



Le stockage embarqué de l'hydrogène

Trois filières se dégagent actuellement pour le stockage embarqué de l'hydrogène, un des défis de son utilisation comme vecteur énergétique : le stockage sous forme liquide à basse température, le stockage gazeux sous pression et le stockage sous forme solide. Le CEA travaille en particulier sur ces deux dernières voies innovantes.



Rack des réservoirs d'hydrogène sous haute pression du prototype de véhicule à pile à combustible TaxiPac sur base Peugeot Partner présenté en 2001.

C. Gardin/FSA Peugeot Citroën

En dehors des questions de fabrication et de coûts, le stockage est au centre des trois problèmes que pose l'utilisation de l'hydrogène à bord d'un véhicule. La mise en place d'un réseau de distribution exigera d'abord l'émergence d'un mode de stockage standardisé. La sécurité, la fiabilité et la facilité d'utilisation des véhicules à hydrogène devront ensuite être du même niveau que celles des véhicules à moteur à combustion interne actuels. Enfin, le stockage de l'hydrogène, plus difficile et moins performant que celui des carburants classiques, devra à terme assurer une autonomie similaire à celle des véhicules existants.

Or les objectifs technico-économiques fixés pour le stockage embarqué de l'hydrogène sont essentiellement basés sur les exigences des véhicules (place disponible, poids accordé, coûts souhaitables...) et non sur les capacités et les limitations des différentes technologies.

Les trois modes envisageables

À ce jour, trois types de stockage d'hydrogène à bord d'un véhicule peuvent être envisagés. Le stockage sous

forme liquide à 20 K (-253 °C) sous 10 bars (1 Mpa) permet d'atteindre des densités volumique et massique intéressantes mais nécessite des réservoirs à l'isolation thermique poussée afin de minimiser l'évaporation. Le stockage sur des substrats sous forme absorbée, notamment sur des hydrures métalliques, présente une densité volumique très séduisante mais une densité massique très faible. De plus la cinétique, la température et la pression de cyclage restent, entre autres, des points durs à maîtriser.

Le stockage sous forme comprimée (actuellement 350 bars, soit 35 MPa), enfin, permet d'atteindre une densité massique satisfaisante avec des réservoirs composites. La densité volumique de stockage reste faible: une pression de 700 bars (70 MPa) est inévitable pour rendre cette technologie compétitive.

Un cahier des charges exigeant

Le cahier des charges, tel qu'il est proposé par le Department Of Energy (DOE) américain (tableau), est le même pour toutes les voies de stockage potentielles

(**hydrures chimiques** ou métalliques, liquide, gaz comprimé, structures carbonées) mais chacune a ses spécificités. Pour le DOE, la capacité massique de stockage doit passer de 4,5 % en 2005 (1,5 kWh/kg) à 6 % en 2010 (2 kWh/kg) puis à 9 % (3 kWh/kg) en 2015, ce qui représenterait un gain d'un facteur 2. La capacité volumique de stockage doit être divisée par un facteur 2,25 compte tenu de la place allouée au réservoir. La réduction finale du coût total, d'un facteur 3 (de 6 à 2 \$/kWh entre 2005 et 2015), prend en compte une production de série qui ne suffira probablement pas, à elle seule, pour atteindre cet objectif. Le taux de fuite admissible pour les réservoirs est de 1 g d'hydrogène par kg stocké (1 cm³ de gaz à température et pression normales par litre de réservoir et par heure) en 2005 (figure 1).

Les calculs des capacités de stockage massique et volumique de l'hydrogène ainsi que du coût dépendent de la définition du réservoir. Inclut-il, dans le stockage cryogénique par exemple, l'échangeur thermique? Détendeurs et valves font-ils partie du réservoir sous pression? Qu'en est-il de l'emballage métallique des hydrures métalliques? etc. Afin de pouvoir évaluer et comparer des systèmes issus de technologies très différentes, une définition commune des réservoirs à hydrogène a été adoptée, par analogie avec les réservoirs d'essence.

Bien entendu, la prise en compte de tous les périphériques nécessaires au remplissage, à la fixation, à la sécurité, etc. n'en rend qu'encore plus exigeant le cahier des charges du stockage embarqué. Les constructeurs demandent en effet une autonomie de 500 km environ, eu égard aux habitudes acquises avec les véhicules à moteur thermique.

Des performances à améliorer

Compte tenu du pouvoir calorifique de l'hydrogène (voir *Pourquoi l'hydrogène?* tableau p 25), il est nécessaire d'en stocker environ 5 kg pour une telle autonomie, selon le poids, la puissance et la conception du véhicule. Suivant la progression établie par le DOE (voir plus haut), cela se traduit par les spécifications suivantes pour les futurs réservoirs : un poids de 111 kg, un volume externe de 139 litres et un remplissage

paramètre	2005	2010	2015
énergie spécifique utile (kWh/kg)	1,5	2	3
densité d'énergie utile (kWh/kg)	1,2	1,5	2,7
coût (\$ par kWh)	6	4	2
nombre de cycles (réservoir aux 3/4 vide à réservoir plein)	500	1,000	1,500
débit de remplissage	0,5	1,5	2
perte d'hydrogène utile (grammes)	1	0,1	0,05

capacité massique (énergie spécifique)	1,5 kWh/kg 0,045 kg H ₂ /kg	2,0 kWh/kg 0,045 kg H ₂ /kg	3,0 kWh/kg 0,045 kg H ₂ /kg
poids du système	111 kg	83 kg	55,6 kg
capacité volumique (densité d'énergie)	1,2 kWh/L 0,036 kg H ₂ /L	1,5 kWh/L 0,045 kg H ₂ /L	2,7 kWh/L 0,081 kg H ₂ /L
volume du système	139 l	111 l	62 l
coût du système de stockage	6 \$/kWh	4 \$/kWh	2 \$/kWh
coût du système	1 000 \$	666 \$	333 \$
débit de remplissage	0,5 kg H ₂ /min	1,5 kg H ₂ /min	2,0 kg H ₂ /min
temps de remplissage	10 min	3,3 min	2,5 min

Tableau.

Objectifs du DOE pour le stockage embarqué de l'hydrogène (en haut) et cahier des charges des réservoirs pour 5 kg d'hydrogène (en bas). (Source : United States Department of Energy, The Hydrogen, Fuel Cells, and Infrastructure Technologies (HFCCIT) Program Multi-year Program Plan, May 1, 2003).

en 10 minutes pour un coût de 1 000 \$ (830 euros) dès 2005. En 2015, le poids devra être réduit par 2 (55,6 kg), le volume par 2,25 (62 l) et le temps de remplissage par 4 pour un prix total divisé par 3.

En termes de capacités de stockage (systèmes complets), aucune technologie ne satisfait aujourd'hui les objectifs fixés par le DOE pour 2015.

Si les capacités massique et volumique de stockage des réservoirs doivent être améliorées, leur coût de fabrication doit diminuer d'un facteur 3 à 10. Il est cependant plus judicieux d'intégrer le coût du remplissage pour comparer les coûts de stockage. En effet, même si un réservoir cryogénique semble moins cher qu'un réservoir **hyperbare**, le coût de liquéfaction de l'hydrogène est probablement plus élevé que celui de sa compression, même à 700 bars.

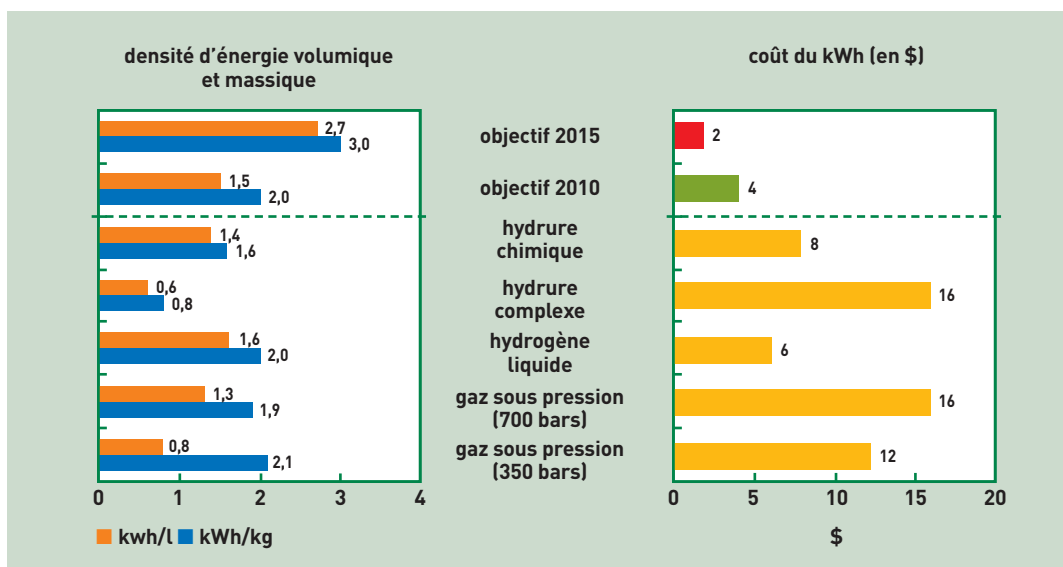


Figure 1. Performances affichées des différents types de réservoir de stockage d'hydrogène, en densité d'énergie volumique et massique (à gauche) et en coût du kilowattheure (à droite; 1 € = 1,20 \$). JoAnn Milliken, DOE, *Energy Efficiency and Renewable Energy, Hydrogen Storage*, avril 2003.



Le stockage sous pression

Pour améliorer les performances du stockage hyperbare de l'hydrogène, les chercheurs jouent principalement sur deux tableaux : des matériaux de structure et de revêtement interne des réservoirs plus performants et une mise en œuvre plus économique.

Réservoir tout polymère de 3 litres développé dans le cadre du projet Physe.

Les réservoirs **hyperbares** sont classés en quatre catégories. Les "type I" sont entièrement métalliques et les "type II" sont métalliques avec un frettage (en principe en fibre de verre) sur leur partie cylindrique. Les "type III" sont en matériaux **composites** (initialement en fibres de verre et, de plus en plus, en fibres de carbone) dont le **liner** (revêtement interne servant de barrière H₂) est métallique (initialement en aluminium, en acier depuis peu). Les "types IV" sont des réservoirs composites (principalement en fibres de carbone) dont le **liner** est en **polymère** (essentiellement **thermoplastique** de type polyéthylène ou polyamide).

Les limites des réservoirs métalliques

Au milieu des années 1970, les études sur la fragilisation de l'acier ont montré les limites de l'utilisation, en termes de durée de vie, des réservoirs métalliques pour le stockage de l'hydrogène. De plus, le poids trop important des réservoirs de type I et II ne permet pas d'envisager leur utilisation embarquée. À l'image de ce qui se fait en Amérique du Nord, la réglementation française autorise, depuis le milieu des années 1990, l'homologation et la mise sur le marché d'appareils à (très) haute pression non métalliques en matériaux composites. Ces réservoirs hyperbares diffèrent par les matériaux constitutifs, le mode de conception et les procédés de fabrication.

Le stockage à forte pression (350 puis 700 bars) de l'hydrogène dans les réservoirs est inéluctable si l'on veut atteindre les capacités énergétiques demandées (1,2 kWh/L en 2005). Cependant si la compression à 700 bars ne consomme que 10 % d'énergie (5 % à 350 bars), la compression au-delà de 350 bars est moins efficace (25 % de capacité de stockage perdu par rapport à la compression d'un gaz parfait)⁽¹⁾.

(1) Don Fraser, Dynetek Industries, *Solutions for hydrogen storage and distribution*, The PEI Wind-hydrogen Symposium, June 2003.

Légèreté des réservoirs composites

Le premier avantage des réservoirs composites (types III et IV) est leur légèreté. Une comparaison des masses par unité de volume montre qu'un réservoir en composite présente une masse inférieure de 25 à 75 % à celle d'un réservoir en acier de même volume⁽²⁾. De même, un réservoir en fibres de carbone à **liner** plastique permet de gagner 4 % de masse par rapport à son homologue à **liner** aluminium. Une comparaison des indices de performances (ratio pression de service × volume/masse) pour différents types de réservoirs sous pression (figure 2) va dans le même sens : les réservoirs composites de type III ou IV sont incontournables pour le stockage embarqué de l'hydrogène, compte tenu des exigences du cahier des charges.

Les atouts des réservoirs à liner plastique

Les réservoirs composites de type IV à **liner** plastique sont plus légers, moins chers et ont des durées de vie supérieures (absence de fatigue en fluage) que les réservoirs à **liner** aluminium. Des progrès sont surtout recherchés dans le composite (tenue à la pression) et le **liner** (barrière H₂), deux des trois éléments essentiels des réservoirs de type IV, le troisième étant constitué par les embases permettant la connexion.

Optimiser le composite et parfaire le liner

La seule fibre de carbone constituant le composite extérieur représente environ 40 % du prix d'un réservoir composite à **liner** plastique. Il est donc nécessaire d'optimiser le dimensionnement (la pression de rupture doit être égale à 2,35 fois la pression de service) et le bobinage par enroulement filamentaire afin de ne pas alourdir le réservoir, mais surtout ne pas trop augmenter le coût final, notamment à 700 bars.

L'autre point clé est le développement de thermoplastiques barrières à l'hydrogène, afin de garantir un taux de fuite maximal de 1 cm³/L/h pour le réservoir et résistants mécaniquement, dans une plage de températures de -40 °C à +85 °C. De plus les technologies de mise en œuvre de ces polymères techniques doivent permettre d'obtenir des **liners** pour une large gamme de volumes (1 à 150 litres) et d'épaisseurs (1 à 10 mm), uniformes, sans contrainte résiduelle, avec une bonne interface avec l'embase et à un faible coût.

La feuille de route CEA des réservoirs de type IV

Le CEA a commencé à développer des réservoirs de type IV en 1998. Le projet français Physe, labellisé par le **réseau PACo** et financé par le ministère chargé de l'Industrie, a démarré en 2000 avec pour objectif le

(2) Patricia Krawczak, École des Mines de Douai, *Réservoirs haute pression en composites*, Techniques de l'ingénieur, 2002.

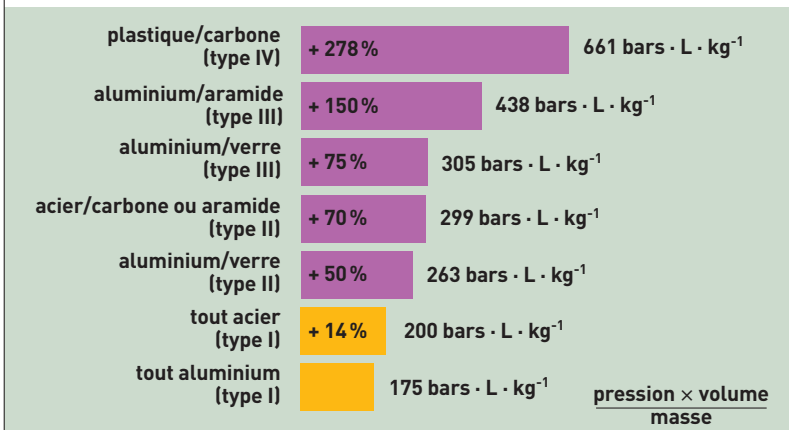


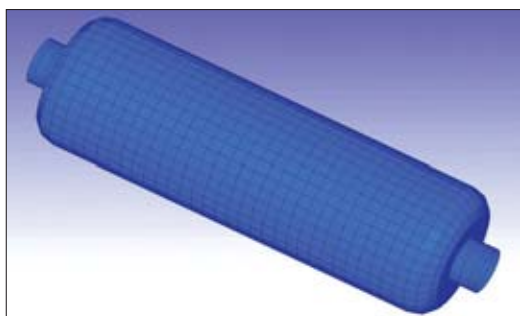
Figure 2. Analyse comparée de l'indice de performance (pression × volume/masse) de différents types de réservoirs⁽²⁾.

développement d'un réservoir de 3 litres à 300 bars pour des applications de petits matériels électroportatifs. Les *liners* de première génération développés pour ces prototypes sont des polymères tri-couches à base d'EVOH (copolymère éthylène-alcool vinylique) brevetés⁽³⁾.

Dans le cadre de la collaboration CEA-Air Liquide, le projet français Polystock, labellisé par le réseau PACo et financé par le ministère chargé de la Recherche, a démarré fin 2002, avec pour objectif le développement d'un réservoir de 22 litres à 350 bars pour des applications transports. Les *liners* de deuxième génération sont des polyamides spécifiques brevetés par le CEA et Air Liquide⁽⁴⁾ dont le procédé de fabrication est 10 fois plus rapide que le procédé actuel. Le projet européen Storhy (6^e PCRDT), qui a démarré en mars 2004 avec près de 40 partenaires, vise, entre autres, à développer des réservoirs sous pression (type III et IV), **cryogéniques** ou à **hydrures métalliques** pour des applications automobiles. Dans le sous-programme *Pressure*, le CEA est responsable du développement de réservoirs type IV à *liner* rotomoulé de 48 et 150 litres à 700 bars. Plusieurs centres du CEA sont impliqués dans ces travaux de R & D sur ces réservoirs. Ceux du Cesta et du Ripault travaillent sur le dimensionnement

(3) Brevets CEA FR/00.11072 et FR/00.11073 du 30 août 2000.

(4) Brevet CEA-Air Liquide FR/04.51104 du 3 juin 2004.



Modélisation par éléments finis d'une bouteille de 22 litres développée par Polystock (photographie en couverture).



Installation de rotomoulage, au centre CEA du Ripault (Indre-et-Loire), des vessies plastique de réservoirs pour le stockage de l'hydrogène. Le moule tourne en 3 dimensions dans un four à 350 °C.

des réservoirs et le bobinage des fibres de carbone imprégnées de résine époxy, afin d'optimiser les performances finales (poids, coût et tenue à la rupture). Le centre du Ripault développe également les nouveaux thermoplastiques techniques et de nouveaux procédés de rotomoulage pour la mise en forme des *liners* au sein de son pôle plasturgie, polymères et composites, tandis que les performances barrières des thermoplastiques techniques sont évaluées à Grenoble et Valduc.

Le transfert industriel des nouvelles générations de *liners* donne lieu à la fabrication de réservoirs prototypes complets destinés à de nombreux essais de validation au Cesta (chute, incendie, *crash-test*, tir à balles...), à Valduc (fuite, cyclage sous hydrogène) ou chez différents partenaires.

Dans l'ensemble de ces développements, le CEA collabore avec de nombreux partenaires, universitaires ou écoles d'ingénieurs (ENSAM Paris, ENSMA Poitiers, INSA Lyon, Université Claude Bernard de Lyon, ICAM Nantes...) et industriels (Air Liquide, Ullit, Metroplast, Composites Aquitaine...) ainsi qu'avec tous les partenaires européens du projet Storhy.

> **Philippe Mazabraud**

Direction des applications militaires
CEA centre du Ripault

Les hydrures

Le stockage sous forme solide de l'hydrogène décrit généralement l'absorption ou l'adsorption de l'hydrogène par un matériau. Certains composés, plus connus sous le nom d'hydrures, sont capables de l'absorber de façon réversible. Il existe aussi des substances carbonées susceptibles d'adsorber, donc de fixer en surface, l'hydrogène. Des sauts technologiques sont espérés dans ce domaine.

Le terme **hydrure** couvre une grande variété de matériaux qui peuvent être décrits comme des composés contenant des liaisons métal-**hydrogène**. Les hydrures peuvent être divisés en trois groupes, selon la nature de la liaison métal-hydrogène : **ionique**, **covalente** et **métallique**. Cette nature dépendra de la position de l'élément hôte dans la classification périodique. Les **alcalins** et les **alcalino-terreux** forment des hydrures à liaison ionique possédant des liaisons très électro-polaires qui contribuent à les rendre denses et très stables. Les métaux à droite du groupe VIII forment des hydrures à liaison covalente et donc peu électro-polaires, peu stables et peu denses. Des métaux tels que le magnésium peuvent former des hydrures avec

deux types de liaison : covalente et ionique. Les **métaux de transition** forment des hydrures à liaison métallique. Ces hydrures ont fait l'objet de très nombreux travaux dans le cadre du stockage de l'hydrogène, car ce sont les seuls à être réversibles.

L'hydruration et la déhydruration de la plupart des métaux se font selon une réaction directe entre le métal et l'hydrogène : $M + x/2H_2 \rightarrow MH_x$.

Faibles pressions et compacité

Le stockage sous forme d'hydrure présente deux avantages principaux : la sûreté puisque les pressions mises en œuvre peuvent être faibles (souvent inférieures à



la pression atmosphérique) et la compacité puisque les hydrures métalliques possèdent des capacités volumiques d'absorption élevées. À titre d'exemple, 100 g de palladium (soit 8,3 cm³) permettent de stocker l'équivalent d'un réservoir contenant 7 l d'hydrogène rempli à la pression atmosphérique. L'inconvénient majeur de ce type de stockage est la faible capacité massique d'absorption pour la plupart des hydrures. Celle-ci est généralement comprise entre 0,5 et 2 % ce qui est loin des 6 % requis pour les applications automobiles. De plus, le coût des hydrures est souvent prohibitif: au-delà de 20 euros/kg. Deux types de matériaux semblent actuellement prometteurs au vu de leurs caractéristiques (capacité d'absorption réversible, pression d'équilibre, sensibilité aux impuretés et cinétique d'absorption/désorption; voir tableau): les composés à base de magnésium (7 % de capacité massique) et les alanates (jusqu'à 5 %).

Trois familles prometteuses

De nombreuses recherches sont actuellement en cours afin d'améliorer les capacités d'absorption et les cinétiques d'absorption/désorption des hydrures, en vue d'utiliser ces derniers en stockage tampon pour l'alimentation de la **pile à combustible**. Les recherches s'orientent actuellement vers trois familles d'hydrures, certains hydrures d'alliages AB, les matériaux à base de magnésium et les alanates.

Les hydrures des alliages AB₅ (LaNi₅), AB₂ (ZrMn₂), AB (TiFe) sont les mieux connus de toutes les familles d'hydrures⁽¹⁾. Cependant, les recherches récentes sur les alliages TiFe, AB₂ et AB₅ ne laissent pas entrevoir de saut technologique permettant une amélioration notable de leurs performances. Les capacités d'absorption de ces alliages sont toujours limitées (< 2 % de capacité massique).

Le magnésium (dopé) ou les alliages à base de magnésium ont des capacités d'absorption importantes (≥ 5 % de capacité massique). Les cinétiques de chargement et de désorption sont très rapides grâce aux découvertes récentes. Le principal problème de ce type de composé reste la trop haute température de désorption de l'hydrogène. De plus les études sur ces alliages n'ont commencé que récemment. Les propriétés cinétiques et thermodynamiques sur des masses plus importantes sont encore inconnues. Enfin, leur mise en œuvre nécessite des conditions contraignant-

tes: boîtes à gants scrupuleusement inertées tout au long de la fabrication puisque ces matériaux sont pyrophoriques⁽²⁾. Un saut technologique pourrait être franchi assez rapidement puisque beaucoup de travaux s'orientent actuellement sur le comportement de ces hydrures utilisés en grande quantité.

Les hydrures de métaux (hors métaux de transition) constituent la troisième famille d'intérêt. Les composés les plus intéressants ici sont les alanates (par exemple: NaAlH₄), étudiés depuis environ cinq ans. Ces composés possèdent une capacité massique d'environ 5 %. La température de désorption de l'hydrogène reste haute et la réhydrogénation demande encore des conditions de pression et de température élevées. De plus, tout comme pour le magnésium, les cinétiques d'absorption/désorption de ces composés sont inconnues lorsqu'ils sont utilisés en grande quantité. Enfin, la manipulation de ces matériaux est très délicate du fait de leur caractère pyrophorique. Malgré ces inconvénients, ces hydrures semblent prometteurs dans la mesure où les recherches ne font que débiter.

Prochains démonstrateurs

Les différentes familles d'hydrures présentent des caractéristiques variées. L'hydrure peut donc être choisi en fonction de l'application: stationnaire ou mobile. Le stockage sous forme d'hydrures apporte donc une très grande modularité et peut être utilisé à court terme pour les applications stationnaires (hydrures de lanthane-nickel...) ou mobiles à plus long terme (hydrure de magnésium et alanates). Des projets destinés à tester des démonstrateurs contenant 10 kg d'hydrures sont actuellement en cours au CEA. Ils seront utilisés, par la suite, pour équiper une pile à combustible qui alimentera un centre de recherche. L'utilisation des hydrures comme moyen de stockage apporte donc un niveau de sûreté et une grande modularité, en particulier pour les applications stationnaires.

> Isabelle Moysan

Direction des applications militaires
CEA centre de Valduc

(1) A étant une terre rare ou un métal de transition et B un métal de transition.

(2) Pyrophorique: qui s'enflamme spontanément au contact de l'air.

propriété	hydrure de lanthane-nickel	hydrure de zirconium-manganèse	hydrure de titane-fer	hydrure de magnésium Mg + c + v (5%at) par mécano-synthèse à 300 °C sous 4 bars de H ₂	alanates (NaAlH ₄)
capacité réversible	1,28 %	0,9 %	1,5 %	7 %	4 à 5 %
pression de désorption à 25 °C	1,8 bar	0,001 bar	4,1 bars		désorption à 220 °C
température pour 1 bar activation	12 °C	167 °C	- 8 °C	300 °C pour 0,15 bar	
	facile	moyenne	difficile	facile	hydrogénation à 150 °C sous 170 bars
impuretés	peu sensible jusqu'à 500 ppm	assez sensible	sensible	sensible	sensible
synthèse	assez facile	difficile	difficile	difficile	difficile
cinétique	rapide	rapide	moyenne	rapide	lente

Tableau.
Principales caractéristiques de différentes familles d'hydrures.

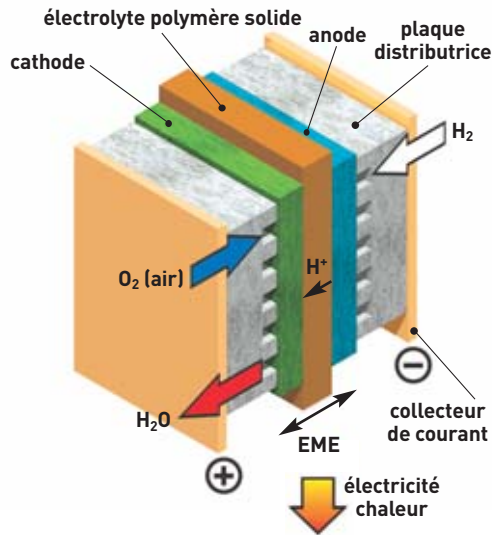
propriétés	valeur numérique
masse atomique	1,0079
constante du gaz	4 124,5 J/kg K
PCI (Pouvoir Calorifique Inférieur)	33,33 kWh/kg / 3 kWh/Nm ³ (essence : ≈ 12 kWh/kg, 8,8 kWh/l) (gaz naturel : 10,6 - 13,1 kWh/kg, 8,8 - 10,4 kWh/Nm ³) L'énergie contenue dans 1 Nm ³ d'hydrogène est équivalente à 0,34 litre d'essence, 1 kg d'hydrogène est équivalent à 2,75 kg d'essence 10 800 kJ/Nm ³
PCS (inclut l'énergie de la vapeur d'eau)	39,41 kWh/kg / 3,55 kWh/Nm ³ 12 770 kJ/Nm ³
densité gazeuse à 273 K	0,0899 kg/Nm ³ (gaz naturel : 0,6512 kg/Nm ³)
chaleur spécifique (Cp à 273 K)	14 199 J/kg/K
température d'ébullition (à 1 013 mbars)	20,268 K

Tableau.

Quelques caractéristiques physiques et physico-chimiques de l'hydrogène moléculaire.

C

Comment fonctionne une pile à combustible ?



Principe de fonctionnement de la pile à combustible. Exemple de la pile à membrane échangeuse de protons. EME représente l'ensemble électrodes-membrane.

La pile à combustible repose sur un principe fort ancien, puisque c'est en 1839 que Sir William Grove construisit la première cellule électrochimique fonctionnant avec de l'**hydrogène** comme carburant, mettant ainsi en évidence la possibilité de produire du courant électrique par conversion directe de l'énergie chimique du **combustible**. La pile à combustible ayant la particularité d'utiliser deux gaz – l'hydrogène H_2 et l'oxygène O_2 – comme couple électrochimique, les réactions d'**oxydo-réduction** qui s'opèrent dans la pile sont donc particulièrement simples. La réaction se produit au sein d'une structure (la **cellule électrochimique élémentaire**) essentiellement composée de deux **électrodes** (l'**anode** et la **cathode**) séparées par un **électrolyte**, matériau permettant le passage des **ions**. Les électrodes mettent en jeu des **catalyseurs** pour activer d'un côté, la

réaction d'**oxydation** de l'hydrogène, et de l'autre côté, la réaction de **réduction** de l'oxygène.

Dans le cas d'une pile à électrolyte acide (ou pile à membrane échangeuse de **protons**), l'hydrogène de l'anode est dissocié en protons (ou ions hydrogène H^+) et en **électrons**, suivant la réaction d'oxydation : $H_2 \rightarrow 2 H^+ + 2 e^-$. À la cathode, l'oxygène, les électrons et les protons se recombinent pour former de l'eau : $2 H^+ + 1/2 O_2 + 2 e^- \rightarrow H_2O$. Le principe de la pile à combustible est donc inverse à celui de l'**électrolyse** de l'eau. La tension thermodynamique d'une telle cellule électrochimique est de 1,23 volt (V). Toutefois, en pratique, la pile présente une différence de potentiel de l'ordre de 0,6 V pour des **densités de courant** de 0,6 à 0,8 A/cm². Le rendement d'une telle cellule est donc d'environ 50%, l'énergie dissipée l'étant bien évidemment sous forme de chaleur.