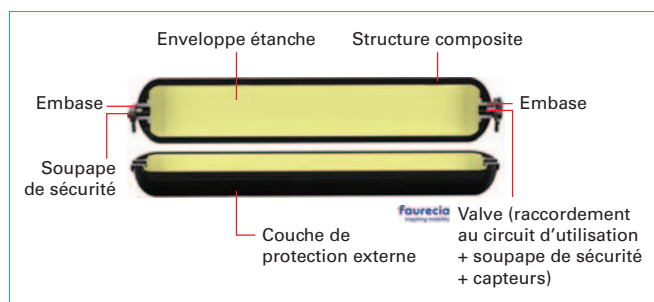


Figure 17 – Schéma de coupe d’un réservoir d’hydrogène type IV

Afin d’assurer le confinement du gaz au sein du réservoir, et d’assurer la sécurité des usagers si le véhicule est accidenté, les réservoirs commercialisés sont soumis au processus homologation du règlement CE n° 79/2009. Il est important que la structure du réservoir soit adaptée à la nature du gaz stocké. Pour l’hydrogène, le réservoir (figure 17) est généralement constitué d’une vessie spécialement choisie pour assurer l’impermeabilité à l’hydrogène, le tout renforcé par un bobinage de fibres de carbone noyées dans une résine époxyde dont la fonction est d’assurer la tenue mécanique à la pression et enfin d’une couche de protection externe, en fibre de verre permettant de supporter les contraintes externes auxquelles le réservoir pourra être soumis pendant l’ensemble de son cycle de vie (accidents, agressions externes...).

■ **Le stockage de l’hydrogène dans des microbilles creuses de verre** est basé sur la propriété du verre d’être, à froid, étanche à l’hydrogène et perméable à haute température. Les microbilles sont donc introduites dans l’enceinte d’un réacteur, portées à haute température (350 °C) en présence d’une haute pression d’hydrogène. Dans ces conditions, le gaz diffuse à l’intérieur de la bille sous l’effet de l’équilibrage des pressions intérieure et extérieure. Les billes pleines d’hydrogènes sont alors refroidies et

extraites du réacteur. La résistance mécanique du verre leur permet d’atteindre des pressions d’éclatement d’environ 1 500 bar pour un diamètre de 12 µm et une épaisseur de 2 µm. La restitution de l’hydrogène s’effectue soit de façon réversible en chauffant le verre pour le rendre à nouveau perméable, soit de façon irréversible en broyant les billes. Ce stockage n’est pas utilisé sur les véhicules légers.

■ **Le stockage cryogénique de l’hydrogène** à –253 °C permet de stocker l’hydrogène sous forme liquide et de compenser sa faible densité. Il est alors possible de stocker environ 70 kg d’hydrogène par mètre cube. Pour maîtriser une température aussi basse une isolation très importante est nécessaire, les pertes thermiques se traduisent par une montée en pression du réservoir. Des soupapes permettent de réguler cette pression en rejetant à l’extérieur l’hydrogène qui s’est évaporé. Les performances thermiques de l’enceinte limitent les rejets autour de 1 % par jour. Cette solution de stockage de l’hydrogène a été mise en œuvre sur des prototypes et petites séries par plusieurs constructeurs automobiles dont Daimler Chrysler (Nekar 4), General Motors (Hydro-Gen 3) et Renault (Fever) pour des véhicules à pile à combustible et par BMW pour un véhicule à moteur thermique à hydrogène fonctionnant dans l’enceinte de l’aéroport de Munich. Les principaux inconvénients de ce type de stockage sont la consommation importante d’énergie pour la liquéfaction (environ 30 % du volume stocké) et les rejets dus à l’évaporation. Ce stockage n’est pas retenu pour la mobilité automobile, il est plutôt dédié à des applications spécifiques.

■ **Le principe de stockage de l’hydrogène dans les hydrures** est basé sur la combinaison chimique réversible d’un métal (ou d’un alliage) avec de l’hydrogène sous forme atomique. Ce mode de stockage offre généralement l’avantage de ne pas utiliser de hautes pressions de gaz à bord du véhicule. Il présente toutefois les inconvénients de nécessiter une source de chaleur pour libérer de l’hydrogène et d’être très sensible à l’humidité et aux impuretés présentes dans le gaz. Même s’il est performant en termes de volume, ce mode de stockage est généralement pénalisé en masse du fait de la présence d’un métal (tableau 6).

Tableau 6 – Exemples de tailles et de volumes de stockages d'hydrogène sous formes d'hydrures pour 500 km d'autonomie (d'après GKSS)		
Type d'hydrure	Masse de réservoir [kg]	Volume de réservoir [L]
MgH ₂	175	73
Mg ₂ NiH ₄	315	83
FeTiH ₂	435	80
LaNi ₅ H ₆	440	64

Aux capacités de stockage annoncées, il faut ajouter les masses des réservoirs et des systèmes chauffants servant à désorber l'hydrogène. Enfin, concernant les hydrures, la société Millennium Cell a fabriqué dans les années 2002 un système de production d'hydrogène « *Hydrogen on Demand* » basé sur la réaction maîtrisée d'un borohydrure de sodium avec de l'eau sur un catalyseur. Ce système a été mis en œuvre par Daimler Chrysler sur son démonstrateur Natrium, et par PSA sur son démonstrateur H₂O véhicule de pompier électrique à batteries muni d'un générateur électrique constitué d'une pile à combustible (5,5 kW). Cette solution a été abandonnée car nécessitant deux réservoirs et toute une logistique pour régénérer en hydrogène le borohydrure de sodium.

Les autres modes de stockage d'hydrogène couramment évoqués sont l'absorption sur charbon actif à basse température (77 K), qui requiert l'utilisation d'une enceinte thermique alimentée en azote liquide, et le stockage sur nanotubes de carbone qui demande certainement un complément d'études et d'analyse après les annonces et contre-annonces de ces dernières années. Les résultats obtenus avec des nanostructures de carbone sont en deçà de la cible fixée par le DOE (Département Of Energie – États-Unis). Par conséquent, de telles structures semblent peu appropriées pour le stockage de l'hydrogène dans les applications reliées au domaine de l'automobile.

3.2 Production embarquée d'hydrogène

Si l'hydrogène apparaît aujourd'hui comme le carburant idéal pour tous les types de piles à combustible, son stockage, sa distribution et/ou sa production n'en demeure pas moins problématiques. Une solution envisagée est la production locale (proche de la pile, c'est-à-dire à l'intérieur même du véhicule) d'hydrogène à partir d'hydrocarbures ou de composés azotés. Cette opération consisterait à extraire, suivant une méthode « douce », l'hydrogène de ces composés. Des techniques telles que le vaporeformage et l'oxydation partielle séparément utilisées ou combinées ont été largement étudiées et développées à des échelles industrielles (plusieurs centaines de kilowatts). Ces dernières années ont vu apparaître une miniaturisation de ces procédés pour répondre aux exigences des applications à pile à combustible embarquées (véhicules électriques, équipements portables et équipements portatifs) avec des combustibles aussi variés que des alcools (méthanol et éthanol), des hydrocarbures (gaz naturel, essence ou diesel) ou des dérivés azotés (ammoniaque).

■ Vaporeformage

Cette solution est généralement appliquée aux alcools ou au gaz naturel. Au cours d'une première étape, le combustible, mélangé à de l'eau, réagit de façon endothermique sur un lit catalytique à base de nickel pour donner un gaz riche en hydrogène et en monoxyde de carbone. Le monoxyde de carbone est ensuite déplacé par la réaction de « gaz à l'eau » (*water gas shift*) au cours d'une seconde étape pour donner de l'hydrogène et du dioxyde de carbone. Le mélange (H₂ + CO₂ + traces CO) est enfin purifié par oxydation préférentielle du monoxyde de carbone en dioxyde, sur un lit de catalyseurs

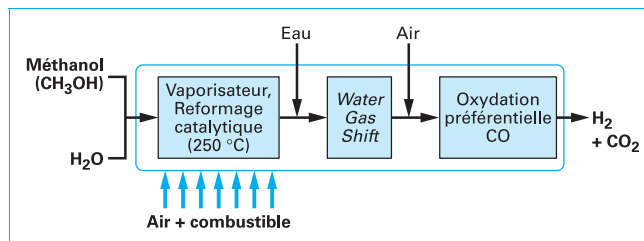


Figure 18 – Étapes du vaporeformage du méthanol avec une unité d'oxydation préférentielle

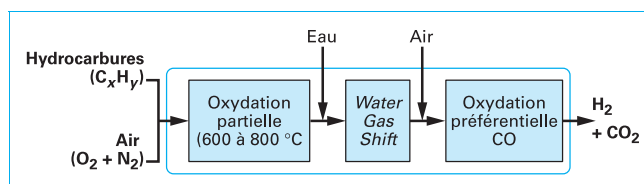
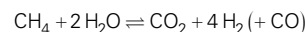


Figure 19 – Étapes de l'oxydation partielle d'un hydrocarbure

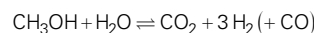
sélectifs ou par l'adjonction d'une membrane sélective à l'hydrogène (Ag-Pd) (figure 18).

Exemple : cas du méthanol et du gaz naturel

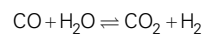
Étape 1



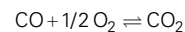
ou



Étape 2



Étape 3

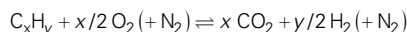


■ Oxydation partielle

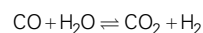
L'oxydation partielle est généralement utilisée pour le traitement de combustibles plus lourds, tels que l'essence ou le diesel. Ce traitement consiste en une première étape (non catalysée) de combustion sous-stœchiométrique et exothermique du combustible par de l'air qui donnera un gaz riche en hydrogène et en CO (figure 19). Les étapes suivantes sont semblables à celles du vaporeformage (réaction du gaz à l'eau et oxydation préférentielle).

Exemple : cas d'hydrocarbure

Étape 1



Étape 2



Étape 3



Nota : pour les hydrocarbures, la chaîne de rendement globale semble demeurer en faveur de la pile par rapport au rendement obtenu avec les moteurs thermiques.

Reformage autotherme

Une troisième voie de reformage existe, combinant le vaporeformage et l'oxydation partielle. Ce procédé permet de combiner deux réactions, l'une endothermique et l'autre exothermique, et d'équilibrer localement les échanges de chaleur (figure 20).

Le meilleur exemple de ce reformage est le concept « Hot-Spot » développé par Johnson Matthey et dont les performances sont indiquées dans le tableau 7.

Oxydation directe de combustibles

Enfin, des études visent à oxyder directement le combustible dans une pile à combustible sans qu'il y ait production d'hydrogène au cours d'une étape intermédiaire. C'est le cas des piles au méthanol et, plus récemment, des piles à l'éthanol et au méthane direct. Des puissances électriques très faibles ont été obtenues pour ce dernier, montrant l'existence d'une activité électrochimique même à basse température (80 °C). Ce type de pile est généralement destiné aux applications de faible puissance comme les équipements portables.

Pureté des gaz

La présence d'un reformeur induit souvent la présence d'impuretés dans le combustible, il s'agit le plus souvent de traces de CO ou

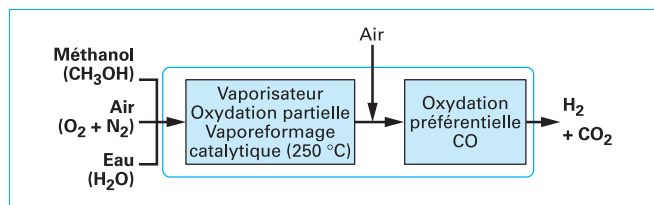


Figure 20 – Étapes du reformage autotherme du méthanol

Débit maximal [L/h]	6 000
Concentration en hydrogène [%]	58 (sec)
Volume (8 éléments assemblés) [L]	6
Masse (8 éléments assemblés) [kg]	9,5
Puissance [kWe]	6 à 7

de méthane. Lorsque le combustible initial contient des composés soufrés, une unité de désulfuration est généralement ajoutée avant le reformeur. Les différentes familles de piles à combustible sont plus ou moins tolérantes à la présence d'impuretés dans l'hydrogène, comme le rappelle le tableau 8.

Le reformeur doit donc délivrer un gaz avec la pureté adéquate, ce qui peut nécessiter des aménagements complémentaires (purification du CO pour la PEMFC, désulfuration pour la SOFC).

Perspectives

Si les reformeurs ne posent pas de réels problèmes à l'échelle industrielle, ils semblent beaucoup plus difficiles à gérer (thermique, hydraulique) lorsqu'ils sont miniaturisés. De plus, un reformeur de forte puissance fonctionne généralement en régime continu, alors qu'une production d'hydrogène embarquée doit être flexible et répondre de façon immédiate à un besoin fluctuant. La composition des gaz en sortie de reformeur devra être capable de suivre la dynamique du système et de fournir à la pile un gaz riche en hydrogène dépourvu de poison. Ces solutions de génération embarquée d'hydrogène ne sont plus aujourd'hui dans les roadmaps des applications des transports terrestres car les normes en préparation (Euro 7 et CO₂) vont définitivement écarter ces solutions.

3.3 Distribution de combustible (infrastructure)/avitaillement des véhicules hydrogène

Le déploiement de la mobilité hydrogène doit s'appuyer sur la mise en place d'un maillage de stations de recharges permettant d'avitailier les véhicules pour des distances de 600 à 800 km.

En France, la stratégie mise en place pour déployer et rentabiliser simultanément les stations et les véhicules est d'équiper en véhicules hydrogène des flottes captives (véhicules retournant régulièrement au même point – dépôt ou siège de l'entreprise). Ceci permet d'alimenter la flotte avec une station unique. Les temps de chargement, 3 minutes pour un véhicule léger, 10 à 20 pour un bus ou poids lourds selon la quantité d'hydrogène embarquée et le niveau du réservoir, permettent de remplir les véhicules lors de leur passage aléatoires sur ce point de remplissage. On peut citer la flotte des taxis parisiens « Hype » exploitant des Toyota Mirai et des Hyundai FCV. Ce service utilise une application permettant de connaître en temps réel la disponibilité et le niveau d'hydrogène des stations d'avitaillement.

3.3.1 Production et distribution de l'hydrogène

Comme cela est décrit dans les paragraphes précédents, dans un véhicule à pile à combustible, l'hydrogène ne sera pas produit à partir d'un reformeur embarqué mais pourra être stocké sous différentes formes. Cet hydrogène devra cependant être produit en

Impureté	PEMFC	AFC	PAFC	MCFC	SOFC
H ₂	Combustible	Combustible	Combustible	Combustible	Combustible
CO	Poison (> 10 ppm)	Poison	Poison (> 0,5 %)	Combustible	Combustible
CH ₄	Inerte	Inerte	Inerte	Inerte	Inerte (1) Combustible dans le cas du reformage interne.
CO ₂	Inerte	Poison	Inerte	Inerte	Inerte
H ₂ S et composés soufrés	Poison (> 1 ppm)		Poison (> 50 ppm)	Poison (> 0,5 ppm)	Poison (> 1 ppm)

grandes quantités et disponible à la distribution comme peuvent l'être actuellement l'essence, le diesel, le GNV (gaz naturel pour véhicule) ou le GPL (gaz de pétrole liquéfié). Les voies de production d'hydrogène explorées sont de natures chimiques, biologiques ou électrochimiques, avec respectivement le reformage, l'exploitation de la biomasse et l'électrolyse. La figure 21 présente plusieurs hypothèses de cycles de production et d'utilisation de l'hydrogène. Sur ce schéma apparaissent les émissions de gaz carbonique (CO₂) inhérentes à la production d'hydrogène qui devront être prises en compte dans les analyses énergétiques du « puits à la roue ». Il faut noter, dans le cas de l'utilisation de gaz issus de la biomasse, une fixation initiale de gaz carbonique au cours de la production de combustible équilibrant le bilan de transformation en hydrogène sur l'ensemble de la chaîne.

On classe aujourd'hui l'hydrogène en fonction de son mode de production et de son intensité carbone :

- l'hydrogène gris non bas carbone obtenu principalement à partir d'énergie fossile ;
- l'hydrogène vert bas carbone obtenu par de l'électricité renouvelable (hydro, éolien, solaire) ;
- l'hydrogène bleu bas carbone obtenu soit par électricité nucléaire ou énergie fossile avec capture du CO₂.

L'hydrogène gris obtenu à base d'hydrocarbures représente l'essentiel de la production (96 % de part de marché). Il s'obtient majoritairement à base de méthane (49 %), de pétrole (29 %) et de charbon (18 %).

L'hydrogène bleu est obtenu à partir de moyens de production d'hydrogène gris auxquels on adjoint des technologies supplémentaires de séquestration de carbone (CCUS, pour *Carbon Capture, Utilisation and Storage* en anglais). Des doutes quant au modèle économique de cette solution qui ajoute de nombreux processus et donc un surcoût notable, au modèle énergétique puisque la dissociation du carbone exige beaucoup d'énergie au travers de son

transport et de sa compression pour enfouissement, et encore plus fondamentalement, à la viabilité environnementale puisque la durée effective du stockage dans des couches géologiques profondes n'est pas du tout garantie à ce jour.

Concernant l'hydrogène vert en revanche, la baisse très rapide du coût des énergies renouvelables (solaire, éolien terrestre et éolien maritime) laisse entrevoir des productions intermittentes à très grande échelle dans les décennies à venir. La solution la plus rationnelle à tout point de vue est d'électrifier les nombreux usages industriels, et pour cela de renforcer la structure des grands réseaux électriques continentaux. Néanmoins, à plus long terme, et pour renforcer la pénétration des énergies renouvelables dans les usages finaux, le vecteur d'énergie dihydrogène peut devenir un maillon essentiel car sa grande densité massique et volumique lui permet de stocker l'énergie intermittente sur de grandes échelles de temps (des mois) et ainsi assurer la désynchronisation des besoins de la production, et il est très polyvalent puisqu'il peut être produit par l'électrolyse de l'eau grâce à l'électricité éolienne ou solaire ou la biomasse (dissociation chimique des chaînes organiques d'origine végétale par voies thermochimiques ou biologiques).

Même si, du point de vue économique, le reformage est à ce jour la solution la plus intéressante, il paraît évident que les voies de production impliquant l'utilisation de combustibles fossiles devraient être rapidement abandonnées au profit de production d'hydrogène vert utilisant des sources d'énergie renouvelables.

■ **Électrolyse de l'eau**

Ce procédé est bien adapté aux stations de distribution en zone urbanisée où l'électricité est l'énergie la plus facilement disponible. Le schéma de principe comprend un électrolyseur alimenté par le réseau électrique et en eau à partir de l'alimentation publique en eau potable à travers un élément purificateur. L'hydrogène produit est purifié, puis comprimé, pour être stocké avant son transfert

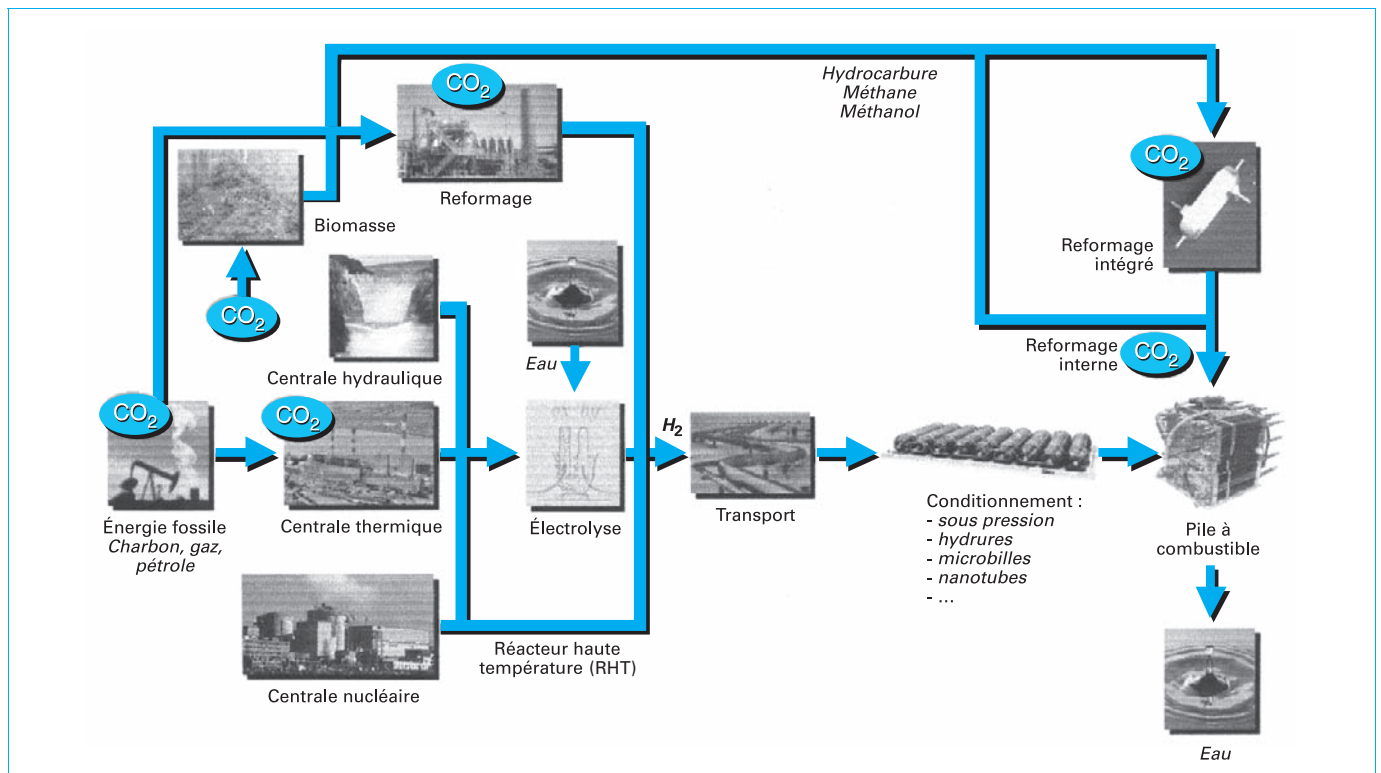


Figure 21 – Filière hydrogène possible partant de la production jusqu'aux consommateurs (d'après document interne CEA)

dans les réservoirs des véhicules. L'oxygène est, quant à lui, valorisé ou rejeté dans l'atmosphère. La technique de l'électrolyse sous pression actuellement développée est encore plus adaptée puisqu'elle allège le premier étage du groupe de compression de l'hydrogène produit. L'électrolyse permet la production d'hydrogène à base d'énergie renouvelable, qu'elle soit solaire, éolienne ou hydraulique. Dans le premier cas, celui de l'énergie solaire, l'installation des panneaux photovoltaïques peut se faire sur le toit même de stations urbaines alors que les stations liées à l'énergie éolienne ou hydraulique s'imaginent plutôt implantées dans les zones périurbaines ou rurales. Des sociétés comme ATAWAY et McPhy Energy proposent des stations de distribution d'hydrogène basé sur l'électrolyse de l'eau.

■ Hydrogène liquide

Dans les situations où l'hydrogène liquide peut être acheminé (port, proximité de voie d'eau, de chemin de fer, etc.) et lorsqu'il n'est pas directement distribué dans des réservoirs automobiles prévus à cet effet, il est envisageable de le transformer, dans la station-service même, en gaz comprimé par réchauffement.

■ Production par biomasse

Quant à la production à partir de la biomasse, parce que complexe par la succession d'étapes qu'elle comporte, elle est, a priori, peu adaptée à la production d'hydrogène en station.

3.3.2 Stockage et interaction avec le réseau électrique

Pour pallier la variabilité de la production de certaines énergies renouvelables, il est nécessaire de pouvoir stocker l'électricité. Le stockage doit répondre à certaines temporalités : journalière, hebdomadaire et inter-saisonnière. L'hydrogène par son potentiel à stocker de grande quantité d'énergie pourra répondre aux deux dernières temporalités, l'Ademe évalue à 24 TWh le stockage nécessaire si 100 % de la production française d'électricité était faite par de l'énergie ENR (figure 22).

Lorsque la production est excédentaire on utilise l'électricité pour produire par électrolyse de l'eau de l'hydrogène que l'on peut stocker de différentes manières (dans les hydrures, sous pression, stockage massif en cavités salines). L'intérêt de ce stockage est de pouvoir ensuite reconvertir cet hydrogène en électricité et ainsi optimiser la production électrique et pallier les intermittences de production des énergies renouvelables éoliennes et solaire et, enfin, répondre aux pointes de consommation. Cet hydrogène pourra être reconverti en électricité via une pile à combustible à un moment de plus forte demande ou être injecté dans le réseau de gaz naturel et être brûlé dans une centrale thermique (*Power to Gas*).

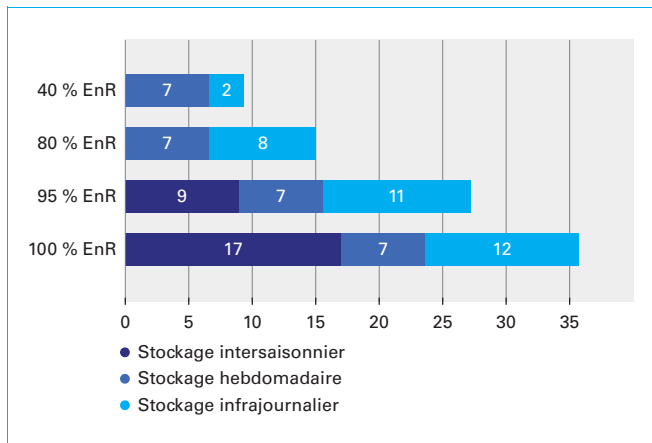


Figure 22 – Stockage (TWh) à installer en fonction du taux ENR (d'après [14])

Le stockage de l'électricité sous forme d'hydrogène est une technologie en développement. Des recherches sont en cours pour augmenter le rendement énergétique en récupérant la chaleur perdue mais la restitution sous forme d'électricité reste faible (de 30 % à 50 %). Sa réactivité permet de l'identifier comme une technologie adéquate pour faciliter l'intégration des ENR non pilotables dans le réseau.

À l'horizon 2035, l'Ademe évalue le potentiel d'hydrogène produit à partir d'électricité en France en ayant recours au *Power to Gas* à environ 30 TWh par an [17].

La Programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE) a planifié 10 à 100 MWh de démonstrateurs *Power to gas* en 2028. La PPE mentionne que « par rapport à d'autres solutions de stockage telles que les batteries, l'hydrogène est actuellement le moyen de stockage passif inter-saisonnier le plus prometteur » mais précise que « le besoin de mettre en œuvre du *Power to gas* à grande échelle n'apparaîtra vraisemblablement pas en France avant 2035 ».

3.3.3 Distribution de l'hydrogène

Il existe plusieurs stratégies concernant la distribution des carburants pour les véhicules à piles à combustible. Pour le long terme (à 40 ou 50 ans), la plus simple consistera certainement à distribuer de l'hydrogène pur dans des stations-services prévues à cet effet. Cela pose dès aujourd'hui le problème de la production d'hydrogène et de l'infrastructure pour sa distribution. En effet, même si plusieurs milliers de kilomètres (2 500 km) de réseaux de canalisations sous pression à plusieurs dizaines de bars existent depuis de nombreuses années dans le nord de la France (figure 23), ce maillage devra être étendu avec de fortes contraintes réglementaires. Cette solution impliquant une production centralisée d'hydrogène se place donc à très long terme.

Dans des délais moins longs pourraient exister une production locale d'hydrogène avec un stockage minimisé et une distribution correspondant à la demande, le mode de production pouvant s'adapter aux développements techniques.

Exemple

Des stations basées d'une part sur l'électrolyse de l'eau et d'autre part sur le reformage de gaz naturel existent au Japon (Tokyo, Yokohama, Takamatsu) et près de Munich, en Allemagne, pour alimenter une flotte de bus à pile à combustible.

Ces stations devraient coexister avec la distribution de combustibles fossiles classiques alimentant les véhicules à moteurs thermiques. Enfin il avait été envisagé de créer une infrastructure pour la distribution de méthanol basée sur l'infrastructure existante de distribution. Cette voie est aujourd'hui abandonnée tant pour des raisons de toxicité du méthanol, combinées à des problèmes de miscibilité avec l'eau, que pour des raisons d'incompatibilité chimique des matériaux utilisés classiquement dans la distribution et le stockage des hydrocarbures avec des alcools et contrainte CO₂.

■ Distribution d'hydrogène liquide

Quel que soit son mode de production (électrolyse, reformage, etc.) l'hydrogène est toujours obtenu à l'état gazeux et, pour devenir liquide, il doit subir un processus de refroidissement par détentes successives qui nécessite une importante et coûteuse installation, sans compter les pertes d'énergie associées. Dans une station de distribution, on imagine que l'hydrogène produit sur place à l'état gazeux soit distribué comme tel et que pour une distribution à l'état liquide l'approvisionnement se fasse par camions citernes assurant la liaison avec une unité de liquéfaction localisée ailleurs.

Sous la forme liquide l'hydrogène offre le meilleur rapport quantité stockée/volume, donc devrait être bien adapté au stockage à bord des voitures particulières. Malheureusement, cette solution exige un équipement cryogénique performant et l'ébullition du liquide due aux inévitables pertes thermiques, si réduites soient-elles, exige un réservoir embarqué ouvert permettant un dégagement permanent d'hydrogène. On évite ainsi l'accroissement de la pression dans le

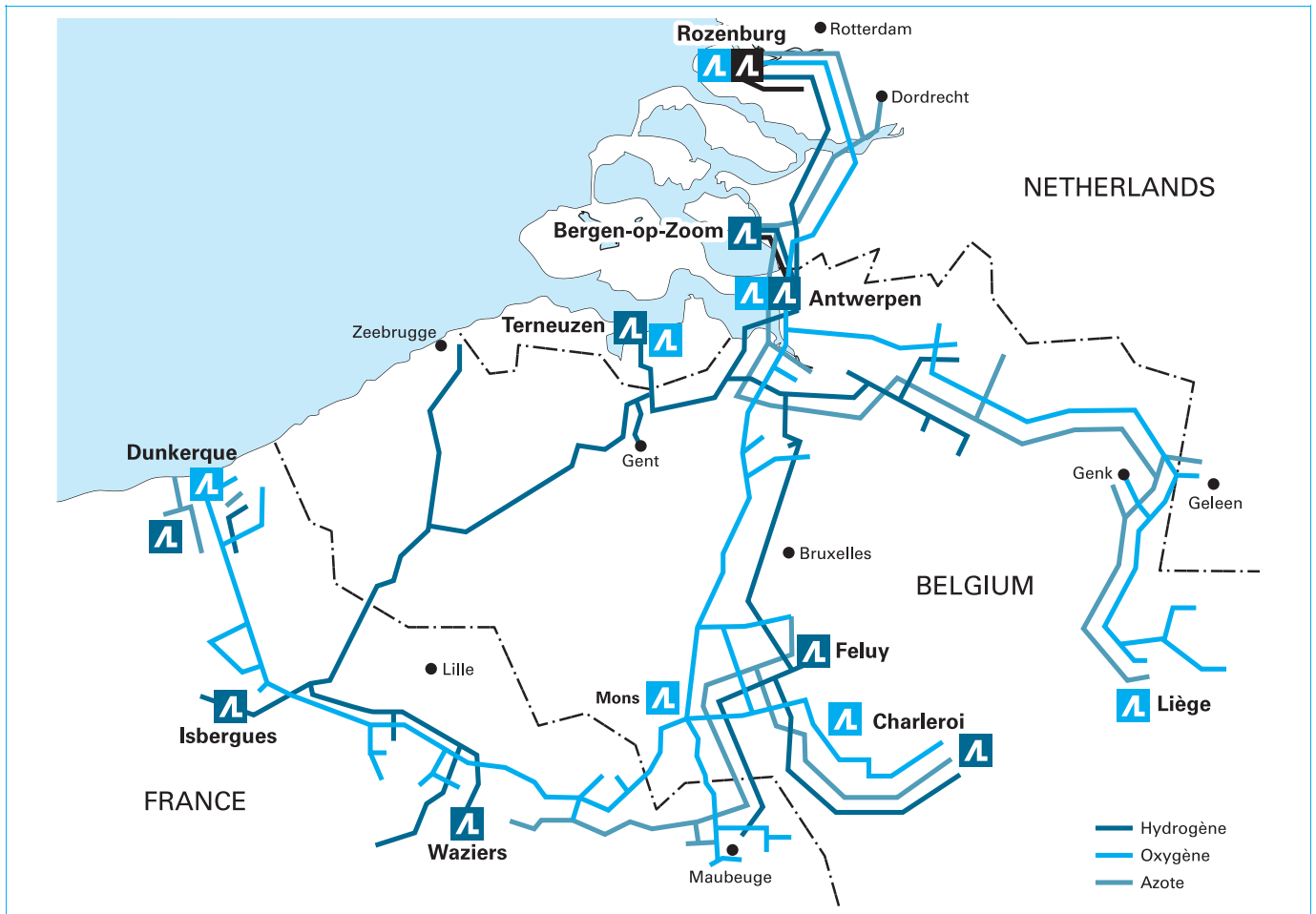


Figure 23 – Réseau hydrogène Air Liquide du nord de l'Europe (source Alphéa et AFH2)

réservoir (ce serait le cas si celui-ci était étanche). La perte en masse correspondante est de l'ordre de 1 % par jour. De plus, pour des raisons de sécurité, l'utilisateur d'un véhicule ainsi équipé ne peut pas stationner dans un lieu confiné. Néanmoins, cela reste, à la limite possible pour deux à trois jours avec des réservoirs étanches résistant à une pression de 0,5 à 0,8 MPa du type de ceux des anciens prototypes 735 i de la firme BMW (année 1988), 750 hl (1999), Mini Cooper et 745 h (2001).

Un réservoir à hydrogène liquide a, par le passé, équipé le prototype à pile à combustible Renault Fever (1997), les modèles Daimler-Chrysler Nocar 4 (1999 et 2000) et le petit utilitaire Sprinter (2001) ainsi que des prototypes General Motors, modèle Opel/Zafira/HydroGen1 (2000-2003). En fait, en raison des progrès réalisés de nos jours dans la technologie des réservoirs composites à hydrogène comprimé, on n'a plus recours à cette technologie de l'hydrogène liquide pour les véhicules légers. Cependant, pour les gros véhicules, les poids lourds, l'entreprise Nikola Motor Company a mis au point en 2019 des camions à pile à combustible d'une charge de 36 t alimentés par un réservoir de 100 kg d'hydrogène liquide.

■ Distribution d'hydrogène comprimé

Le stockage de l'hydrogène sous forme de gaz comprimé est une technologie qui s'est répandue grâce aux progrès réalisés dans le domaine des réservoirs composites à 350, 500 et 700 bar. C'est le

stockage embarqué de l'hydrogène retenu par tous les constructeurs automobiles. Pour cette distribution il existe deux possibilités :

- le transfert direct du gaz sous pression ;
- l'échange de réservoir.

■ Transfert direct du gaz sous pression

Celui-ci a lieu à partir d'une réserve d'hydrogène comprimé dans la station. Selon le modèle de véhicule, la pression finale dans le réservoir est de 35 MPa ou 70 MPa. Si la manipulation du gaz sous pression est, à ce jour parfaitement maîtrisée, son transfert à répétition dans une station-service demande des aménagements particuliers. Alors qu'un liquide s'écoule aisément d'un récipient à l'autre, par gravité ou par l'action d'une pompe volumétrique, un gaz ne se déplace en grande quantité que lorsqu'une différence de pression notable, plusieurs MPa, est maintenue entre l'amont et l'aval. Pour remplir un réservoir on peut :

- soit effectuer directement le transfert à l'aide d'un compresseur : cela exige de celui-ci un minimum de continuité et de stabilité de fonctionnement, en particulier pour ce qui est du débit, une situation peu compatible avec les nombreux remplissages successifs à réaliser ;
- soit effectuer le transfert à partir d'une réserve en surpression. C'est une solution qui est limitée car elle exige que la pression du gaz dans la réserve reste toujours supérieure à la pression finale de remplissage des véhicules, c'est-à-dire une réserve à haute pression ayant un grand volume.

C'est en fait la superposition des deux solutions qui convient le mieux : l'hydrogène de la réserve est maintenu en permanence à une pression supérieure à la pression de remplissage grâce à un compresseur commandé par un automatisme régulateur de pression. Le compresseur est alors alimenté à partir d'une autre réserve dont la pression n'a pas à être régulée. Lors de son remplissage, le réservoir du véhicule s'échauffe car la pression de l'hydrogène y augmente suffisamment rapidement pour que cette compression soit quasi adiabatique (les échanges de chaleur avec l'extérieur n'ayant pas le temps de se produire). L'élévation de température correspondante, dépend surtout de la vitesse de transfert et des différentiels de pression amont-aval. Elle peut être de plusieurs dizaines de degrés, voire plus. C'est pourquoi la maîtrise et le contrôle rigoureux du transfert sont nécessaires pour éviter la détérioration du réservoir composite, mais aussi pour effectuer l'opération dans le temps le plus court possible (3 à 5 minutes) et garantir la quantité de gaz délivrée (facturation réelle de l'énergie délivrée). En effet, lorsque la température sera revenue à l'ambiante, la pression du gaz aura diminué et pourrait être nettement inférieure à celle initialement prévue. Pour éviter cet inconvénient, le gaz délivré est préalablement refroidi aux environs de -40°C afin que le réchauffement au cours du remplissage du réservoir du véhicule amène l'hydrogène à une température voisine de l'ambiante. Cette solution est aujourd'hui d'une pratique courante en particulier pour les remplissages à 700 bar.

■ Échange de réservoir

Cette solution qui consiste à remplacer le réservoir vide par un réservoir rempli préalablement nécessite quelques moyens de manutention mais est relativement rapide. De tels réservoirs interchangeables équipaient le véhicule de démonstration Partner Taxi PAC de PSA en 2001 : 9 bouteilles de type composite, d'un volume total de 80 litres, remplies d'hydrogène comprimé à 30 MPa soit une masse totale de 1,5 kg. Aucune suite n'a été donnée à cette solution à l'exception de certains modèles de véhicules 2 roues (Aqius, Pragma industrie).

À retenir

- Le stockage d'hydrogène retenue pour le transport terrestre est sous pression à 350 ou 700 bar.
- La production d'hydrogène doit être décarbonée et est obtenue par électrolyse de l'eau.
- L'hydrogène permet de pallier la variabilité de la production de certaines énergies renouvelables avec la possibilité de « stocker » l'électricité.
- La distribution de l'hydrogène est réalisée en station avec production *in situ* le cas échéant.

4. Véhicules pile à hydrogène commercialisés

Le domaine des transports représente aujourd'hui le premier marché des applications des piles à combustible au niveau mondial. C'est aussi celui qui présente la plus forte croissance (figure 24). C'est bien sûr la commercialisation en volume des véhicules légers, bus et maintenant poids lourd et train qui tire ce marché.

4.1 Automobile et utilitaires légers

■ Renault

Développés en partenariat entre Renault et Symbio FCell, les Kangoo ZE-H2 disposent d'une autonomie de plus de 300 km grâce à sa batterie lithium-ion de 33 kWh et d'un réservoir de

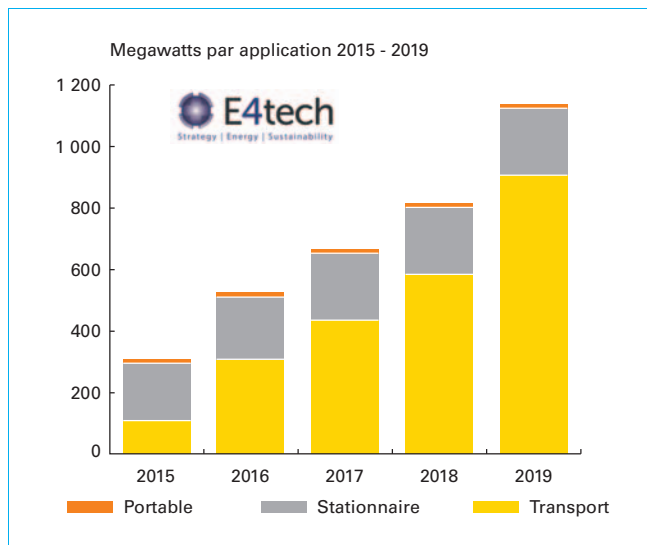


Figure 24 – Évolution du marché des PAC (d'après [16])

1,78 kg de H₂ à 350 bar alimentant une pile à combustible de 5 kW. Le Master ZE H2 est venu élargir la gamme en 2020.

■ Stellantis

C'est aussi Symbio FCell qui fournirait à Stellantis (ex-Groupe PSA) les piles hydrogène qui seront montées sur les Peugeot Expert, Citroën Jumpy et Opel Vivaro, les réservoirs proviendront de Faurecia. L'architecture choisie est différente de celle de Renault puisque ce véhicule est un hybride rechargeable batterie/hydrogène qui revendique 400 km d'autonomie en cycle WLTP. Les trois réservoirs situés sous le plancher permettent de stocker 4,4 kg d'hydrogène sous 700 bar, la pile à combustible de 45 kW est associée à une batterie de 10,5 kWh de capacité autorisant un roulage de 50 km sans utiliser l'hydrogène.

■ Honda

La Honda FCX Clarity a été proposé en leasing en 2008 à \$ 600/ mois. Elle est équipée d'une PAC de 100 kW alimentée par 5 kg d'hydrogène stocké à 700 bar. L'autonomie annoncée est de 570 km. Depuis 2015 la Honda Clarity Fuel Cell est commercialisée au Japon, au Canada et aux États-Unis.

■ Hyundai

Depuis 2015 Hyundai commercialise un iX35 Fuel-Cell (figure 25) qui vient d'être remplacé par le Nexo Fuel-Cell. Le Nexo est équipé d'une PAC de 95 kW, d'une batterie tampon de 40 kW et avec ses 5 kg d'H₂ à 700 bar, il offre 600 km d'autonomie. Le Hyundai Nexo est affiché à 76 500 € hors options. Bertrand Picard pilote de l'avion solaire Solar Impulse a réalisé le record de parcourir 778 km avec un Nexo hydrogène.

■ Mercedes

Le GLC F-Cell est le SUV à hydrogène de Mercedes, C'est un hybride rechargeable qui combine une batterie rechargeable 13,8 kWh à une pile à combustible lui conférant 470 km d'autonomie grâce à 4 kg d'hydrogène stocké sous 700 bar. Préférant pour le moment se concentrer sur les véhicules électriques à batteries, Mercedes vient d'annoncer la fin de carrière du GLC F-Cell.

■ Toyota

En 2015 la Toyota Mirai (figure 25) a été le premier modèle à hydrogène de Toyota mais aussi la première voiture à hydrogène industrialisée à grande échelle dans le monde. La nouvelle Toyota Mirai est commercialisée en France depuis 2021. C'est maintenant

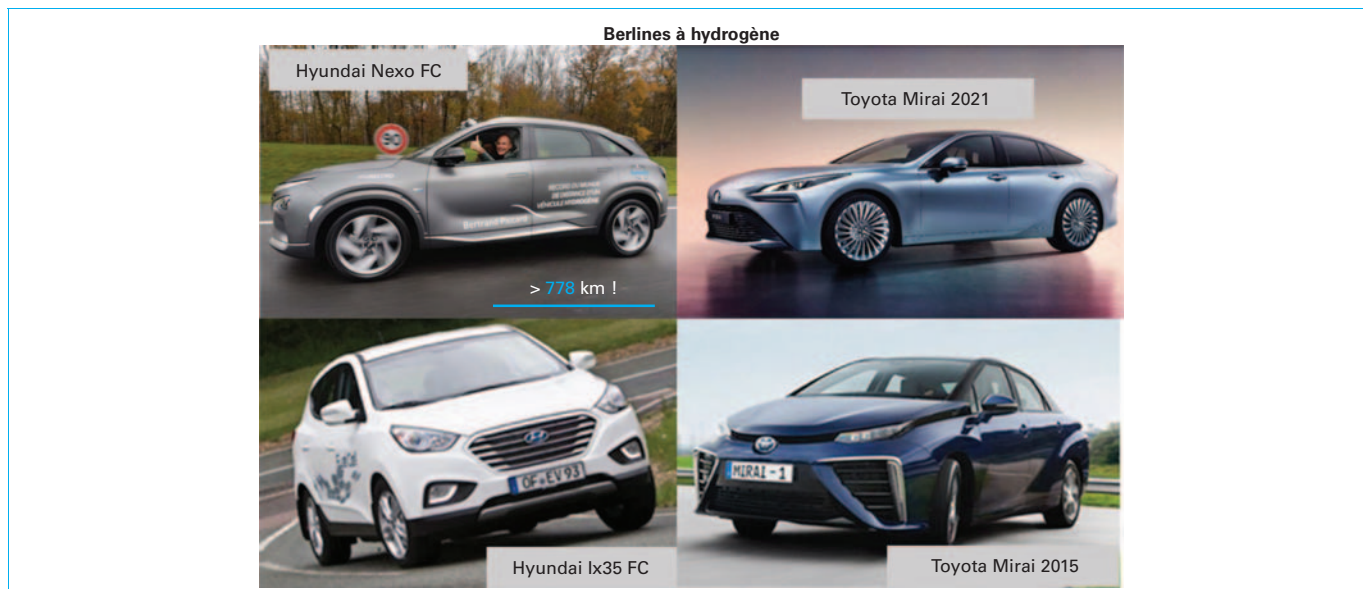


Figure 25 – Toyota Mirai FCV, Hyundai ix35 et Nexo

Tableau 9 – Segmentation du marché PL et analyse batterie/PAC

Type de véhicule	Poids du véhicule [t]	Circuit moyen [km/jour]	Conso moyenne diesel [L/jour]	Conso moyenne hydrogène [kg/jour]	Solution : hydrogène ou batterie
Urbains de livraison	7,5 à 16	100 à 200	23 à 46	5 à 10	Batterie
Bennes à ordures	26	100	70	10 à 12	Batterie
Camions de chantier	32	150	60	12	Batterie
Livraison régionale	16 à 32	200 à 500	50 à 125	12 à 31	Batterie jusqu'à 250 km
Semi-remorques régionaux	16 à 40	200 à 500	64 à 160	16 à 40	Batterie jusqu'à 250 km
Semi-remorques long-courriers	32 à 44	500 à + 800	160 à 256	40 à 64	Hydrogène

une propulsion avec 3 réservoirs implantés en T, son autonomie progresse de 500 à 650 km. Ces performances sont obtenues grâce à l'augmentation de la capacité de stockage d'hydrogène + 20 %, une récupération d'énergie + 43 % et une consommation d'hydrogène en baisse de 10 %. Son tarif débute à partir de 67 900 €.

4.2 Véhicules industriels (poids lourds)

Pour bien appréhender le marché des camions, il y a lieu de rappeler sa segmentation et aussi d'analyser la consommation de carburant des motorisations diesel et PAC (tableau 9) car le coût du carburant est un poste important du TCO (*Total Cost of Ownership*). Pour un litre de diesel à 1 € HT, la parité du poste coût carburant pourra être obtenue pour 1 kg d'hydrogène entre 4 et 5 € HT.

On constate qu'en fonction des applications le choix va se porter sur les batteries ou l'hydrogène, ainsi pour des usages nécessitant moins de 250 km par jour la solution batterie est bien adaptée. Pour les usages intensifs qui nécessitent une forte autonomie et un faible temps de recharge, l'hydrogène est particulièrement pertinent, en

plus d'offrir une plus grande autonomie, son impact sur la capacité de chargement des véhicules est limité (figure 26).

Quelques réalisations actuelles dans le domaine des poids lourds :

Toyota a déployé dans le port de Los Angeles depuis 2017 des démonstrateurs de véhicules semi-remorques PAC de 26 à 44 tonnes. Dans le domaine des véhicules de livraison de 3,5 tonnes. Il a déployé au Japon des flottes de petits porteurs pour la livraison des magasins 7-Eleven. Toyota avait dévoilé son premier tracteur à PAC en 2017 utilisant un système basé sur la précédente génération de Mirai. Le nouveau système utilise un stockage d'hydrogène situé derrière la cabine du tracteur composé de 6 réservoirs d'hydrogène de la même capacité que les prototypes précédents. Toyota a également amélioré le camion avec une batterie lithium-ion plus puissante. L'autonomie est annoncée à plus de 483 km pour un poids à pleine charge de 36 tonnes.

Iveco et Nikola ont présenté leur camion électrique pile à combustible : le Nikola TRE disponible à partir de 2025.

Re-Fire, entreprise chinoise, a déjà mis plus de 500 véhicules de 7 tonnes sur la route et annonce des déploiements beaucoup plus massifs pour les années à venir.

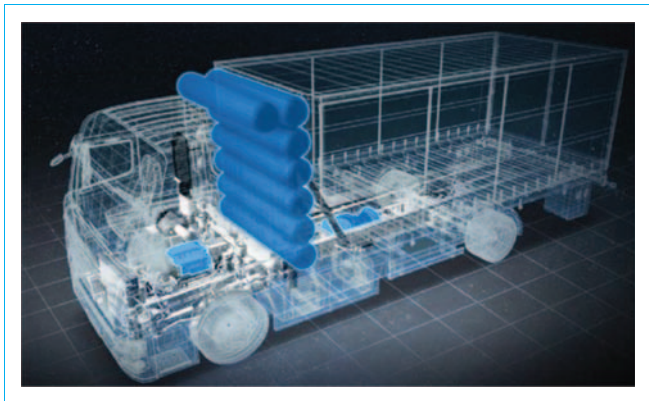


Figure 26 – Architecture d'un camion PAC

Hyzon Motors, jeune constructeur spécialiste des camions à pile à combustible, vient d'annoncer une commande de plusieurs centaines de véhicules en Nouvelle-Zélande. Celle-ci s'inscrit dans le cadre d'un partenariat conclu avec Hiringa Energy, une entreprise spécialisée dans l'hydrogène vert. Ils sont industrialisés aux Pays-Bas, les premiers véhicules devraient être mis en service dès la fin 2021. Dotés d'un PTAC de 58 tonnes, ils disposeront d'une autonomie de 680 kilomètres.

Mercedes a annoncé pour 2023 le GenH2 Truck, son semi-remorque longue distance à pile à combustible doté d'une autonomie de plus de 1 000 kilomètres. Ses choix pour les autonomies de moins de 500 km s'orientent vers les solutions à batterie.

Hyundai présente le Xcient Fuel Cell équipé de deux piles de 95 kW. Il est doté de sept réservoirs offrant une capacité de stockage combinée d'environ 32 kg d'hydrogène. Le Xcient Fuel Cell revendique une autonomie d'environ 400 km avec une simple charge, en configuration porteur avec traction d'une remorque de 18 t. Hyundai prévoit un déploiement en 2025 sur le territoire Suisse de 1 600 porteurs 26 tonnes. Le temps de recharge de chaque camion est compris approximativement entre 8 et 20 minutes.

Scania, filiale de Volkswagen, a de son côté décidé de repousser la commercialisation des camions à hydrogène à après 2030. Il met en avant la faible efficacité énergétique des camions hydrogène qui nécessitent trois fois plus d'électricité renouvelable par rapport à un camion électrique à batterie. Ainsi que des coûts plus élevés à différents niveaux par rapport aux modèles électriques à batterie.

4.3 Bus et car

En Europe, les territoires et les municipalités envisagent de remplacer les bus diesel par des bus électriques. Deux technologies sont aujourd'hui en lice pour accomplir cette mutation, les bus électriques à batterie et les bus électriques à pile à hydrogène. Chaque technologie a ses particularités qu'il y a lieu de prendre en considération car ce n'est pas juste le remplacement du bus mais bien la mise en place d'un système complet qu'il faut envisager : véhicule, mais aussi station d'avitaillement, et utilisation d'une énergie décarbonnée. Comme dans le cas de la batterie, le déploiement de véhicule hydrogène a commencé par le bus. Les premiers démonstrateurs ont été déployés en Europe dans les années 2007 et 2008 soutenus par des programmes d'aides européens. Forts des retours d'expériences, plusieurs flottes plus importantes sont désormais déployées en Allemagne, Royaume-Uni et en Italie. Enfin le consortium H2 Bus Europe vient de commencer le déploiement des premiers bus hydrogène au Royaume-Uni, Danemark et Lettonie. En 2023, ce sont 600 bus en tout qui auront été déployés.

En Asie, le déploiement des bus se fait à grande vitesse. En Corée et au Japon, les constructeurs Hyundai et Toyota, leaders

des véhicules particuliers à hydrogène, débutent le déploiement de bus.

La Chine qui est le leader des bus électriques à batterie était en retard sur le déploiement des bus à hydrogène, elle est aujourd'hui en cours de combler ce retard car des projets de déploiement massifs sont attendus pour 2022 (Jeux Olympiques de Pékin).

En France, trois villes se sont équipées de bus hydrogène (Lens, Pau et Versailles) et les perspectives sont de 150 bus à hydrogène déployés sur le territoire dans les 2 ans à venir, plus d'une vingtaine de villes envisagent de déployer des bus à hydrogène. C'est pour cela que l'UGAP (Union des groupements d'achats publics) lance une démarche d'achats groupés pour agréger les demandes des collectivités intéressées et favoriser les achats groupés auprès des constructeurs comme Vanhool avec son bus A330 FC de 12 m, et Safra avec ses bus Businova H2 en 10 et 12 m (figure 27).

Panorama des bus PAC disponibles en Europe :

Van Hool, constructeur historique et leader sur le marché des bus électriques à hydrogène en Europe, propose l'A330FC qui revendique 350 km d'autonomie avec un plein. La pile à combustible de 100 kW fournie par Ballard est associée à une batterie de 24 kWh. Elle est alimentée par 5 réservoirs de 350 bar installés sur le toit. Van Hool propose aussi l'ExquiCity FC, classé dans la catégorie des trambus il se décline en deux longueurs : 18 et 24 mètres. Les performances sont similaires à l'A330FC.

Daimler via sa filiale EvoBus avait été un des premiers constructeurs de bus à déployer une série de 20 bus électriques à hydrogène dans les projets de déploiement européens comme le projet « CUTE (Clean Urban Transport for Europe) » (2003-2010). Comme pour les véhicules légers et les poids lourds, Daimler s'est ensuite concentré sur les véhicules à batteries. Il a récemment annoncé via sa filiale Mercedes Buses se positionner à nouveau sur ce marché avec l'intention de produire à partir de 2021-22 une version avec prolongateur d'autonomie hydrogène de son modèle de bus électrique à batterie eCitaro, la version avec prolongateur d'autonomie hydrogène permettant d'atteindre une autonomie de 400 km.

Wrightbus est un constructeur de bus d'Irlande du Nord qui, historiquement, a par exemple déployé à Londres dans le cadre du projet européen CHIC (Clean Hydrogen in European Cities), 8 bus électriques à hydrogène (équipés de PAC Ballard). En 2016, Wrightbus a présenté un nouveau modèle de bus électrique à hydrogène, à deux étages, permettant de répondre à cette demande spécifique du marché britannique, et la ville de Londres a commencé par commander 20 unités de ce modèle en 2019. Aujourd'hui, Wrightbus se positionne sur des commandes de volumes importants sur le marché britannique, et consolide son offre avec des bus électriques à hydrogène pour les marchés européens, en étant notamment le constructeur qui fait partie du groupement d'industriels du projet H2Bus Europe (déploiement massif de 600 puis jusqu'à 1 000 bus électriques à hydrogène dans plusieurs marchés européens).

Solaris est un constructeur historique (et un des leaders) sur le marché des bus électriques à hydrogène en Europe. Solaris présente l'Urbino 12 à pile à combustible équipé d'un ensemble de piles à combustible d'une puissance de 70 kW, l'hydrogène est stocké à 350 bar dans cinq réservoirs (montés sur le toit du bus), qui lui confère une autonomie de près de 400 km.

Advanced Public Transport Systems (APTS), filiale de VDL Weweler Parts, avait historiquement créé les bus articulés de 18 m appelés Phileas, véhicules, hydrogène alimentés par une PAC de 150 kW Ballard. Deux de ces véhicules avaient été déployés à Cologne, et deux à Amsterdam. Depuis 2017, un nouveau modèle de bus électrique à hydrogène VDL est testé à Eindhoven : un Citea Électrique PAC de 12 m.

ADL (Alexander Dennis Limited), en partenariat avec BYD, construit actuellement des bus électriques à hydrogène, à un et deux étages, principalement pour le marché britannique.

Safra est le premier constructeur français à s'être positionné sur ce marché et a déjà remporté plusieurs contrats en France. Le

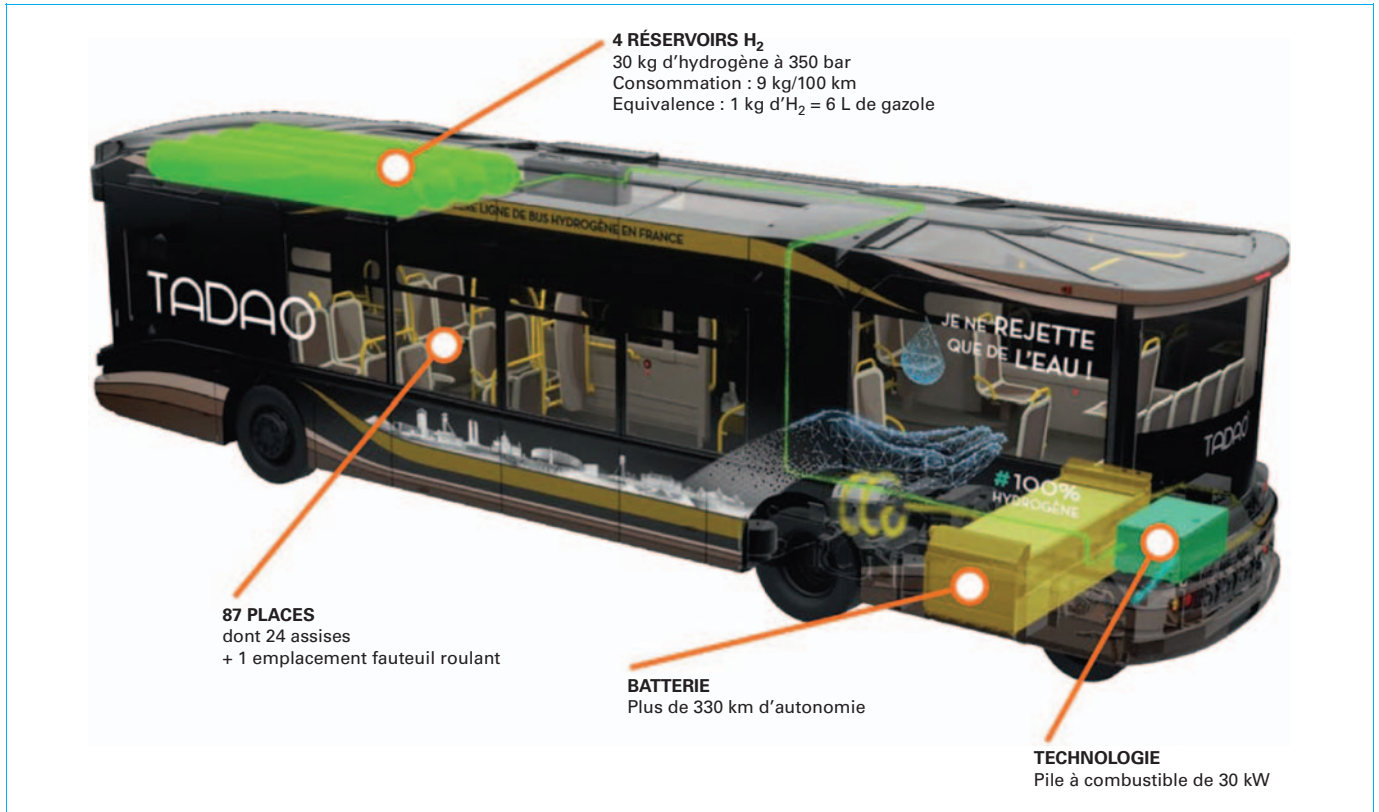


Figure 27 – Schéma des composants d'un bus à pile à hydrogène : modèle Businova de Safra pour le SMTAG

Businova H2 développé autour de l'architecture électrique initial du Businova à batterie, la motorisation électrique de 250 kW et la batterie de 132 kWh sont complétées par une PAC à hydrogène de 30 kW fournie par Michelin. Elle est alimentée par des réservoirs stockant 28 kilos d'hydrogène à 350 bar de pression. L'autonomie est de 300 km.

4.4 Train

Le train PAC hydrogène devient une réalité comme alternative au diesel équipant le réseau non électrifié. En Allemagne où 40 % du réseau n'est pas électrifié, il est prévu le déploiement de 4 000 trains PAC dans les Landers de Basse-Saxe, Rhénanie-du-Nord-Westphalie, Bade-Wurtemberg, et par l'Autorité des transports publics de Hesse.

En France la SNCF vient de commander 15 TER à hydrogène au groupe Alstom qui expérimente déjà ce concept sur l'infrastructure ferrée allemande (depuis 2018 en Basse-Saxe sur un tronçon d'une centaine de kilomètres).

À retenir

- Automobiles et utilitaires légers : les constructeurs français et asiatiques commercialisent des véhicules PAC.
- Véhicules industriels (poids lourds) : la mutation du transport lourd est engagée et les constructeurs commencent à proposer des solutions PAC.
- Bus et cars poussés par les contraintes environnementales les municipalités s'équipent de bus PAC.
- L'équipement de train PAC est pertinent pour les lignes qui ne sont pas équipées de caténaires.

5. Aspects environnementaux et énergétiques

5.1 Production et distribution de l'hydrogène

L'hydrogène peut être produit par vaporeformage de combustibles riches en hydrogène. Ce procédé présente un très bon rendement énergétique jusqu'à 90 % (les pertes étant essentiellement thermiques). Cependant le CO₂ émis lors de cette transformation est supérieur à la combustion directe de ces combustibles. L'électrolyse de l'eau est le procédé qui permet si l'électricité utilisée est décarbonnée d'obtenir de l'hydrogène vert. Le rendement de l'électrolyse peut atteindre 85 % pour la technologie PEM (*Proton Exchange Membrane*) de grande taille.

Le transport et la distribution de l'hydrogène nécessitent un stockage sous forme de gaz comprimé ou liquide. Les pertes de compression sont de l'ordre de 10 à 20 % en énergie pour des pressions entre 300 et 700 bar. Pour la liquéfaction de l'hydrogène, les pertes sont de l'ordre de 30 % pour les grosses unités de liquéfaction (1 tonne par heure) pour les petites unités de quelques kilogrammes par heure, les pertes peuvent atteindre 150 % ce qui rend cette solution caduque pour les petites unités.

Le transport par route de l'hydrogène liquide est cinq fois plus performant en termes de volume que le transport de l'hydrogène gazeux mais il demande une logistique de cryogénie à la fois délicate et coûteuse. Le transport du gaz comprimé par gazoduc est le

plus performant (même s'il exige un investissement élevé), il présente en outre une faible perte d'énergie : 1,4 % sur 150 km.

En conclusion, aux regards des bilans énergétiques de la distribution, il ressort que l'hydrogène doit être transporté le moins possible. Pour les grosses quantités, le transport d'hydrogène liquide est envisageable. Pour l'hydrogène gazeux, le transport par gazoduc s'avère être la meilleure solution. La production directe en station peut être une solution à condition que ce soit une station importante pour plus de 100 véhicules par jour.

5.2 Usage du véhicule, considérations énergétiques

Si nous voulons faire le bilan énergétique des véhicules pile à combustible il faut s'intéresser au bilan du puits à la roue en utilisant une production d'hydrogène vert à partir d'électrolyse de l'eau et comparer cela au véhicule à batterie. Produire et distribuer l'hydrogène consomme de l'énergie ceci rentre dans le bilan énergétique. Par rapport à un véhicule à batterie du fait du nombre de transformation de l'énergie (électrolyseur, compresseur et pile à hydrogène) le rendement arrive à 38 % (pour une production en station) en entrée du moteur électrique par rapport à l'énergie électrique prise sur le réseau. Pour le véhicule à batterie ce rendement est de 88 % (figure 28). Ainsi un véhicule pile à hydrogène vis-à-vis du réseau consomme 2 à 3 fois plus d'énergie électrique au kilomètre qu'un véhicule électrique à batterie. En usage réel ce chiffre est plutôt de l'ordre de 2 car le chauffage pour un véhicule à batterie est ponctionné sur l'énergie de la batterie ce qui n'est pas le cas pour la pile à hydrogène qui génère des pertes thermiques de 50 %. Il en est de même pour les émissions de CO₂ (si l'électricité est carbonée) et pour le coût du combustible au kilomètre.

Si l'on s'intéresse à l'efficacité en usage, une comparaison aux autres technologies de chaîne de traction est intéressante. Les technologies d'hybrides permettent des gains énergétiques dans les zones urbaines et périurbaines, pour les longues distances sur autoroute l'hybridation est plutôt un handicap car elle engendre un surpoids qui peut coûter jusqu'à 2 à 3 % de consommation par rapport à un véhicule non hybride suivant le profil de la route.

Les véhicules électriques à batterie et pile à hydrogène maintiennent leurs gains dans tous les usages grâce à l'efficacité de leur chaîne de traction électrique.

La figure 29 compare les différentes technologies de chaîne de traction du micro-hybride à la pile à hydrogène pour des vitesses moyennes en usage réel. L'hybride rechargeable présente l'efficacité du véhicule électrique à batterie dans les zones urbaines et périurbaines tant que sa batterie a de l'énergie disponible puis se retrouve à un niveau supérieur aux moteurs thermiques pour l'usage autoroutier. Les hydrogènes rechargeables pile à combustible ne sont pas représentés sur cette figure. On peut toutefois estimer

qu'ils auraient l'efficacité de l'électrique à batterie puis rejoindraient la consommation des véhicules pile à hydrogène.

Les données du véhicule thermique STT (*Stop and Start*) proviennent de mesures réelles réalisées par PSA sur une 308 essence STT. Les autres courbes (figure 29) sont calculées à partir des cartographies de rendements des chaînes de traction hydrogène et piles à hydrogène.

5.3 Seconde vie, recyclage et valorisation pour les véhicules à hydrogène

En ce qui concerne les piles à hydrogène utilisées dans les véhicules, elles sont très simples à démonter et chaque composant peut être séparé sans outillage particulier. Ainsi il est possible de remplacer le cas échéant les membranes défectueuses et remettre la pile en fonctionnement à 100 % de sa puissance. En fin de vie du véhicule, chaque composant de l'assemblage membrane électrodes (AME) peut être retiré et valorisé dans sa chaîne de matière. Le platine est l'élément qui est le plus rentable à valoriser, des industriels, comme Umicore, en recyclent environ 95 %. La présence du platine dans les pots catalytiques explique l'importance de la filière de recyclage, déjà existante dans le monde automobile.

En ce qui concerne le réservoir, il est conçu pour la durée de vie du véhicule, on vérifie lors des contrôles techniques comme pour un véhicule GNV qu'il ne présente pas de dégradation mécanique. Le règlement CE 79/2009 et sa directive d'application 406/2010 imposent un suivi et un renouvellement préventif des composants de l'ensemble du système hydrogène. Ce renouvellement doit se faire après un nombre de remplissages ou un temps déterminé par le fabricant du composant ou par la réglementation. Après vérification, il n'y a pas nécessairement remplacement de ces composants si ceux-ci ont passé les tests de validation imposés. Il est donc légitime d'envisager de réutiliser ces réservoirs pour un nouvel usage. Pour la seconde vie on peut donc envisager l'utilisation des réservoirs dans une application moins contraignante ayant une pression de fonctionnement inférieure. Ceci imposera une certification type pour application stationnaire, différente de la certification véhicule.

■ Recyclage du réservoir

L'objectif ultime de la fin de vie du composant est le recyclage et la revalorisation de la fibre de carbone qui représente 66 % du réservoir (figure 30). Des techniques de recyclage à fort potentiel sont à l'étude telles que le broyage et la réutilisation en tant que charge dans une matrice similaire ou la calcination pour récupérer de la fibre longue. La fibre de carbone recyclée, dont les propriétés mécaniques sont inférieures à la fibre neuve pourra être aussi réutilisée dans des applications moins contraignantes (pièces mécaniques simples). La filière de recyclage des réservoirs haute pression se mettra en place progressivement en parallèle du déploiement massif des véhicules à hydrogène.

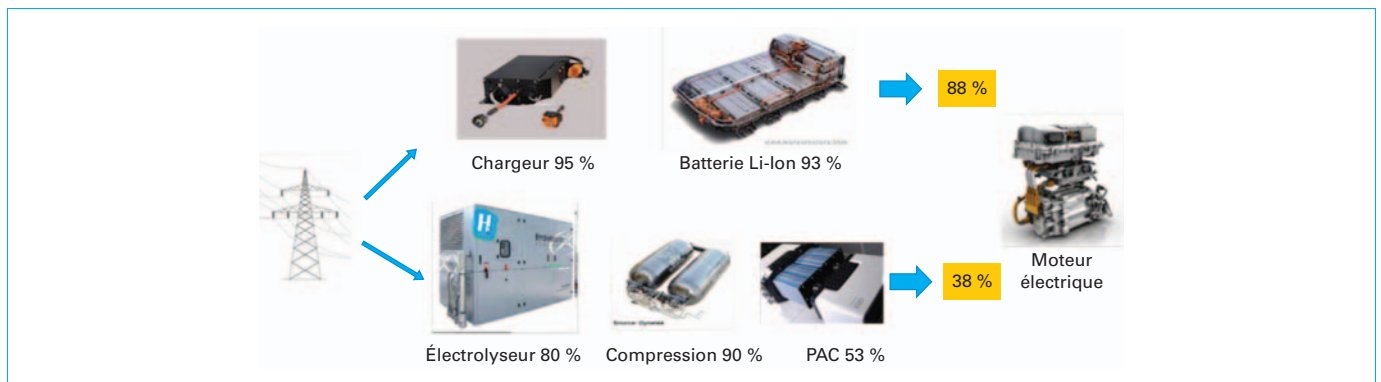


Figure 28 – Comparaison efficacité batterie versus pile à hydrogène (d'après AT&ME)

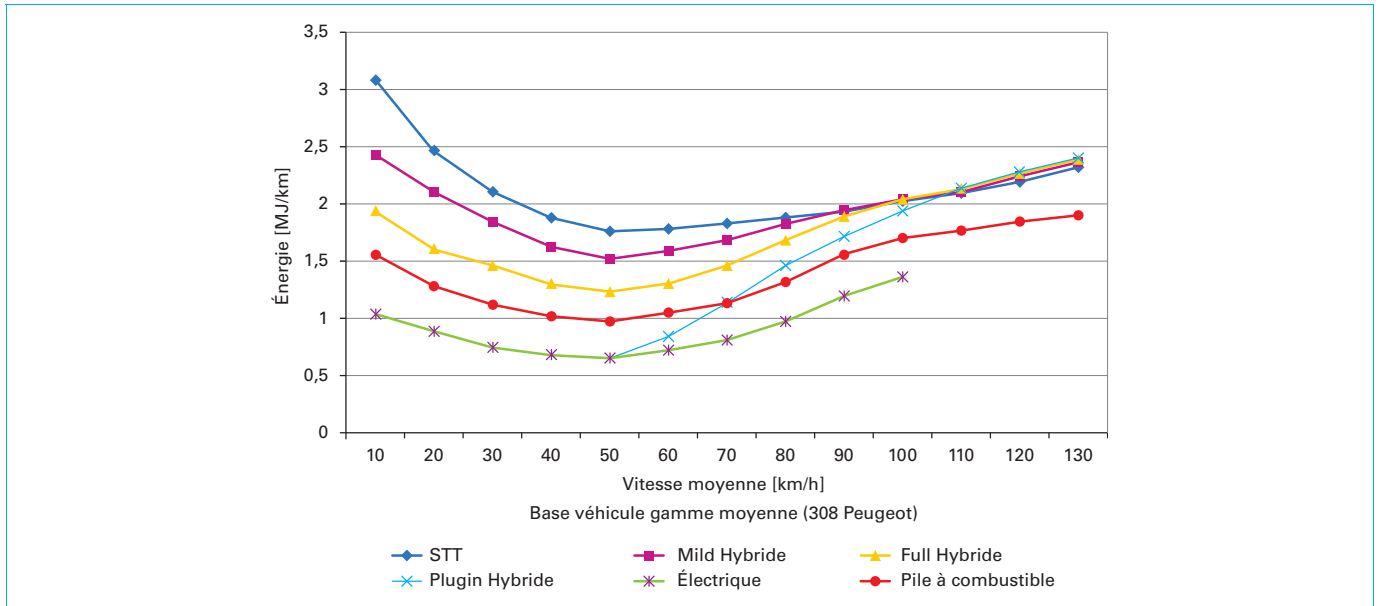


Figure 29 – Consommation énergétique pour différentes technologies de motorisation (d’après AT&ME)

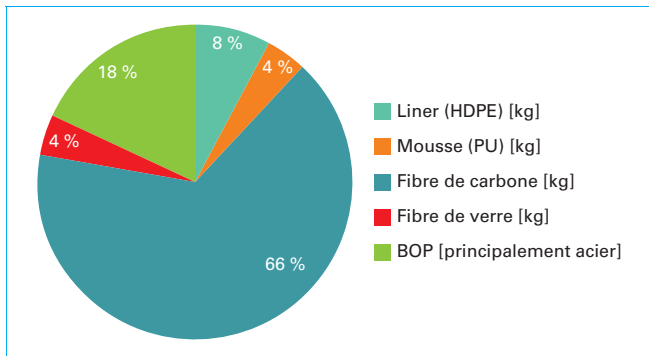


Figure 30 – Composition matière d’un réservoir d’hydrogène

5.4 Analyse de cycle de vie du véhicule léger (ACV)

Au-delà de l’approche du puits à la route le calcul ACV permet d’avoir une approche globale de la construction à la déconstruction. Carbone 4 [11] a réalisé une étude de l’ACV des véhicules équipés de différentes motorisations y compris hydrogène PAC.

La figure 31 présente la comparaison de l’ACV CO₂ des véhicules thermiques, électriques, hybrides rechargeables et pile à hydrogène. Les résultats montrent que l’impact CO₂ en ACV est directement lié au contenu carbone de l’électricité. Les véhicules à traction électrique à batterie (équipés d’une batterie de 40 kWh) présentent avec le mix électrique français une réduction jusqu’à 60 % par rapport à un véhicule thermique équivalent, c’est seulement – 20 % en Allemagne. Pour la PAC la réduction est de 50 % avec le mix électrique français et peut atteindre – 65 % en utilisant uniquement de l’électricité décarbonée. Pour l’Allemagne le résultat pour la PAC est + 150 % pour un mixe très carboné.

L’Ademe a publié en 2020 une étude [9] qui détaille la production et l’usage pour la mobilité légère (VP et VUL). Pour les véhicules à batteries et les véhicules PAC avec hydrogène par électrolyse, la fabrication représente la majeure partie des émissions de CO₂

(plus de 50 %). Le véhicule à batterie (40 kWh) reste meilleur que les véhicules PAC. Si le transport de l’hydrogène comprimé à un impact marginal sur le bilan énergétique (rendement de compression de 90 %), il est important pour les émissions de CO₂ comme le montre cette étude Ademe. Le CO₂ émis pour un transport d’hydrogène entre 0 et 500 km est multiplié d’un facteur entre 1,72 (pour du 500 bar) à 5,69 (pour du 200 bar) (figure 32).

5.5 ACV poids lourds

Comme pour les véhicules légers la mobilité hydrogène pour les poids lourds doit utiliser de l’hydrogène vert (figure 33).

5.6 ACV bus

Les bus électriques et PAC permettent de réduire de façon importante l’impact CO₂ par rapport aux bus diesel. Il faut utiliser de l’électricité décarbonée pour être mieux placé que les bus BioGNV (figure 34). Pour que les bus PAC atteignent les performances CO₂ des bus à batterie alimentés avec le mix électrique français l’hydrogène doit provenir d’électrolyse utilisant de l’électricité complètement décarbonée (éolien).

À retenir
– La seconde vie des piles à combustible et des réservoirs est envisageable. Le recyclage de la pile ne pose pas de problème, il faut cependant travailler sur le recyclage des réservoirs composites.
– Aux regards des bilans énergétiques et environnementaux de la distribution, il ressort que l’hydrogène doit être transporté le moins possible.
– Le bilan énergétique des véhicules PAC est 2 à 3 fois supérieur aux véhicules à batterie.
– Le bilan ACV sur le CO ₂ des véhicules PAC est 2 fois plus faible que les véhicules thermiques correspondants en utilisant de l’hydrogène vert, mais reste supérieur aux véhicules à batterie équipés de batteries de moyenne taille.

Parution : février 2022 - Ce document a été délivré pour le compte de 7200106152 - éditions ti // celine BLONBOU // 90.25.198.236

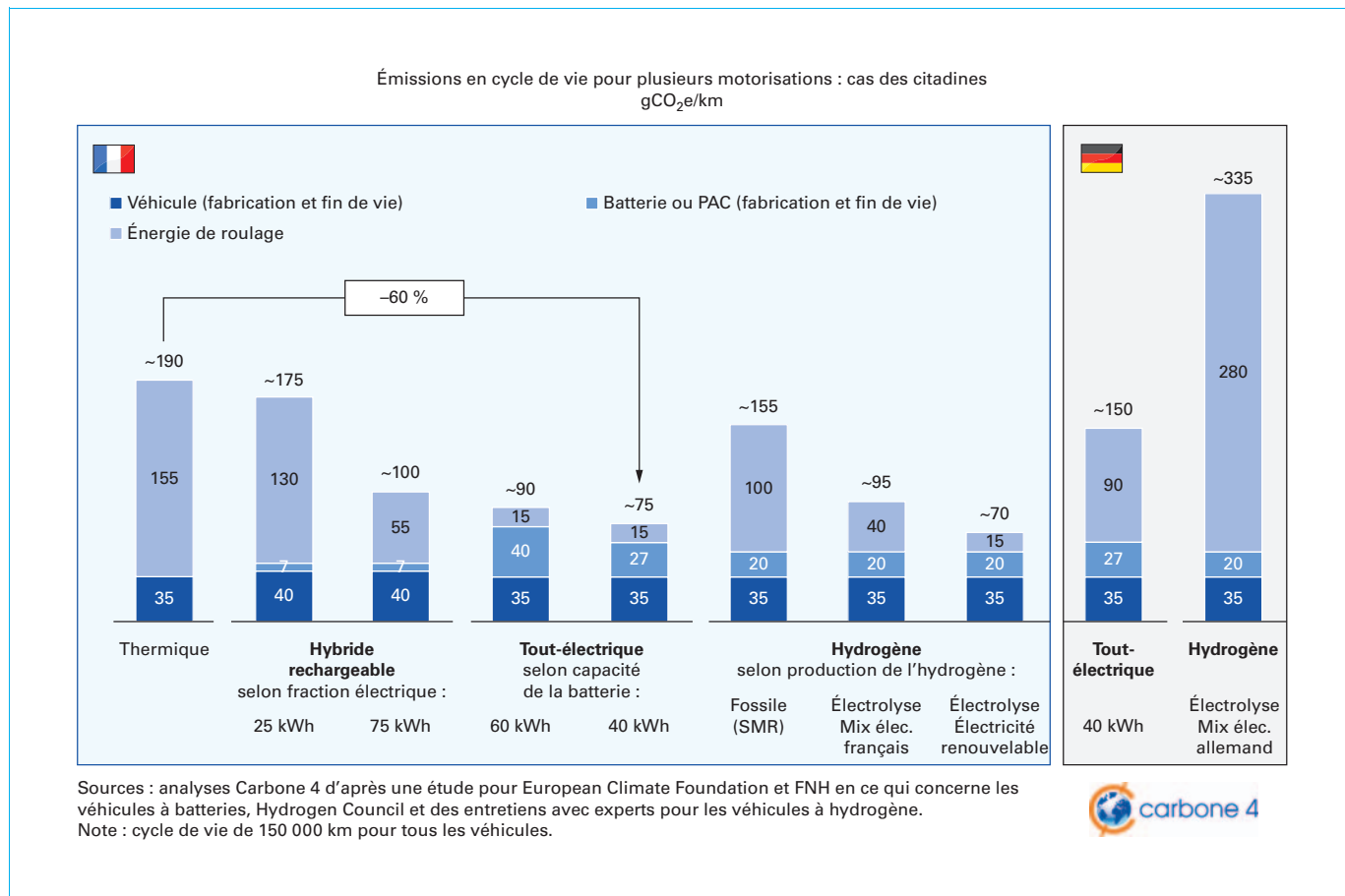


Figure 31 – Analyse de cycle de vie de véhicules légers par Carbone 4 (ACV)

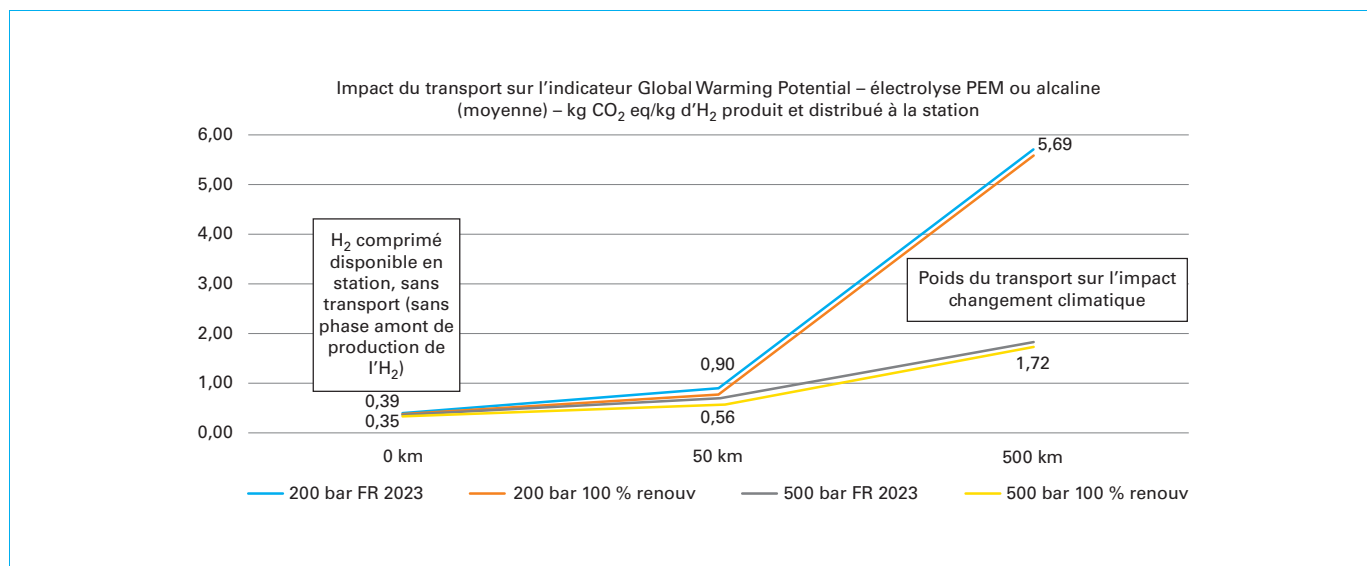


Figure 32 – Impact du transport de l'hydrogène sur les émissions de CO₂ (d'après [9])

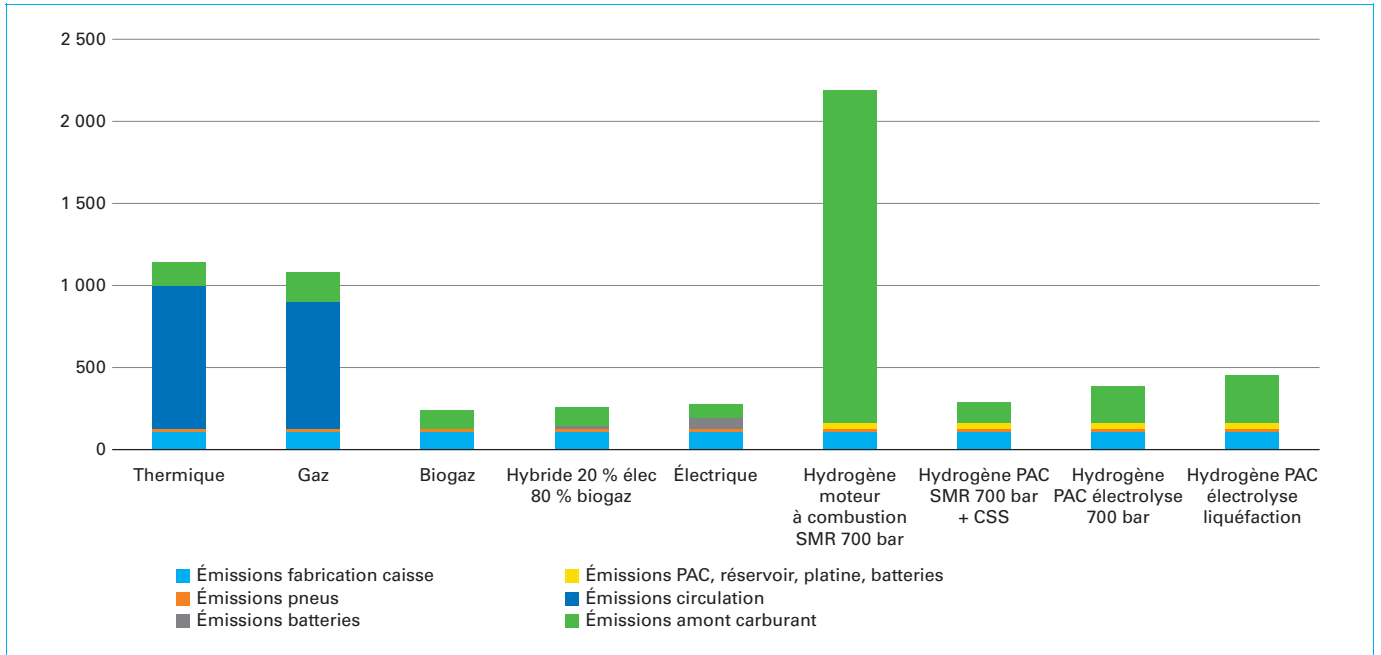


Figure 33 – Analyse de cycle de vie (ACV) poids lourds 40 tonnes (source étude France stratégie 2020)

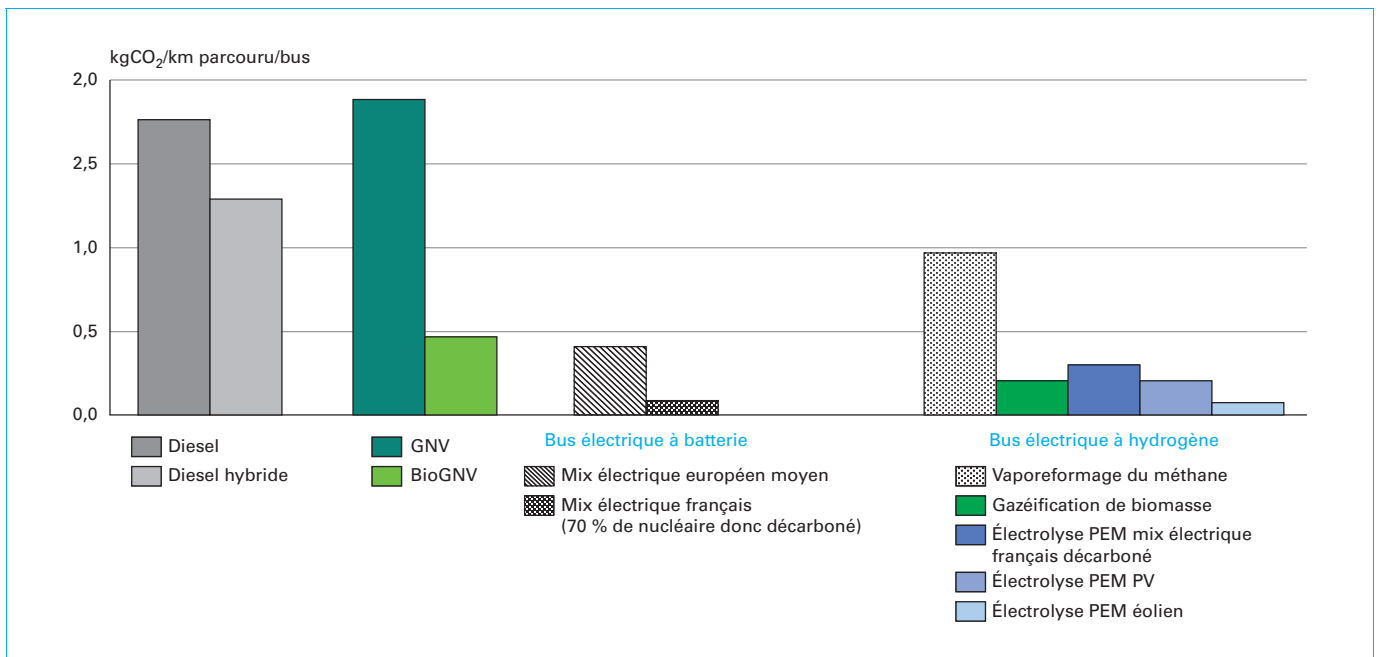


Figure 34 – Comparaison des émissions CO₂/km des bus (source étude France stratégie 2020)

6. Aspects économiques

Pour appréhender les aspects économiques, il faut s'intéresser aux trois dimensions de cette filière que sont les composants du système pile à combustible (PAC), les stations d'avitaillement, la production de l'hydrogène et le coût complet d'usage de ces véhicules.

6.1 Coûts du système pile à combustible

Le coût d'un système pile à combustible se décompose en différents sous-ensembles : la cellule qui est un assemblage membrane électrodes (AME) composé de la membrane et des plaques bipolaires recouvertes de son catalyseur ; les auxiliaires et le réservoir d'hydrogène avec ses systèmes de protection et de distribution associés. Ces coûts sont liés tout à la fois aux matériaux et aux

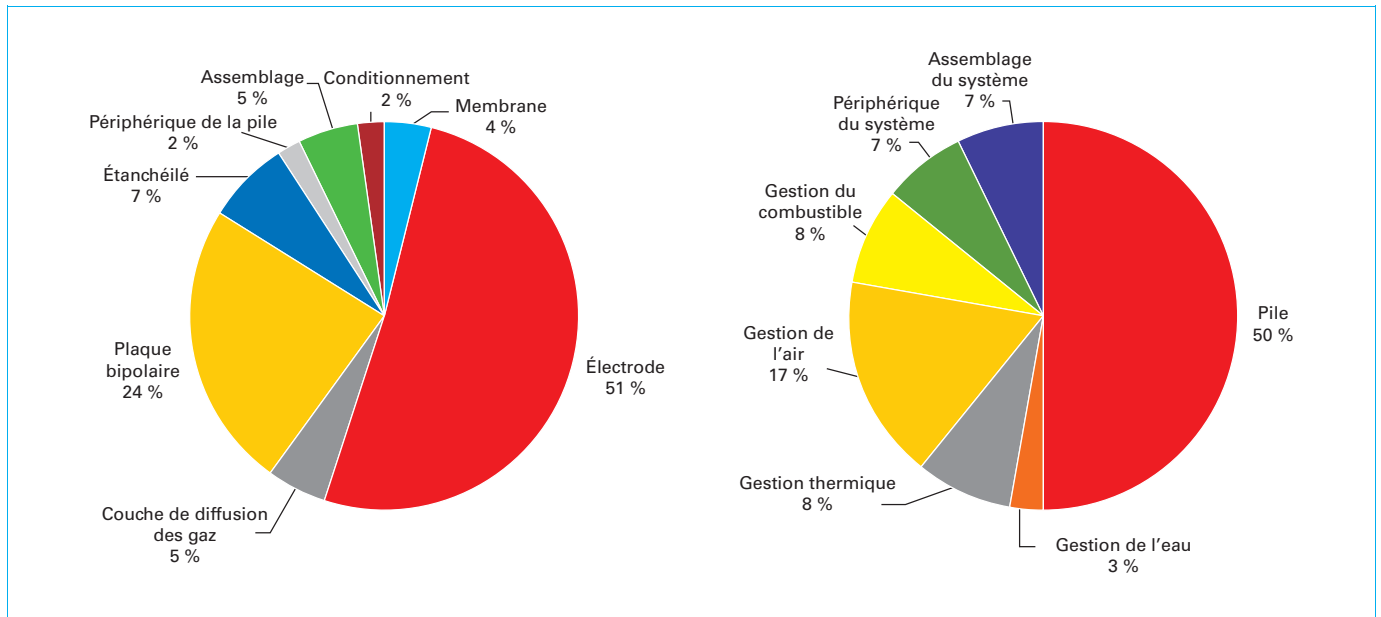


Figure 35 – Répartition des coûts d'une cellule de pile et du système pour 80 kW (d'après France Hydrogène)

processus de fabrication. La figure 35 montre la décomposition de ces coûts par rapport aux constituants d'une cellule et du système PAC complet.

Au niveau de la cellule, l'électrode représente 51 % du coût, ceci est principalement dû à la charge en platine du catalyseur. Le deuxième poste étant la plaque bipolaire qui doit répondre à des contraintes importantes de résistance à la corrosion et de circulation des fluides. Pour le système PAC complet le stack qui est l'empilement de toutes les cellules représente 50 % du coût, ensuite le management des fluides air et hydrogène.

Les systèmes PAC qui équipent actuellement les véhicules automobiles commercialisés contiennent de l'ordre de 0,12 g de Pt/kWe. Ce qui signifie qu'il faut 12 g de platine pour une pile de 100 kW. Comparativement, les pots d'échappement catalytiques des véhicules diesel de puissance équivalente ont une charge en platinoïdes (principalement du ruthénium, rhodium, palladium et platine) de l'ordre de 3 à 4 g, avec typiquement 2/3 de platine. Pour les véhicules à essence c'est 1 à 2 g de métaux précieux (principalement du palladium et du rhodium). La réduction de la charge en platine par unité de surface dans PAC a été très significativement réduite durant ces dernières années, pour développer une filière automobile à hydrogène. Il apparaît vital de réduire encore la charge en platine d'un facteur 10, voire de s'en passer. Les solutions potentielles consistent à garantir une meilleure répartition des nanograins de catalyseur ainsi que de privilégier des catalyseurs bi- ou trimétalliques. Dans toutes ces approches il faut envisager à la fois la durabilité de l'électrode et son recyclage en fin de vie. Une meilleure intégration du platine réduit son utilisation mais rend plus difficile et contraignant son recyclage. Cette démarche conduira donc fatalement à un compromis entre intégration et recyclage. La meilleure solution serait de concevoir des catalyseurs sans platine, voire sans platinoïdes. Les travaux de recherche actuels ne permettent pas d'envisager à court terme une telle solution pour la mobilité car les catalyseurs utilisés conduisent à des piles bien plus volumineuses à puissance identique et qui ont une durée de vie trop faible pour les applications automobiles.

Tenant compte de ces travaux sur la réduction de la charge en platine et à l'industrialisation de la construction des PAC, les coûts devraient atteindre de l'ordre de 30 \$/kW dans les années 2030 (figure 36).

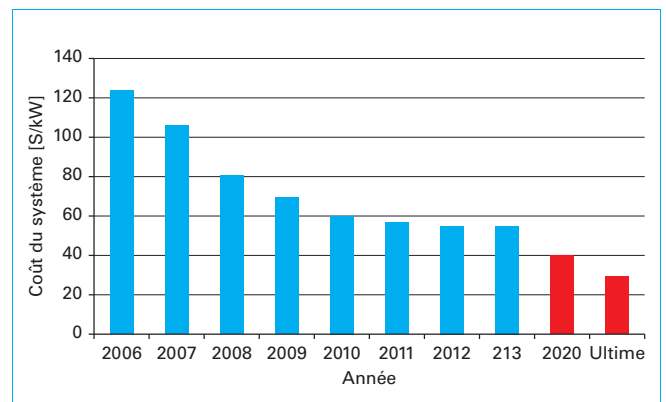


Figure 36 – Estimation et projection des coûts d'un système PAC de 100 kW par le DOE (Department Of Energy – États-Unis)

6.2 Coûts pour les véhicules légers

Pour essayer d'avoir une vision objective de ces coûts, les travaux d'International Council on Clean Transportation [13] sont les plus aboutis. Les données sur les coûts recueillis sont utilisées pour estimer le coût des technologies des batteries. Les coûts des batteries au lithium-ion (Li-Ion) automobiles et des piles à combustible ont diminué. Ils sont prévus pour la période 2020-25 dans une fourchette de 130 à 180 euros le kilowattheure pour le système batterie. Les coûts des systèmes pile à combustible vont également considérablement diminuer, l'objectif 2030 étant moins de 35 € du kilowatt (figure 36).

La figure 37 extraite de l'étude ICCT [13] compare les différentes motorisations pour une berline de classe moyenne et l'évolution des coûts de 2015 à 2030. Les PHEV (*Plug-in Hybrid Electric Vehicle*) verront une réduction d'environ 50 %, les BEV (*Battery Electric Vehicle*) 60 % et 70 % pour les VHFCE (*Vehicle Hydrogen Fuel Cell Electric*). Dans le même temps les motorisations thermiques verront leurs coûts augmenter de l'ordre de 2 000 € liés aux systèmes

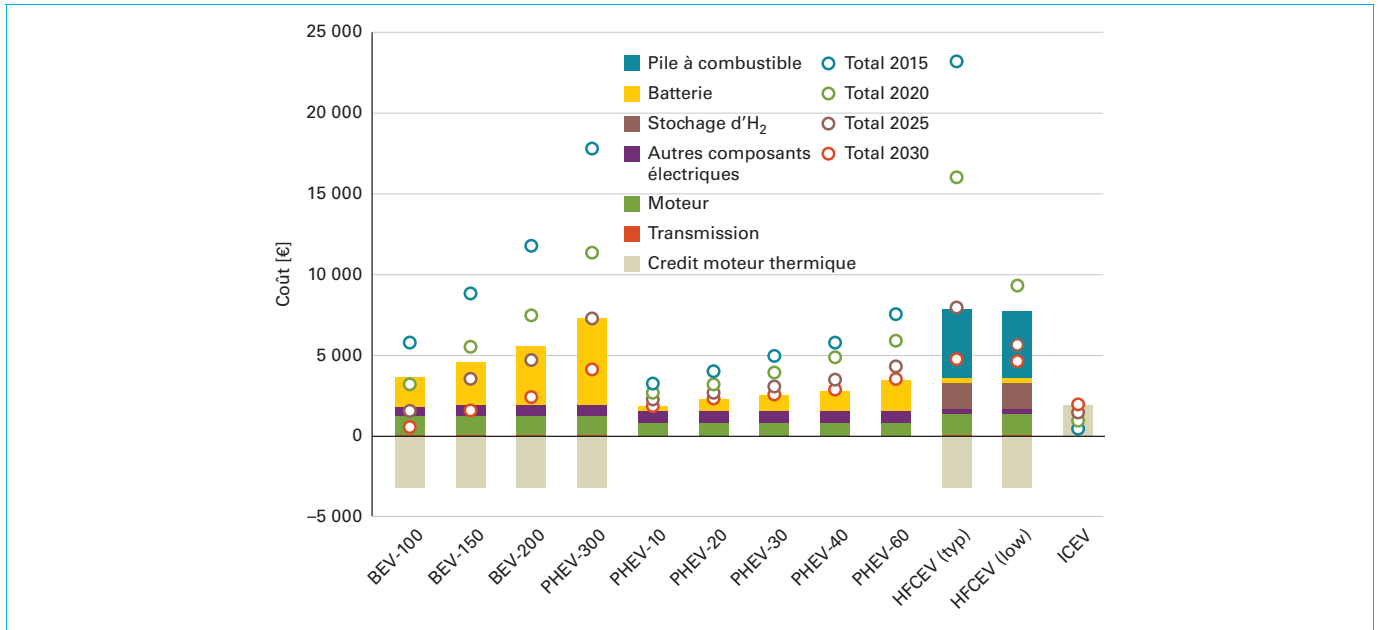


Figure 37 – Projection des coûts des technologies comparées au moteur essence (d’après [13])

de dépollution et à l’électrification (*mild hybrid*). Cette étude montre qu’un BEV avec 200 km d’autonomie et un PHEV avec 20 km réels sera en 2030 au même prix qu’un véhicule essence. Les hybrides PAC restant plus chers que les électriques avec une autonomie de 250 km et pratiquement au même prix que les BEV avec 400 km d’autonomie. Pour être exhaustif, il faudrait aussi comparer le coût total de possession intégrant l’énergie et les frais annexes.

Le VEB est présenté comme le concurrent des véhicules pile à hydrogène. Les deux sont vertueux vis-à-vis de la qualité de l’air, il faut pour les départager s’intéresser aux considérations économiques pour un usage équivalent (autonomie et temps de recharge).

Pour les véhicules hybrides pile à hydrogène, le coût du véhicule est directement lié aux coûts des composants spécifiques : la pile, le réservoir d’hydrogène et la batterie tampon. Pour le VEB il est lié à la batterie.

La figure 38 présente les coûts comparés des deux générateurs d’énergie embarqués pour différentes quantités d’énergie. Les hypothèses de calcul sont les objectifs de coût à 2030 du DOE pour une puissance du moteur électrique de 100 kW (coût de la batterie 100 \$/kWh, de la pile à hydrogène 30 \$/kW et du réservoir 100 \$/kgH₂) (figure 36).

Le périmètre considéré est l’ensemble générateur d’énergie embarqué soit :

- pour le générateur pile à hydrogène = pile 100 kW de puissance deux tailles de réservoirs (5 et 7 kgH₂ à 700 bar) + batterie 5 kWh ;
- pour le générateur à batterie = chargeur embarqué de 10 kW, batterie de 100 kW de puissance et Wh en fonction de l’autonomie.

Pour le BEV le dimensionnement en autonomie est proportionnel au Wh de la batterie et le coût suit cette évolution. Pour la pile à hydrogène, elle est dimensionnée par rapport à la puissance du moteur et ensuite c’est juste le remplissage et la taille maximum des réservoirs qui vont implémenter le coût à la marge. Il faut payer un ticket d’entrée lié à la puissance de la pile à combustible.

Le point de croisement des deux courbes (pour 7 kg H₂) est autour de 60 kWh, cela signifie que le prix des véhicules pile à hydrogène sera compétitif par rapport au BEV pour des autonomies supérieures à 300 km.

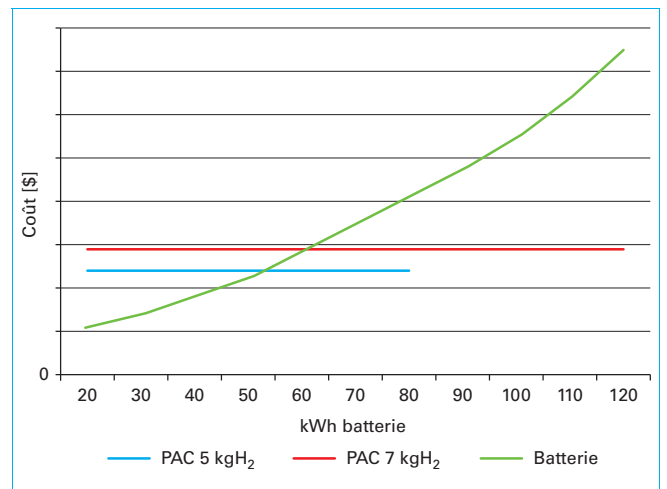


Figure 38 – Comparaison du coût du générateur embarqué en fonction de l’énergie embarquée pour générateur pile à hydrogène (PAC) et batterie (d’après AT&ME)

Cependant dans le calcul du TCO même si le coût du système pile à hydrogène est inférieur pour des capacités de batterie supérieures à 60 kWh, le coût au kilomètre sera 2 fois supérieur (voir figure 29).

6.3 Coûts pour les véhicules lourds

L’étude de la PFA (Plateforme de la filière automobile) et du Bipe (Bureau d’informations et de prévisions économiques) qui est reprise dans le livre blanc [15] montre une estimation des coûts à 2035 pour des chaînes de traction des poids lourds de puissance inférieure à 225 kW (figure 39). Malgré les gains de coûts planifiés des ensembles moteur/transmission/réservoir, les chaînes de traction PAC restent 2 à 3 fois plus chères que les motorisations diesel.

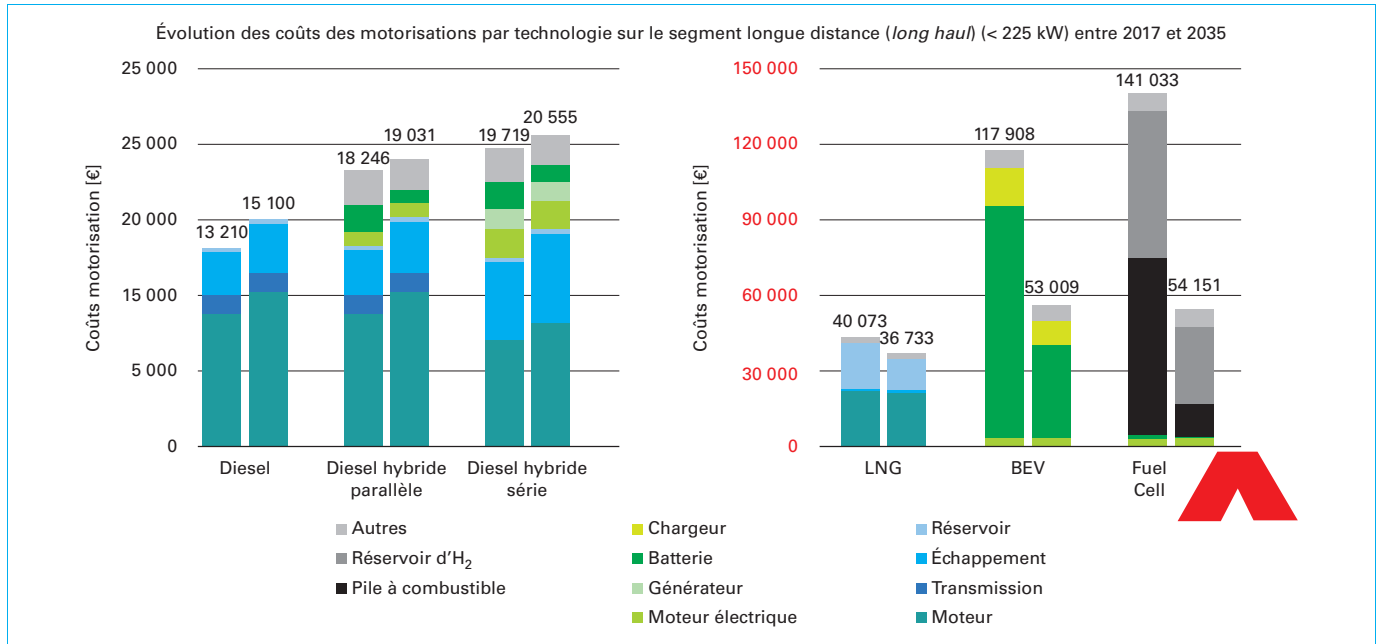


Figure 39 – Évolution des coûts des motorisations pour les poids lourd longue distance (d’après [15])

6.4 Coûts des stations d’avitaillement en hydrogène

Le coût de l’implantation d’une station hydrogène n’est pas encore à ce jour établi de manière précise et reste très élevé. À titre de comparaison, le coût moyen d’une station-service traditionnelle (*essence/gas-oil*) est de l’ordre 120 000 à 150 000 € alors que pour les stations hydrogène, le prix avancé de 600 000 € à 2 000 000 € dépendant de la quantité délivrée par jour, du dimensionnement du stockage et de la pression de remplissage (350 ou 700 bar).

Concernant des stations avec de l’hydrogène livré : pour les petites stations délivrant jusqu’à 50 kgH₂/jour, le coût d’investissement est de l’ordre de 600 000 €. Pour les plus grosses, délivrant plus de 100 kgH₂/jour, le coût de l’installation varie entre 1 et 2,5 millions d’euros, c’est-à-dire un coût moyen de l’ordre de 1,5 million d’euros. Pour celles équipées d’un électrolyseur on estime que l’investissement supplémentaire est entre 70 % et 90 % du coût de la station.

6.5 Coût complet d’usage des véhicules PAC

Pour reconstruire le coût complet d’usage nous devons connaître les coûts de l’hydrogène à la pompe et des véhicules.

6.5.1 Coût de l’hydrogène à la pompe

Le coût de l’hydrogène distribué issu des énergies éoliennes ou photovoltaïques, hydrogène dit « vert » qui est obtenu par électrolyse est directement lié au coût de l’électricité. On admet couramment à ce jour que ce coût ne peut guère être inférieur à 10 € le kg. Pour obtenir une bonne pénétration commerciale des véhicules PAC, dans ses préconisations pour développer le marché des transports hydrogène, la filière automobile française (PFA) considère que le prix de l’hydrogène distribué au client doit être de 7,3 €/kg (TVA comprise, hors marges). Outre les taxes, la construction de ce coût est influencée par le mode de production, mais également par le stockage, l’acheminement et la distribution finale.

Le prix à la pompe de l’hydrogène dit « gris » provenant du reformage d’hydrocarbures est moins chère (moins de 4 €/kg) que l’hydrogène vert, mais, produit avec beaucoup de dioxyde de carbone, il élimine l’intérêt principal du recours à l’hydrogène : diminuer les émissions de gaz à effet de serre.

Aujourd’hui à l’usage, il faut compter environ 60 euros pour un plein de 5 kg d’hydrogène vert permettant de faire 600 km c’est donc assez similaire à un véhicule essence.

6.5.2 Coût pour l’automobile

Avant de rentrer dans les coûts il paraît nécessaire d’avoir une vision sur la pénétration des véhicules légers PAC. Les prévisions de la PFA annoncent pour 2035, 2 à 3 % de véhicules PAC dans les ventes annuelles en Europe (figure 40).

La dernière étude publiée par Bloomberg NEF [11] sur la compétitivité de l’hydrogène renouvelable (éolien, solaire, hydroélectricité) montre que le coût de l’hydrogène devrait diminuer d’une façon significative après 2030 grâce notamment à une baisse (- 30 %) du prix de l’électricité solaire. Mais son rôle dans les transports restera axé sur les camions et les navires. L’hydrogène pouvant jouer un rôle précieux dans la décarbonisation des camions long-courrier à charge lourde et serait compétitif par rapport aux moteurs diesel d’ici 2031. Mais pour les véhicules légers et les camions de livraison du dernier kilomètre la solution batterie restera moins chère (figure 41).

C’est donc sur les marchés qui bénéficieront d’incitation importante que se développeront les véhicules légers PAC.

6.5.3 Coût pour les bus

L’analyse de coût total de possession présentée dans le document de l’AFHPAC (Association française pour l’hydrogène et les piles à combustible) [8] compare les bus électriques à hydrogène à d’autres types de motorisation (diesel, diesel hybride, gaz naturel et électrique). Cette analyse prend en compte les coûts d’acquisition des véhicules (dans lesquels sont inclus les coûts éventuels de remplacement de composants à mi-vie des véhicules), les coûts pour le dépôt, le coût d’installation de l’infrastructure de

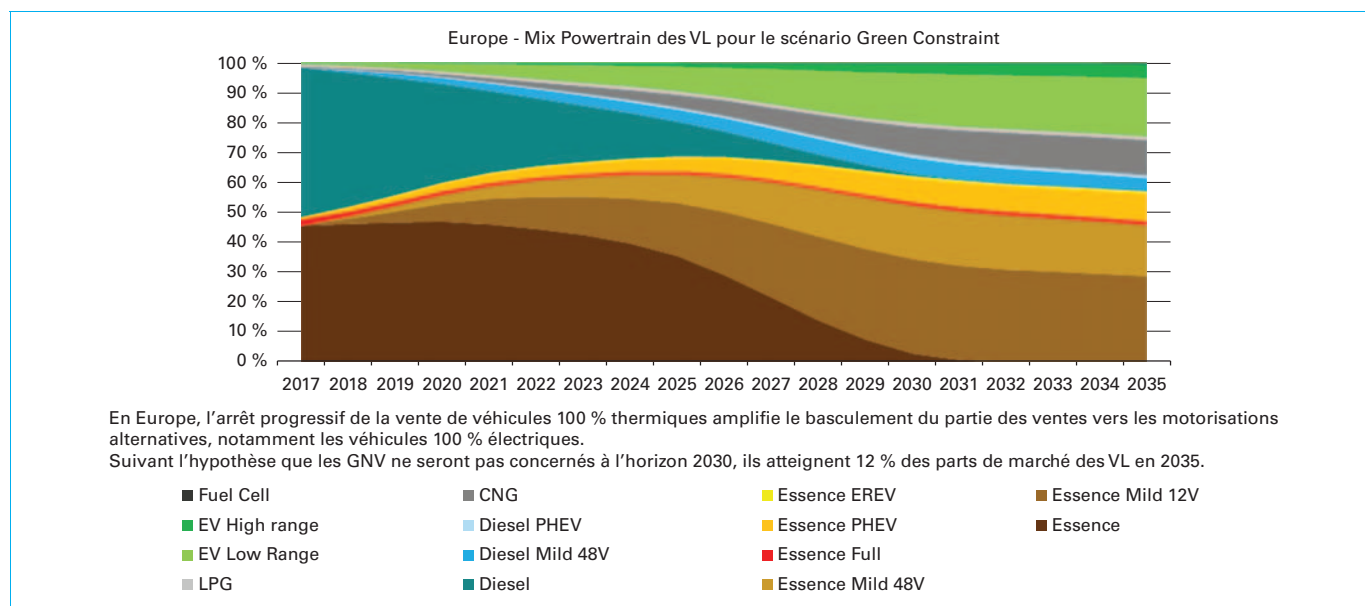


Figure 40 – Estimation des ventes de véhicules légers en Europe (d'après simulation mix motorisation BIPE/PFA)

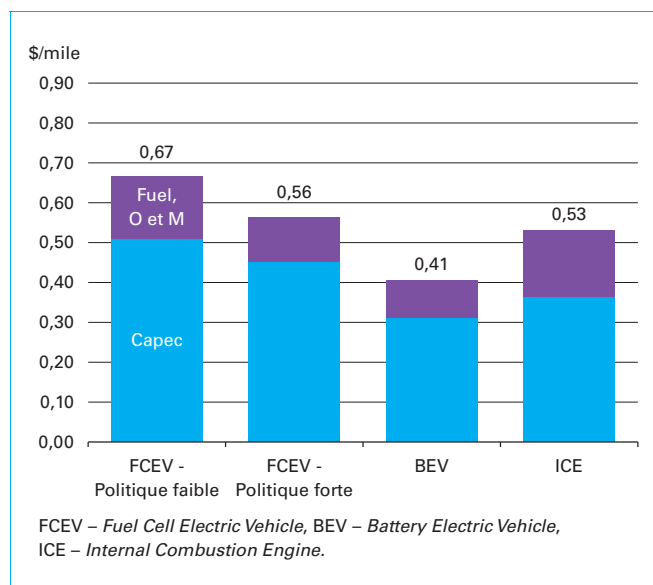


Figure 41 – Coût total de possession pour un SUV utilisé aux États-Unis en 2030 (Source Bloomberg NEF)

recharge pour les véhicules électriques à batterie, pour les autres, les coûts pour l'infrastructure sont inclus dans les coûts de carburant « à la pompe », et les coûts opérationnels décomposés en coûts de maintenance et coûts de carburant. L'analyse est faite pour un cas moyen pour des bus standards (de dimension 12 m), et en se plaçant volontairement dans une hypothèse de longues distances parcourues par les véhicules (60 000 km par an et par bus, avec des services journaliers allant jusqu'à 250 km/jour), c'est-à-dire dans un cas où des longues autonomies sont requises pour les véhicules, cas particulièrement pertinent pour l'hydrogène en comparaison avec les électriques à batterie. En effet, pour effectuer le même service avec des bus électriques à batterie il faut surdimensionner la flotte de véhicules.

On constate sur la figure 42 que pour arriver à un coût équivalent au bus diesel ou BioGNV il faut arriver à des volumes de flotte de bus PAC de plusieurs centaines par an et un prix à la pompe de l'hydrogène vert de 5 € du kg. Sur cet exemple les bus à batterie sont pénalisés par la nécessité de surdimensionner la flotte pour garantir le service longue distance.

Le challenge est donc important pour les bus PAC pour atteindre l'équilibre économique, surtout pour les lignes à moins de 200 km/jour où c'est la batterie qui prend l'avantage sur toutes les autres solutions. Le choix du bus PAC doit pour être économiquement rentable, sans subvention, rentrer dans une approche globale de territoire hydrogène prenant en compte la production et l'intégration au réseau électrique pour atteindre les prix de 5 € du kilogramme d'hydrogène vert.

À retenir
– Système pile à combustible : il faut encore réduire la charge en platine d'un facteur 10.
– Station de distribution d'hydrogène : coût de l'ordre de 600 000 € pour les petites stations à 1 et 2,5 millions d'euros pour celles qui permettront d'avitailer plus de 100 véhicules/jour.
– Le prix de l'hydrogène vert distribué au client doit être de 7,3 €/kg pour développer la filière (PFA).

7. Engagement des états

7.1 Europe

Les actions européennes pour l'hydrogène sont gérées dans le Fuel Cell and Hydrogen – Joint Undertaking (FCH JU) un programme de recherche et développement et démonstration. Il s'est terminé en 2014 et a été reconduit jusqu'à 2020. Ce programme, qui couvre la période 2014-2020, a été baptisé FCH 2 JU. Il s'est concrétisé par le déploiement de la solution hydrogène énergie à travers l'Europe grâce à un investissement total de 1,33 milliard d'euros. Étaient concernées : l'amélioration des performances des équipements et la diminution de leur coût, ainsi que la mise en

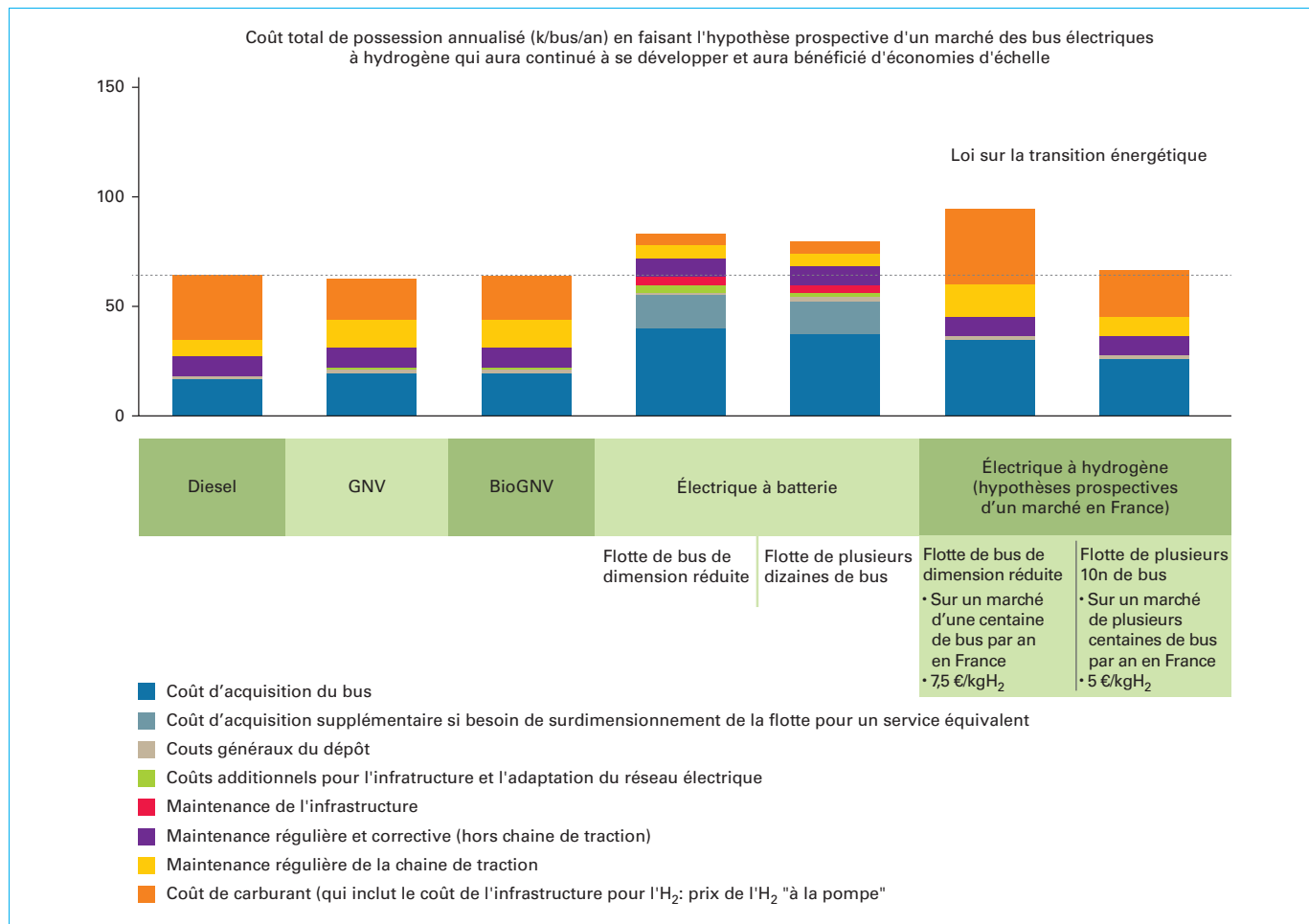


Figure 42 – Coût de possession annuel de bus sur une ligne 250 km/jour (d'après [8])

condition de la technologie hydrogène pour entrer à la fois sur le marché des transports (automobiles, autobus, stations d'avitaillement) et sur celui de l'énergie (production, stockage, distribution, équipements stationnaires).

En 2020 la Commission européenne a lancé sa stratégie hydrogène qui s'articule autour de trois grands secteurs : transports, énergie et activités transverses (sûreté, sécurité, normes, réglementation...).

Cette stratégie européenne sur l'hydrogène fixe une feuille de route d'ici à 2050 pour garantir le passage à l'échelle de la production d'hydrogène renouvelable et bas carbone et assurer le déploiement d'infrastructures de transport, de stockage et de distribution. L'hydrogène est positionné comme un vecteur essentiel pour la décarbonation de secteurs clés, où l'électrification ne pourra jouer un rôle suffisant, tels que les raffineries, la chimie, la sidérurgie, les transports lourds (bus, camions, trains, navires, avions), ainsi que l'électricité et la chaleur.

Afin de contribuer à la réalisation de cette stratégie, la Commission européenne a lancé en parallèle l'Alliance européenne pour un hydrogène propre avec des acteurs de premier plan du secteur, la société civile, des ministres nationaux et régionaux et la Banque européenne d'investissement. Cette alliance doit permettre d'identifier une réserve de projets d'investissement destinée à accroître la production et soutenir la demande d'hydrogène propre dans l'Union européenne (UE).

7.2 France

Le soutien apporté par l'État à la filière a débuté réellement en 2018 avec le financement de démonstrateurs et la prise de participation dans des entreprises à fort potentiel via le PIA (le Programme d'investissements d'avenir) qui a mobilisé plus de 100 millions d'euros. La recherche a été soutenue en mobilisant 110 millions d'euros sur les dix dernières années et l'Ademe a soutenu le déploiement de la mobilité hydrogène en apportant 80 millions d'euros.

2020 constitue une année décisive pour la filière hydrogène en France avec la mise en place d'une stratégie de 7 milliards d'euros sur 10 ans dont 3,4 milliards d'euros sur la période 2020/2023. Les trois priorités de ce plan sont :

- 1) Décarboner l'hydrogène en faisant émerger une filière française de l'électrolyse avec un objectif de 6,5 GW d'électrolyseurs installés en 2030 ;
- 2) Développer une mobilité lourde PAC utilisant l'hydrogène décarboné en déployant des projets territoriaux d'envergure en incitant à mutualiser les usages. L'objectif est d'économiser plus de 6 Mt de CO₂ en 2030. C'est l'équivalent des émissions annuelles de CO₂ de la Ville de Paris ;
- 3) Soutenir la recherche, l'innovation et le développement de compétences afin de favoriser les usages de demain. L'objectif est

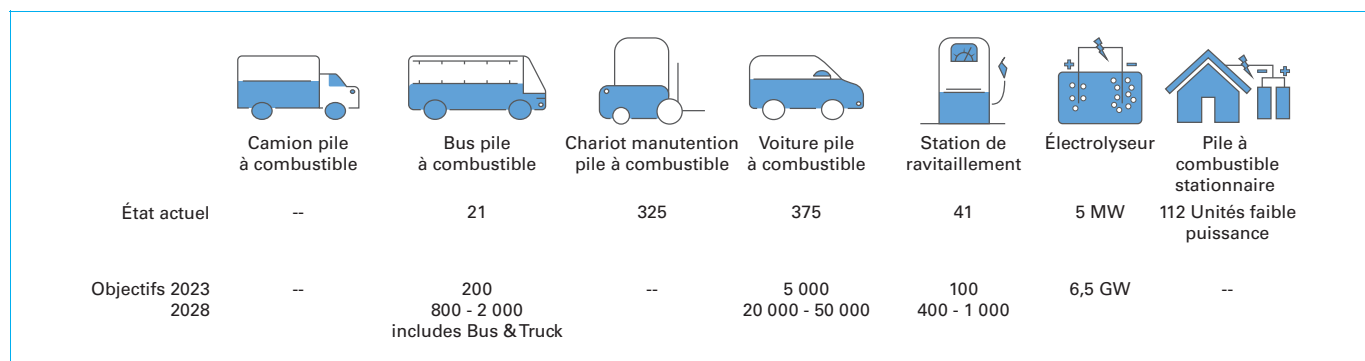


Figure 43 – Évolutions des marchés prévus en France (source The International Partnership for Hydrogen and Fuel Cells in the Economy IPHE)

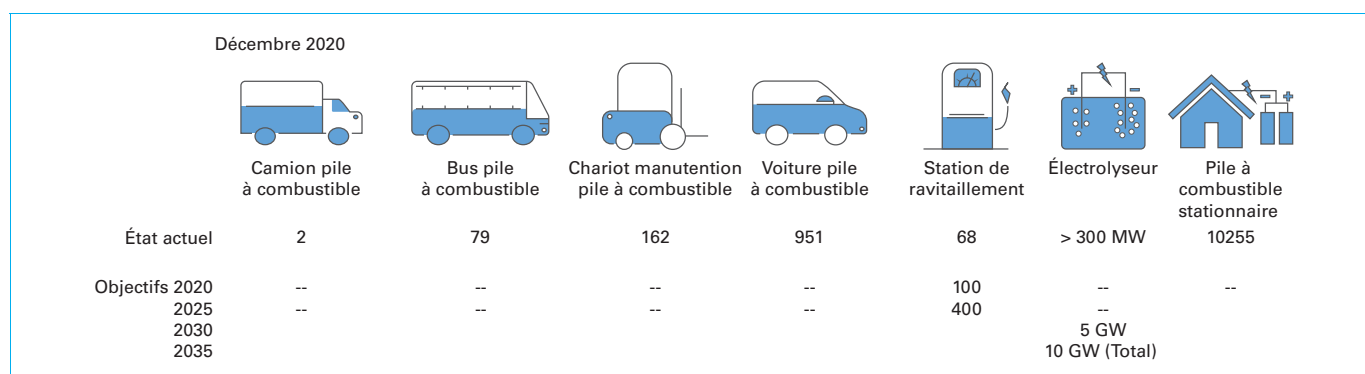


Figure 44 – Évolutions des marchés prévus en Allemagne (source The International Partnership for Hydrogen and Fuel Cells in the Economy – IPHE)

de générer entre 50 000 et 150 000 emplois directs et indirects en France.

L'hydrogène est maintenant considéré comme une des solutions pour la transition énergétique et la création de valeur et se positionne comme un élément central du dispositif de relance souhaité par l'ensemble des pays membres de l'Union européenne et notamment la France (figure 43).

7.3 Allemagne

Plusieurs facteurs conditionnent le développement de la recherche et des applications hydrogène et piles à combustible (PAC) en Allemagne. Dans le domaine de la production d'électricité, on citera notamment l'abandon progressif de l'énergie nucléaire décidé par le gouvernement en 2011 qui proclama l'arrêt définitif de la totalité des centrales nucléaires au plus tard en 2022.

Mais depuis la situation n'évolue pas dans le sens prévu : l'augmentation de la production électrique intermittente (éolienne et photovoltaïque) à la place du nucléaire n'a fait que conforter le rôle du charbon et du gaz, seules énergies capables de compenser les aléas du vent et du soleil faute de moyen de stockage viable ! Quant aux gains d'efficacité énergétique, ils se sont avérés eux aussi largement surestimés par rapports aux comportements réels de la population et de l'industrie.

Néanmoins, cette décision de 2011 a été confortée par celle d'investir fortement dans les énergies renouvelables, solaire et éolienne, tout en prenant en compte l'importance que les Allemands portent à l'automobile, un secteur qui emploie près de 800 000 personnes. Le défi était et reste de continuer à alimenter les 45 millions de réservoirs d'automobiles tout en diminuant la part des fossiles dans le carburant. L'hydrogène a été retenu comme une des alternatives. Des analyses économiques, menées

par le ministère de l'Industrie, indiquent que si l'Allemagne (figure 44) se positionne pour produire et exporter des voitures à hydrogène, son industrie se maintiendra, mais que si elle rate cette opportunité, son industrie automobile sera à terme menacée.

7.4 Japon

Au Japon, les premières discussions portant sur l'utilisation de l'hydrogène comme vecteur d'énergie datent de 1973 avec la création de l'HESS (Hydrogen Energy Systems Society).

Les applications « Transports » étaient les premières visées, dès le début des années 1980. À la fin des années 1990, tous les constructeurs japonais avaient présenté des prototypes de véhicules légers à pile à combustible alimentés en hydrogène (technologie PEMFC) : Toyota, Mazda, Honda, Nissan, Mitsubishi, Daihatsu et Suzuki. Au fil des années, plusieurs ont abandonné et seuls les trois grands (Toyota, Honda et Nissan) poursuivent ces développements. À noter que Mazda s'était tourné un moment vers le véhicule léger à hydrogène, non pas à pile à combustible mais en version à moteur thermique rotatif. À noter aussi que Mitsubishi a décidé fin 2014 de se positionner sur le domaine des véhicules électriques équipés de propulseurs d'autonomie à pile à combustible.

Le développement actuel a dépassé le stade du prototype pour amorcer la petite série : Toyota a lancé la commercialisation de la Mirai fin 2015 et Honda a lancé la commercialisation de la FCX Clarity en mars 2016. Plusieurs de ces véhicules sont déjà en service hors des frontières du Japon, en particulier aux États-Unis et en Europe ; ils ont des performances tout à fait comparables aux véhicules traditionnels, en particulier au niveau de l'autonomie : de 600 à 1 100 km selon les modèles avec de l'hydrogène embarqué stocké sous 700 bar. Les prix de vente affichés par Honda et Toyota au Japon sont très voisins, autour de 52 000 €, compte tenu des

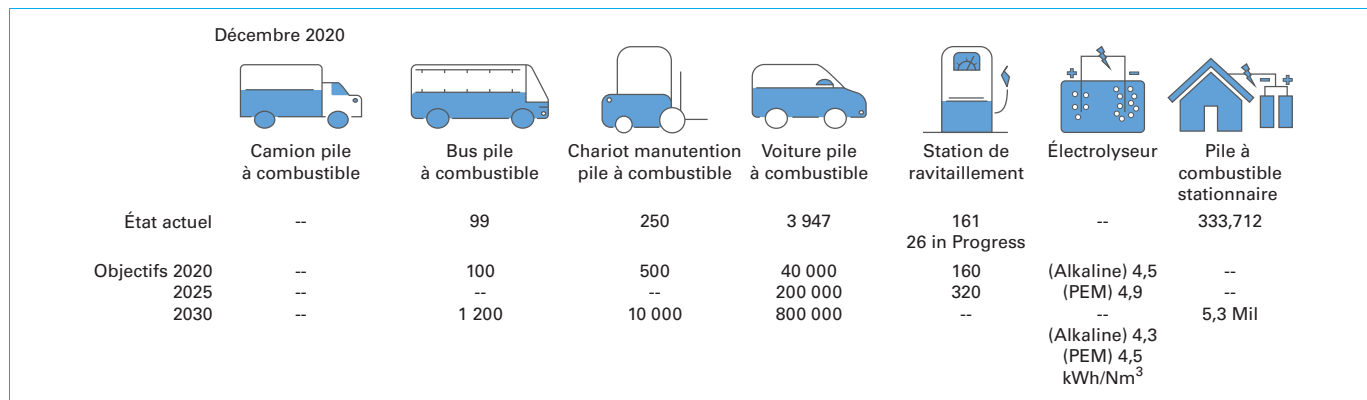


Figure 45 – Évolution des marchés prévus au Japon (source The International Partnership for Hydrogen and Fuel Cells in the Economy – IPHE)

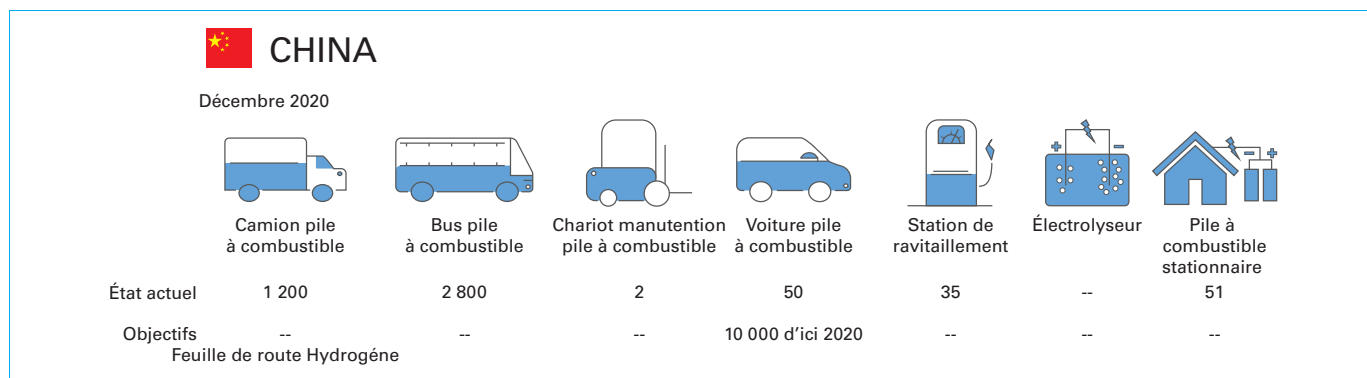


Figure 46 – Évolution des marchés prévus en Chine (source The International Partnership for Hydrogen and Fuel Cells in the Economy – IPHE)

subventions offertes aux clients par le METI (de 2 à 3 millions de yens par véhicule depuis la fin 2014). De plus, des exemptions de taxes sont offertes dans certaines préfectures. L'évolution des marchés prévus par le NEDO (New Energy and Industrial Technology Development Organization) est illustrée sur la figure 45.

Les autorités japonaises avaient décidé d'utiliser les Jeux olympiques de Tokyo en 2020 pour assurer la promotion des véhicules à piles à combustible en y interdisant la présence de véhicules thermiques autour des installations olympiques.

Les objectifs planifiés en 2016 par le METI (ministère japonais de l'économie, du commerce et de l'industrie) n'ont pas été atteints pour 2020 : 4 000 véhicules légers sont en circulation pour un objectif qui était de 40 000. Le nombre de stations est lui au rendez-vous avec 161 pour un objectif de 160 ce qui augure une croissance rapide du marché (figure 45).

7.5 Chine

C'est depuis le début des années 1990 que la Chine a commencé à s'intéresser à la R&D dans le domaine de la technologie PEMFC, finalement retenue pour les transports. Jusque vers 2010, les développements ont été financés via le MOST (Ministry of Science and Technology) dans le cadre du programme baptisé 863 – R&D Deployment of Energy Saving & New Energy Vehicle dans les plans quinquennaux successifs.

L'un de ces programmes concerne l'hydrogène et les piles à combustible. Plus précisément, le State Council a publié, en 2014, The Energy Development Strategy Action Plan (2014-2020) dans lequel sont identifiées 20 actions clés : l'une d'elles concerne l'hydrogène

et les piles à combustible. Le plan véhicules à pile à combustible en Chine est détaillé sur la figure 46.

7.6 États-Unis

L'ère Trump a ralenti les actions fédérales et ce sont les États comme la Californie qui ont poursuivi le développement de véhicules zéro émission. Ainsi en 2012, le California Fuel Cell Partnership, le Plug-in electric Vehicle Collaborative et les agences California Air Resources Board, California Energy Commission et la Public Utilities Commission se sont accordés sur les objectifs suivants :

- précommercialisation de véhicules *plug-in* et hydrogène en 2015 dans des zones clés identifiées avec installation d'infrastructures d'avitaillement ;
- commercialisation en 2020 avec mise en place d'une infrastructure capable d'alimenter un million de véhicules zéro émission ;
- 1,5 million de véhicules zéro émission circuleront en 2025.

Du côté des financements :

- en 2018, le gouverneur de Californie a annoncé un plan de 2 500 millions de dollars pour améliorer les véhicules zéro émission comme leurs stations-services et atteindre le chiffre de 5 millions de véhicules en circulation en 2030 ;
- en 2019 le DOE a annoncé le déblocage d'un budget de 50 millions de dollars, pour des actions de recherche innovantes dans les domaines des véhicules non routiers et des combustibles qui les alimentent et 40 millions de dollars pour financer 29 projets dans le cadre du programme H2@Scale (figure 47) ;
- en 2020, de l'ordre de 10 000 véhicules à pile à combustible (Toyota, Hyundai et Honda) circulaient aux États-Unis. La figure 48 montre la situation en juillet 2020 et les objectifs de la Californie.

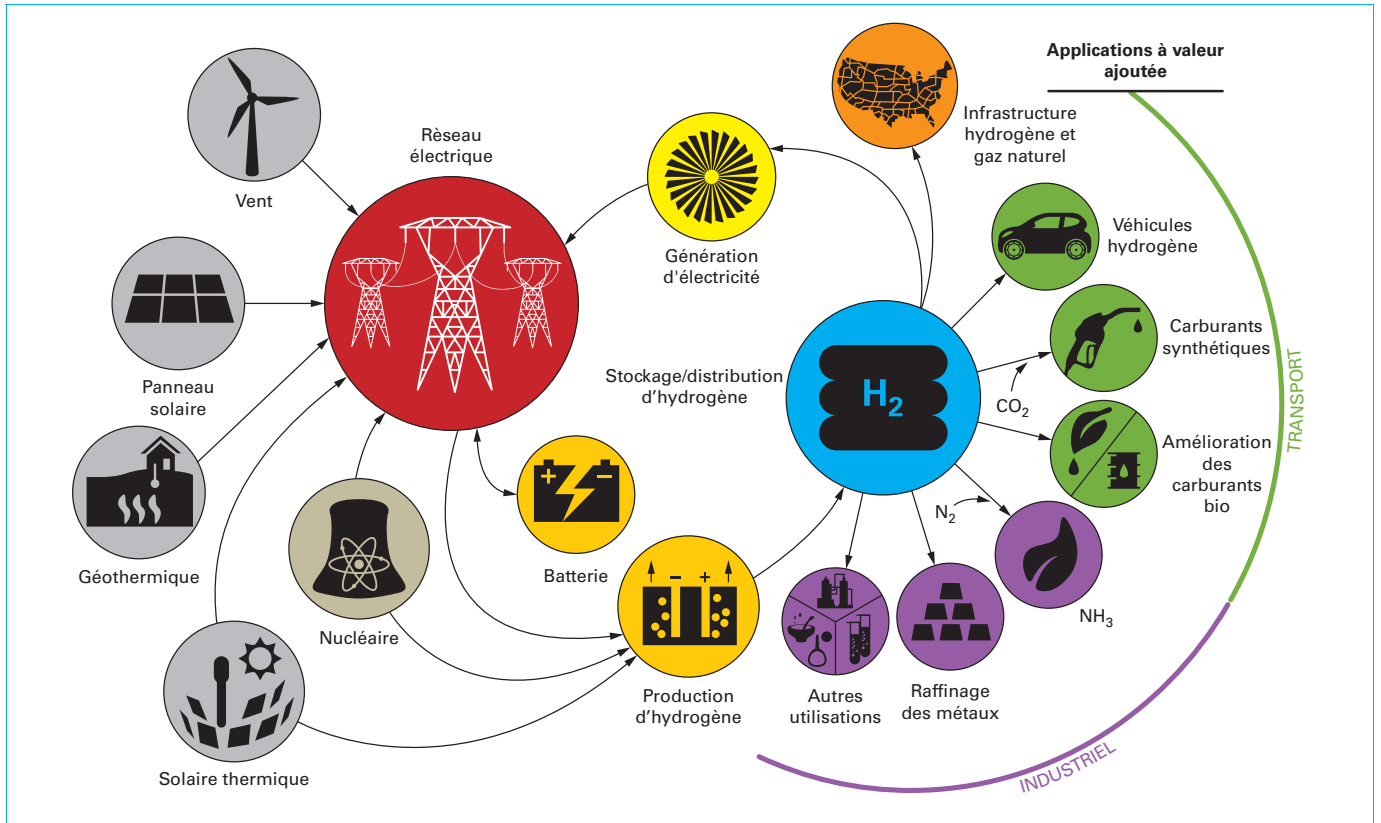


Figure 47 - Vision schématique du programme H2@scale

	Juillet 2020						
État actuel	Prototypes	> 60	> 35 000	~9 000	> 45	14 MW	> 500 MW
Objectifs 2030	\$80/kW	--	--	1 000 000 (CA Goal)	1 000 (CA Goal)	--	--

Figure 48 - Évolution des marchés prévus aux États-Unis (source The International Partnership for Hydrogen and Fuel Cells in the Economy - IPHE)

À retenir

- L'Europe poursuit son plan de support à la filière hydrogène.
- France : de l'ordre de 400 véhicules PAC pour 48 stations mais un plan ambitieux de 7 milliards d'euros pour les véhicules lourds.
- Allemagne : 1 000 véhicules en circulation pour 68 stations un plan de 9 milliards d'euros.
- Chine : elle est en retard sur les véhicules légers, mais a 4 000 poids lourds et bus hydrogène en circulation.
- États-Unis : de nombreux partenariats public privé avec comme objectif 1,5 million de véhicules zéro émission en 2025 dont une partie en hydrogène.
- Japon : 160 stations hydrogène sont opérationnelles et 4 000 véhicules en circulation.

8. Conclusion

Nul doute que les véhicules électriques pile à combustible circuleront demain sur nos routes. Après avoir été considérés comme un sujet « prometteur » pendant de très longues années, les piles à combustible et les véhicules à pile à combustible font à présent l'objet de programmes de développement intense et de commercialisation en Europe, aux États-Unis, au Japon, en Corée et en Chine. Certes, de nombreux verrous techniques, économiques et stratégiques (concernant le combustible) doivent encore être levés au cours des années à venir.

Du point de vue économique, les principaux verrous à lever se situent au niveau du coût des composants avec des objectifs à 30 \$/kW pour un système de pile à combustible complet. À l'heure

actuelle un ordre de grandeur (au moins) doit encore être gagné. Un travail important doit être réalisé sur la production décarbonée et le stockage de l'hydrogène pour permettre une pénétration significative de la mobilité hydrogène. La diminution du prix de l'hydrogène vert nécessite des investissements massifs dans les électrolyseurs et les stations d'avitaillement qui devront être en partie supportés par les États. En plus de la mobilité terrestre évoquée, l'usage de l'hydrogène peut s'étendre au stockage pour le réseau électrique, au transport maritime et fluvial, et, à plus long terme, au transport aérien.

9. Sigles, notations et symboles

Sigles	
ACV	Analyse de cycle de vie
AFC	<i>Alkaline Fuel cell</i> / Pile à combustible alcaline
APU	<i>Auxiliary Power Unit</i>
AVERE	Association des véhicules routiers électriques
BIPE	Bureau d'informations et de prévisions économiques
Carbone 4	Cabinet de conseil spécialisé dans la stratégie carbone

Sigles	
DOE	Department Of Energy – États-Unis
KOH	Hydroxyde de potassium
PAC	Pile à combustible
EnR	Énergies renouvelables
E4tech	International consultancy on implement sustainable energy technologies, policies and solutions
PPE	Programmation pluriannuelle de l'énergie
PFA	Plateforme de la filière automobile
FCV	<i>Fuel Cell Vehicle</i> véhicule pile à combustible (H ₂)
FFC	Fédération française de la carrosserie
HFCV	<i>Hybrid Fuel Cell Vehicle</i> / véhicule hybride pile à combustible (sans batterie)
HFCEV	<i>Hybrid Fuel Cell Electric Vehicle</i> / véhicule hybride électrique pile à combustible (avec batterie)
ICEV	<i>Internal Combustion Engine Vehicle</i> / véhicule avec moteur à combustion interne
TCO	<i>Total Cost of Ownership</i>
UGAP	Union de groupement d'achat public
URF	Union routière française

Piles à combustible appliquées à la mobilité électrique

La mobilité hydrogène

par **Joseph BERETTA**

Président d'honneur Avere-France

Président Automobile Technology & Mobility Expertise (AT&ME)

Sources bibliographiques

- [1] GRIMES (P.G.). – *Historic pathways for fuel cells – The new electric century*. IEEE AES Systems Magazine, p. 7-10 (2000).
- [2] MOND (L.) et LANGER (C.). – *A new form of gas battery*. Phil. Mag., vol. 46, p. 296-304 (1889).
- [3] BACON (F.T.). – *Fuel cells, past, present and future*. Electrochimica Acta, vol. 14, p. 569-585 (1969).
- [4] MOSDALE (R.) et ESCRIBANO (S.). – *Clefs CEA n° 44*, p. 51 (hiver 2000-2001).
- [5] MOSDALE (R.) et SRINIVASAN (S.). – *Analysis of performance and of water and thermal management in proton exchange membrane fuel cells*. Electrochimica Acta, vol. 40, n° 4, p. 413-421 (1995).
- [6] MOSDALE (R.) et SRINIVASAN (S.). – *Modeling analysis of mass transport limitations in a proton exchange membrane fuel cell – ECS Meeting, Miami Beach*. Floride, Fall 1994, Extrudée Abstract 609, p. 952 (1994).
- [7] ALLEAU (T.) et SERRE COMBE (P.). – *Colloque JEPAC'99 « Piles à combustible »*. Paris (1999).
- [8] AFHYPAC. – *Comment déployer des bus électriques à hydrogène en France* (2020).
- [9] ADEME. – *ACV relative à l'Hydrogène : production et usage mobilité légère*.
- [10] BLOOMBERG NEF. – *Hydrogen Economy Outlook Key messages* (2020).
- [11] CARBONE 4. – *Étude Carbone 4 sur le véhicule électrique*. <http://www.carbone4.com/vehicule-electrique/>
- [12] T&E. – *How to decarbonise long-haul trucking in Germany*. <https://www.transportenvironment.org/publications/how-decarbonise-long-haul-trucking-germany>
- [13] ICCT (INTERNATIONAL COUNCIL ON CLEAN TRANSPORTATION). – *Electric vehicles : Literature review of technology costs and carbon emissions*. Technical Report : <https://www.researchgate.net/publication/305492926> (2016).
- [14] ADEME. – *Un mix électrique 100 % renouvelable ? Analyses et optimisations*.
- [15] PFA. – *L'électricité pour la filière des véhicules industriels*. FFC, PFA, URF, AVERE (2019).
- [16] E4TECH. – *The Fuel Cell Industry Review* (2020).
- [17] ADEME. – *Rendement de la chaîne hydrogène. Cas du power to H₂ to Power*. Fiche technique (2020).

À lire également dans nos bases

ANTONI (L.), POIROT-CROUVEZIER (J.-P.), ROY (F.) et GLIPA (X.). – *GENEPAC : pile à combustible à membrane échangeuse de protons PEMFC*. [IN 52] Transports (2013).

DARKRIM-LAMARI (F.) et MALBRUNOT (P.). – *Combustible hydrogène – Utilisation*. [BE 8 566] Procédés chimie-bio-agro (2013).

MOSDALE (R.). – *Transport électrique routier. Batteries pour véhicules électriques*.

[D 5 565] Réseaux électriques et applications (2003).

STEVENS (P.), NOVEL-CATTIN (F.), HAMMOU (A.), LAMY (C.) et CASSIR (M.). – *Piles à combustible*. [D 3 340] Énergies (2000).

Normes et standards

ISO/TS 14687-2	2012	Carburant hydrogène – Spécification de produit – Partie 2 : Applications des piles à combustible à membrane d'échange de protons (MEP) pour les véhicules routiers.	ISO 16111	2008	Appareils de stockage de gaz transportables – Hydrogène absorbé dans un hydrure métallique réversible.
ISO/TS 15869	2009	Hydrogène gazeux et mélanges d'hydrogène gazeux – Réservoirs de carburant pour véhicules terrestres.	ISO 17268	2012	Dispositifs de raccordement pour le ravitaillement des véhicules terrestres en hydrogène comprimé.
ISO/TR 15916	2004	Considérations fondamentales pour la sécurité des systèmes à l'hydrogène.	ISO/TS 20100	2008	Carburant d'hydrogène gazeux – Stations-services.
			IEC/TS 62282-1		ed 3.011-13 Fuel cell technologies – Part 1 : Terminology.

IEC 62282-2	ed 2.003-12 Fuel cell technologies – Part 2 : Fuel cell modules.	Safety of electrically powered industrial trucks.
IEC 62282-4-101	ed 1.008-14 Fuel cell technologies – Part 4-101 : Fuel cell power systems for propulsion other than road vehicles and auxiliary power units (APU) –	Ainsi des commissions de normalisation se créent pour la gestion de l'hydrogène et l'utilisation de pile à combustible : ISO/TC 197 pour l'hydrogène et ISO/TC 105 pour les piles à combustible.

Réglementation

En sus des règles d'homologation classique pour les véhicules thermiques et des règles liées à l'électrification du système de propulsion, les véhicules à pile à combustible sont soumis à des règlements européens spécifiques, comme le CE 79/2009 et sa directive d'application 406/2010. Ces deux règlements imposent notamment d'apporter la preuve de la sûreté de

fonctionnement du système hydrogène. Ils imposent également une « réception par type » pour les composants les plus sensibles (ceux à l'intérieur desquels la pression de l'hydrogène gazeux est supérieure à 3 MPa), garantissant leur sécurité par des cycles de tests.

Annuaire

Constructeurs – Fournisseurs – Distributeurs (liste non exhaustive)

- Ballard** (Canada)
<http://www.ballard.com/>
- Fuel Cells 2000**
<http://www.fuelcells.org>
- Société Plug Power**
<http://www.clubparc.net>
- California Fuel Cell Partnership**
<http://www.cafcp.org/>
- Association française de l'hydrogène AFH2**
<http://www.afh2.org>
- France Hydrogène (ex AFHYPC)**
<https://www.afhyperc.org/>
- Hydrogène Europe**
<https://www.hydrogeneurope.eu/>
- CCFA** Le Comité des Constructeurs Français d'Automobiles est le syndicat professionnel des constructeurs d'automobiles
<http://www.ccfa.fr>
- Il compte neuf adhérents et a pour vocation l'étude et la défense des intérêts économiques et industriels de l'ensemble des constructeurs français (à l'exclusion des questions sociales) tant sur le plan national qu'au niveau international. Ses neuf adhérents sont : Citroën, Peugeot, Renault, Renault VI.
- ACEA** Association des Constructeurs Européens d'Automobiles (13 membres) dont le siège est situé à Bruxelles
<http://www.acea.be>
- Ses membres sont, outre PSA Peugeot Citroën, BMW, DAF, Fiat Auto, Ford Europe, GM Europe, MAN, Daimler, Porsche, Renault, Rolls-Royce, Scania, Volvo, VW, Toyota.
- AVERE France** Association de Véhicule Routier Electrique, section française
<http://www.avery-france.org>
- Carbone 4** : cabinet de conseil indépendant spécialisé dans la stratégie bas carbone et l'adaptation au changement climatique
<http://www.carbone4.com/>
- The International Partnership for Hydrogen and Fuel Cells in the Economy (IPHE)**,
<https://www.iphe.net/>
- Documentation – Formation – Séminaires (liste non exhaustive)**
- Fuel Cell Seminar** (États-Unis) (conférence annuelle)
<http://www.fuelcellseminar.com>

- Grove Symposium** (tous les deux ans – Londres)
<http://www.grovetfuelcell.com>
- Fuel cell expo** (Japon) (conférence/expo annuelle)
<http://www.fcexpo.jp>
- Foire d'Hanovre** (annuelle)
<http://www.hannovermesse.de>
- EVS** : Congrès Electric Vehicle Symposium (annuel)
- EHEC European Hydrogen Energy Conference**
World Fuel Cell Conference (WFCC 2021)
- The Hydrogen & Fuel Cells for Heavy Duty Transport Conference**,
<http://www.plugpower.com/>
- US Fuel Cell Council**
<http://www.usfcc.com/>
- Nuvera Fuel Cells**
<http://www.nuvera.com/>
- Fuel Cell Today**
<http://www.fuelcelltoday.com/>
- Hydrogenics**
<http://www.hydrogenics.com>
- UTC Fuel Cells**
<http://www.utcpower.com>
- Alstom-Ballard**
<http://www.de.alstom.com/>
- DaimlerChrysler**
<http://www.daimlerchrysler.de/>
- General Motors Corp.**
<http://www.gm.com>
- Toyota**
<http://www.toyota.com>
- Honda**
<http://www.honda.fr>
- Hyundai**
<http://www.hyundai.fr>
- Renault**
<http://www.renault.fr>
- PSA/Stellantis**
<http://www.stellantis.com>
- MAN**
<http://www.man.eu>

VOLVO Trucks

<http://www.volvotruck.fr>

GKSS

<http://www.gkss.de>

Organismes – Fédérations – Associations (liste non exhaustive)

ClubPac Club français « Piles à combustible »

ACI's 5th Hydrogen & Fuel Cells Energy Summit

Gagnez du temps et sécurisez vos projets en utilisant une source actualisée et fiable



RÉDIGÉE ET VALIDÉE
PAR DES EXPERTS




MISE À JOUR
PERMANENTE



100 % COMPATIBLE
SUR TOUS SUPPORTS
NUMÉRIQUES



SERVICES INCLUS
DANS CHAQUE OFFRE

- + de 340 000 utilisateurs chaque mois
- + de 10 000 articles de référence et fiches pratiques
- Des Quiz interactifs pour valider la compréhension 

SERVICES ET OUTILS PRATIQUES



Questions aux experts*

Les meilleurs experts techniques et scientifiques vous répondent



Articles Découverte

La possibilité de consulter des articles en dehors de votre offre



Dictionnaire technique multilingue

45 000 termes en français, anglais, espagnol et allemand



Archives

Technologies anciennes et versions antérieures des articles



Info parution

Recevez par email toutes les nouveautés de vos ressources documentaires

*Questions aux experts est un service réservé aux entreprises, non proposé dans les offres écoles, universités ou pour tout autre organisme de formation.

Les offres Techniques de l'Ingénieur

INNOVATION

- Éco-conception et innovation responsable
- Nanosciences et nanotechnologies
- Innovations technologiques
- Management et ingénierie de l'innovation
- Smart city – Ville intelligente

MATÉRIAUX

- Bois et papiers
- Verres et céramiques
- Textiles
- Corrosion – Vieillessement
- Études et propriétés des métaux
- Mise en forme des métaux et fonderie
- Matériaux fonctionnels. Matériaux biosourcés
- Traitements des métaux
- Élaboration et recyclage des métaux
- Plastiques et composites

MÉCANIQUE

- Frottement, usure et lubrification
- Fonctions et composants mécaniques
- Travail des matériaux – Assemblage
- Machines hydrauliques, aérodynamiques et thermiques
- Fabrication additive – Impression 3D

ENVIRONNEMENT – SÉCURITÉ

- Sécurité et gestion des risques
- Environnement
- Génie écologique
- Technologies de l'eau
- Bruit et vibrations
- Métier : Responsable risque chimique
- Métier : Responsable environnement

ÉNERGIES

- Hydrogène
- Ressources énergétiques et stockage
- Froid industriel
- Physique énergétique
- Thermique industrielle
- Génie nucléaire
- Conversion de l'énergie électrique
- Réseaux électriques et applications

GÉNIE INDUSTRIEL

- Industrie du futur
- Management industriel
- Conception et production
- Logistique
- Métier : Responsable qualité
- Emballages
- Maintenance
- Traçabilité
- Métier : Responsable bureau d'étude / conception

ÉLECTRONIQUE – PHOTONIQUE

- Électronique
- Technologies radars et applications
- Optique – Photonique

TECHNOLOGIES DE L'INFORMATION

- Sécurité des systèmes d'information
- Réseaux Télécommunications
- Le traitement du signal et ses applications
- Technologies logicielles – Architectures des systèmes
- Sécurité des systèmes d'information

AUTOMATIQUE – ROBOTIQUE

- Automatique et ingénierie système
- Robotique

INGÉNIERIE DES TRANSPORTS

- Véhicule et mobilité du futur
- Systèmes aéronautiques et spatiaux
- Systèmes ferroviaires
- Transport fluvial et maritime

MESURES – ANALYSES

- Instrumentation et méthodes de mesure
- Mesures et tests électroniques
- Mesures mécaniques et dimensionnelles
- Qualité et sécurité au laboratoire
- Mesures physiques
- Techniques d'analyse
- Contrôle non destructif

PROCÉDÉS CHIMIE – BIO – AGRO

- Formulation
- Bioprocédés et bioproductions
- Chimie verte
- Opérations unitaires. Génie de la réaction chimique
- Agroalimentaire

SCIENCES FONDAMENTALES

- Mathématiques
- Physique Chimie
- Constantes physico-chimiques
- Caractérisation et propriétés de la matière

BIOMÉDICAL – PHARMA

- Technologies biomédicales
- Médicaments et produits pharmaceutiques

CONSTRUCTION ET TRAVAUX PUBLICS

- Droit et organisation générale de la construction
- La construction responsable
- Les superstructures du bâtiment
- Le second œuvre et l'équipement du bâtiment
- Vieillessement, pathologies et réhabilitation du bâtiment
- Travaux publics et infrastructures
- Mécanique des sols et géotechnique
- Préparer la construction
- L'enveloppe du bâtiment
- Le second œuvre et les lots techniques

OFFRE



Hydrogène

Maîtrisez les technologies hydrogène pour développer vos projets innovants et faire croître votre marché;

Ref : TIP220WEB

PRÉSENTATION

Procédés de production
Technologies liées au stockage et transport
Innovations matériaux
Applications en tant que vecteur énergétique
Piles à combustible pour applications mobiles et stationnaires

VOTRE COMMANDE :

Référence	Titre de l'ouvrage	Prix unitaire H.T	Qté	Prix total H.T
TIP220WEB	Hydrogène	765 €	1	765 €
Total H.T en €				765 €
T.V.A : 5,5%				42,08 €
Total TTC en €				807,08 €

VOS COORDONNÉES :

Civilité M. Mme

Prénom _____

Nom _____

Fonction _____

E-mail _____

Raison sociale _____

Adresse _____

Code postal _____

Ville _____

Pays _____

Date :

Signature et cachet obligatoire

CONDITIONS GÉNÉRALES DE VENTE

Conditions générales de vente détaillées sur simple demande ou sur www.technique-ingenieur.fr

Si vous n'êtes pas totalement satisfait, vous disposeriez d'un délai de 15 jours à compter de la réception de l'ouvrage pour le retourner à vos frais par voie postale. Livraison sous 30 jours maximum.