

Montage d'un réservoir de stockage d'hydrogène à hydrures métalliques.

© AVANTIAN

HYDROGÈNE

Nouvelle énergie verte

Traditionnellement produit à partir d'hydrocarbures, pour des usages industriels, l'hydrogène a commencé une nouvelle vie dans le domaine de l'énergie. Différents modes de production, comme l'électrolyse, permettent en effet d'obtenir de l'hydrogène à bas taux de carbone ou totalement exempt de carbone, en faisant appel à l'électricité produite soit par les centrales nucléaires, soit par les énergies renouvelables, telles que l'éolien, le photovoltaïque ou l'hydraulique.

Les usages de cet hydrogène « vert » se développent. Il trouve d'ores et déjà différentes finalités, que ce soit comme vecteur de stockage ou de valorisation d'énergie renouvelable, comme complément au gaz naturel, voire comme carburant, ainsi que pour une variété d'applications liées à la pile à com-

bustible dans les domaines stationnaires ou mobiles. Le potentiel de l'hydrogène-énergie est immense. Pour l'exploiter pleinement, la recherche – académique et industrielle – s'attache à améliorer les performances et à abaisser le coût des technologies permettant de le produire, de le stocker et de le distribuer. C'est le cas notamment du vaste programme Horizon Hydrogène Énergie. Parallèlement, de grands sites pilotes sont en cours d'installation en France. En Corse, le programme MYRTE étudie le stockage d'hydrogène obtenu à partir d'électricité photovoltaïque. À Dunkerque, le projet GRHYD se développe autour de l'utilisation de l'hydrogène produit par les énergies renouvelables comme complément au gaz naturel. ■■

> P. 2 – LES ENJEUX

L'hydrogène-énergie, une nouvelle étape vers la transition énergétique

> P. 6 – LA RECHERCHE

Toutes les composantes de la filière hydrogène

> P. 13 – INNOVATION

Stockage, production, piles à combustible, ingénierie, électrolyseurs

Cahier réalisé en partenariat avec :



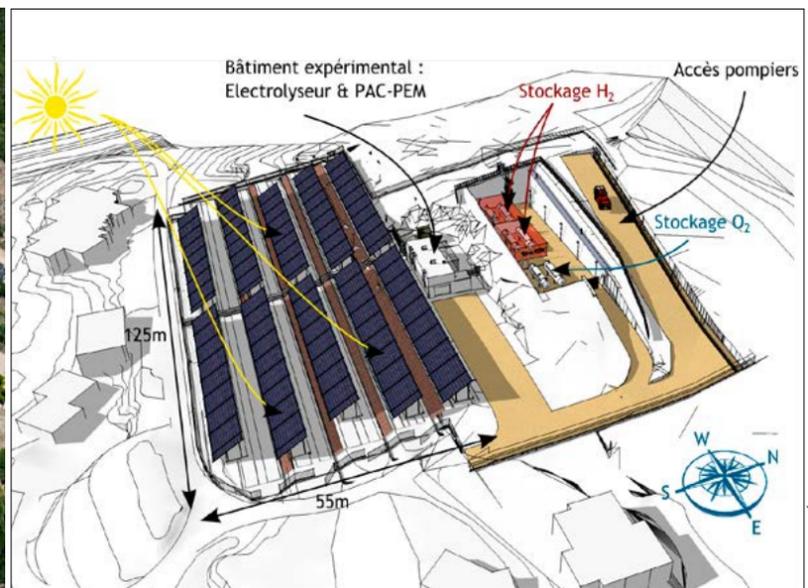
L'hydrogène-énergie, une nouvelle étape vers la transition énergétique

L'hydrogène-énergie offre un immense potentiel. Il trouve dès aujourd'hui différentes finalités, que ce soit comme vecteur de stockage ou valorisation d'énergie renouvelable, comme complément au gaz naturel, comme combustible et pour une variété d'applications liées à la pile à combustible dans les domaines stationnaires ou mobiles.

L'hydrogène semble avoir un malin plaisir à déjouer les idées reçues. On répétait à l'envi que ce gaz était exclusivement produit par l'homme jusqu'à ce que, surprise, on en découvre récemment des sources... parfaitement naturelles (voir encadré p. 3). Ce n'est pas tout. L'hydrogène ne figurait pas au rang des énergies vertes pour la bonne raison qu'il est aujourd'hui encore très largement obtenu à partir d'hydrocarbures (pétrole ou gaz naturel). Fabriqué en grandes quantités (Air Liquide en a produit et distribué en France 11,5 mil-

liards de m³ en 2012), il sert principalement les besoins de l'industrie. Cela aussi doit être reconsidéré. Non seulement l'hydrogène acquiert ses galons d'énergie non carbonée, mais il apparaît désormais comme le meilleur allié des énergies renouvelables, que ce soit l'éolien ou le photovoltaïque. «*Il constitue un excellent complément à l'énergie électrique; c'est un véritable "bonus" pour l'électricité car il prolonge ses usages au-delà du seul réseau électrique*», affirme Marianne Julien, présidente de l'Association française pour l'hydrogène et les piles à combustible (AFHYPAC), l'association qui promeut la filière hydrogène en France. Enfin, l'hydrogène en tant que source d'énergie est le plus souvent identifié à la mobilité. L'idée la plus répandue est : hydrogène égale voiture électrique à pile à combustible. Exact. Mais en réalité les automobiles ne représentent qu'un des nombreux usages de l'hydrogène-énergie.

Bref, à l'heure de la réflexion sur la transition énergétique, ce gaz vient désormais s'ajouter à la panoplie des solutions alternatives aux énergies carbonées et participant à l'indépendance énergétique du pays. En France, la nouvelle prise de conscience de son formidable potentiel et le regain d'intérêt



La plate-forme MYRTE est un site pilote qui met en œuvre une centrale photovoltaïque de 560 kWc pour la production et le stockage d'hydrogène. En cours d'installation à Ajaccio, elle est soutenue par l'Université de Corse Pasquale-Paoli, Areva et le CEA.



Une pile à combustible et son stockage d'hydrogène dans des bouteilles sous pression. Une solution pour l'alimentation en électricité de sites isolés.

pour le sujet remontent à 2011, époque à laquelle, après avoir constaté les progrès de l'utilisation de l'hydrogène à l'étranger, l'ADEME a élaboré avec AFHYPAC sa feuille de route stratégique pour le développement de cette filière.

La bonne nouvelle en l'occurrence est que, même si la France accuse un certain retard, notamment du côté des constructeurs d'automobiles, elle possède en revanche une recherche d'un excellent niveau. De quoi, s'accordent à dire les spécialistes, rejoindre très rapidement le peloton de tête où figurent en bonne place la Scandinavie, l'Allemagne, le Japon, la Corée du Sud et la Californie. «*À condition de montrer une grande constance dans l'effort, car c'est une affaire de long terme*», souligne Marianne Julien.

STOCKAGE DES ÉNERGIES INTERMITTENTES

De même, côté industriel, la situation est plutôt engageante. Outre les grands groupes très actifs sur ce thème (Air Liquide, GDF Suez, EDF, Areva...), la France dispose d'un tissu de PME (Ataway, McPhy Energy, CETH₂, Symbio FCell, PaxItech...) proposant des solutions innovantes dans tous les secteurs; des entreprises en train de se structurer en filière, au sein d'AFHYPAC notamment. Certaines sont parfois de taille très modeste, comme Pragma Industries – 7 personnes seulement. Ce qui ne l'empêche pas de mettre actuellement en place une ligne de production automatisée de petites piles à combustible extrêmement originales. Une ligne d'une capacité de 50 000 unités par an (voir page 14).

Comment rendre l'hydrogène non carboné? Soit en ayant recours à la biomasse. Les procédés thermo-chimiques de gazéification et de pyrolyse de biomasse solide produisent un mélange de gaz (monoxyde de carbone et hydrogène) dont on peut extraire l'hydrogène. Soit en utilisant du biométhane à la place du gaz naturel dans les unités de production d'hydrogène «par réformage» existantes ou dans des unités décentralisées

L'HYDROGÈNE NATUREL, NOUVELLE SOURCE D'ÉNERGIE?

Des travaux récents ont confirmé que des émanations naturelles continues d'H₂ se rencontrent fréquemment sur Terre. Elles ont été observées dans les grands massifs terrestres de péridotite ainsi que dans les zones intra-plaques situées au cœur des continents. Comment est produit ce gaz? L'IFPEN (IFP Énergies nouvelles), spécialiste de ce sujet, privilégie deux pistes: l'oxydation par l'eau des roches riches en fer réduit; ou un dégazage continu de la planète, ce qui bouleverserait la conception usuelle de la composition chimique de l'intérieur de la Terre. Si cet hydrogène naturel s'avérait exploitable, il pourrait constituer une

nouvelle source d'énergie durable – la production observée étant un phénomène continu lié à la dynamique de la planète –, propre, respectueuse de l'environnement et bien répartie sur les différents continents. Mais le chemin est encore long avant d'envisager une production industrielle de grande ampleur. Des efforts de recherche importants seront nécessaires pour actionner les verrous existants. Deux usines pilotes sont en développement aux États-Unis et au Mali. En France, IFPEN a lancé cette année un nouveau programme pour évaluer l'intérêt technico-économique d'une production industrielle d'H₂ naturel.

de petites tailles au plus près de la source de biogaz. Ou alors en utilisant tout simplement la bonne vieille électrolyse de l'eau donc, l'électricité. L'hydrogène qui en est issu sera à faible taux de carbone si l'électricité est d'origine nucléaire et parfaitement «vert» si elle provient d'une source renouvelable (éolien, solaire ou hydraulique). L'électrolyse classique (dite basse température) dispose encore de marges de progression. Aujourd'hui, elle produit un hydrogène coûteux dont le prix varie entre 5 et 30€/kg alors que celui issu du vaporemformage du gaz naturel ne dépasse pas 1,50€/kg dans les grosses unités. Elle offre en revanche l'avantage de pouvoir être effectuée sur site.

Néanmoins, et sans compter les progrès attendus en matière d'électrolyse (voir article page 7) et les baisses de prix liées à la production en plus grand volume des électrolyseurs, cette technologie se prête d'ores et déjà à un usage très prometteur. Produire de l'hydrogène à partir d'éolien ou de solaire résout en effet très élégamment le problème de ces énergies intermittentes: le stockage (ou l'adéquation entre moment de production et de consommation). Elles produisent parfois trop, et leur énergie est perdue – on parle d'énergie fatale. Utiliser leur électricité pour produire de l'hydrogène par électrolyse se justifie alors pleinement, même si son coût est élevé. Rien n'est perdu. L'électricité est stockée sous forme de gaz pour un

LES PLUS ET LES MOINS DE L'HYDROGÈNE-ÉNERGIE

Principal avantage :

L'hydrogène est un excellent vecteur énergétique avec une densité énergétique de 33 kWh par kilogramme. Il contient 3 fois plus d'énergie par unité de masse que le gazole et 2,5 fois plus que le gaz naturel.

Principal inconvénient :

Le stockage de l'hydrogène réclame de l'énergie et, gaz léger, son transport est très peu efficace en termes d'énergie transportée par unité de volume : 15 fois moins que le pétrole et 3 fois moins que le gaz naturel.

usage ultérieur ou utilisée sous forme gaz sur d'autres marchés que les marchés électriques.

Plusieurs actions pilotes sont menées en France dans ce domaine. Inaugurée en janvier 2012, la plate-forme MYRTE est installée à Ajaccio. Soutenu par l'Université de Corse Pasquale-Paoli, Areva (sa filiale stockage d'énergie, ex-Helion) et le Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA), ce site pilote met en œuvre une centrale photovoltaïque de 560 kWc pour la production et le stockage d'hydrogène. L'objectif est de développer un système et une stratégie de pilotage pour améliorer la gestion et la stabilisation du réseau électrique. La Corse est le lieu tout indiqué pour cette recherche, la configuration actuelle du réseau public d'électricité présentant en effet des limites à l'intégration de sources d'énergie renouvelables intermittentes.

MÉLANGE HYDROGÈNE GAZ NATUREL

L'autre grand projet pilote français impliquant l'hydrogène vert se déroule à Dunkerque sous l'égide de GDF Suez. Baptisé GRHYD, il a été annoncé cette année. Il vise non seulement à produire de l'hydrogène à partir d'électricité issue d'énergies renouvelables, mais également à valider la pertinence de la filière dite « Power to Gas », qui a pour objectif de transporter et valoriser cet hydrogène mélangé au gaz naturel dans les applications classiques du gaz (chauffage, eau chaude, carburant...). Ce vaste programme (cinq ans, 15 M€) ne réunit pas moins d'une douzaine de partenaires dont la Communauté urbaine de Dunkerque (où auront lieu les démonstrations) et son exploitant de bus (DK Bus Marine), GrDF, GNVERT, COFELY-INEO, Areva Stockage d'Énergie, le CEA, McPhy Energy, l'Ineris, le CETIAT et CETH₂.

Deux usages différents du précieux gaz seront étudiés. Le premier s'intéresse à l'hydrogène en tant que carburant. Mélangé (entre 6 et 20%) à du gaz naturel, ce carburant baptisé « Hythane® », sera utilisé à Dunkerque sur la flotte d'autobus fonctionnant actuellement au gaz naturel. L'autre application consiste également à mélanger méthane et hydrogène mais cette fois en injectant ce dernier (jusqu'à 20%) dans le réseau de gaz naturel de la ville. Objectif : alimenter 200 logements d'un nouveau quartier de Dunkerque (chauffage, cuisson, eau chaude). Dans les deux cas, l'apport d'hydrogène vert



En 2012, la plate-forme logistique européenne d'Air Liquide Welding de Vetry a doté sa flotte de chariots élévateurs de piles à combustible fournies par HyPulsion.

contribuera à diminuer les émissions de CO₂ du gaz naturel jusque-là utilisé seul.

Outre cette adjonction au gaz naturel, l'hydrogène trouve un autre intéressant potentiel d'utilisation comme matière première pour la production de méthane. L'opération dite de méthanation combine en effet du dioxyde de carbone et de l'hydrogène pour générer du méthane, de l'eau... et de la chaleur. Ce méthane est susceptible de trouver divers emplois. Par exemple, comme vecteur de stockage ou de transport d'énergie d'origine renouvelable, le méthane étant beaucoup plus facile à transporter que l'hydrogène. Autre solution, la transformation du méthane en divers carburants comme le méthanol ou le kérosène. Un carburant qui, certes, émet du CO₂ mais dont les émissions sont en partie compensées par l'utilisation et le recyclage du CO₂ qui permet de le produire ! GDF Suez s'intéresse de près à cette technologie qui doit encore faire la preuve de sa compétitivité en termes de coût, ce à quoi s'attelle la recherche qui explore les solutions à base d'électrolyse haute température notamment.

PILES À COMBUSTIBLE

L'autre voie royale de l'utilisation de l'hydrogène – vert ou non, d'ailleurs – est bien entendu la pile à combustible. La technologie est séduisante. Alimentée par de l'hydrogène, elle produit de l'électricité en n'émettant que de la chaleur et de la vapeur d'eau. Elle affranchit la voiture électrique de ses plus grandes faiblesses : autonomie limitée, temps de recharge long. Toutefois, son utilisation à grande échelle dans la voi-

ture particulière n'est pas envisageable sans le déploiement au préalable d'une infrastructure de distribution d'hydrogène adaptée aux usagers. Dans les applications liées à la mobilité, la pile trouve toutefois d'ores et déjà des usages sur des flottes captives, en particulier comme source d'énergie pour des chariots élévateurs dans des sites industriels. Aux États-Unis, plus de 3000 chariots électriques fonctionnent de cette façon. L'avantage : plus de temps perdu à recharger leurs batteries. Il suffit de « faire le plein » d'hydrogène. La France s'y met à son tour. Air Liquide vient ainsi d'installer une station de distribution d'hydrogène chez Ikea pour alimenter, dans un premier temps, une vingtaine de chariots élévateurs de la plate-forme logistique de Saint-Quentin-Fallavier, près de Lyon. Ces chariots élévateurs sont munis de piles à combustible à hydrogène HyPulsion (co-entreprise détenue à 80% par Axane, filiale d'Air Liquide, et à 20% par Plug Power). Le déploiement de flottes captives de véhicules électriques utilitaires équipés d'un réservoir d'hydrogène et d'une pile à combustible est également en cours de discussion, comme phase d'amorçage d'un usage grand public (voir Innovation p. 16). Cette approche spécifique française, sur le modèle du déploiement des véhicules électriques batterie en France, permettrait de réduire les risques d'investissement d'infrastructure dans les premières années.

D'autres applications de niche – stationnaires cette fois – contribuent à amorcer le développement de la technologie. Par exemple, la fourniture de courant pour sites isolés, comme les antennes relais et les bases de télécommunica-

tion ; ou encore, des groupes électriques de secours pour des usages critiques ou stratégiques (serveurs informatiques, hôpitaux...) et, plus largement, comme soutien aux réseaux électriques défaillants, dans les pays émergents par exemple.

COGÉNÉRATION : LE JAPON EN POINTE

Reste enfin une application majeure : la cogénération (production simultanée d'électricité et de chaleur) dans les bâtiments. Ici, le Japon est l'incontestable leader avec plus de 20 000 unités vendues et un objectif de 50 000 à 100 000 piles installées par an d'ici à 2015-2020 ! L'Europe s'y lance. L'Allemagne vise 800 systèmes mis en place d'ici à 2015. Le projet européen Ene.Field prévoit quant à lui 1 000 systèmes au même horizon (dont 30 en France). Au total, GDF Suez pense que les piles à combustible pourraient représenter jusqu'à 10% du marché des chaudières en 2020. ■

L'HYDROGÈNE À LA POMPE

Air Liquide a mis au point des stations de distribution d'hydrogène qui permettent de remplir le réservoir des véhicules avec de l'hydrogène gazeux en moins de cinq minutes et une pression allant jusqu'à 700 bars. À ce jour, plus de 60 stations de distribution ont été conçues

et fournies par le groupe. Le déploiement continue afin d'être prêt en 2015, date à partir de laquelle les constructeurs (Hyundai, Toyota, Honda, puis Daimler, Nissan...) prévoient le début de la commercialisation de leurs préséries de véhicules à hydrogène.



La recherche se structure

La France est dotée d'un important dispositif de recherche qui travaille sur toutes les composantes de la filière hydrogène, aussi bien côté recherche académique qu'industrielle.

Filière hydrogène. Qu'il s'agisse de recherche académique ou de recherche industrielle, concernant l'hydrogène, la France se situe à un excellent niveau.

Côté académique, les structures évoluent. Jusque-là, au sein du CNRS, les travaux sur l'hydrogène étaient répartis selon deux Groupements de recherche (GDR) couvrant l'essentiel de la recherche académique. Le premier, ACTHYF, avec ses 31 laboratoires et instituts travaille en particulier dans le domaine de la production d'hydrogène vert (biomasse, thermolyse, électrolyse), du stockage (gaz haute pression, hydrures métalliques), de la purification et de la sécurité. Arrivé à échéance, il sera rattaché au second GDR, PACS (piles à combustible et systèmes) qui, avec ses 60 laboratoires, s'intéresse, comme son nom l'indique, aux piles à combustible (basse et haute température) et aux systèmes. En 2014, ils ne feront donc plus qu'un seul et même GDR, baptisé HYSPEC. Il constituera une force de frappe significative en matière de recherche académique avec environ 200 chercheurs à temps plein et couvrira donc l'ensemble de la filière hydrogène en France.

Comme toute règle suppose une exception, l'une des voies de recherche à long terme – la production d'hydrogène d'origine biologique – ne sera pas prise en compte dans ce groupement mais fera l'objet d'un dispositif spécifique : le GDR Biohydrogène. Il étudiera notamment la sélection de souches bactériennes productrices de ce gaz et la mise au point de biocatalyseurs de conversion hydrogène-électricité.

Dans la recherche publique, l'un des acteurs majeurs du secteur est le CEA (qui fera partie du GDR HYSPEC). Ses travaux sont menés principalement au centre CEA de Grenoble, au sein



Centre d'essais de piles à combustible chez Axane.

de l'institut Liten, et pour partie au centre CEA du Ripault, près de Tours. «Axé sur la préindustrialisation, le centre intervient sur de très nombreux sujets, en particulier l'électrolyse, les piles à combustible et le stockage solide (hydrures métalliques). Il privilégie une approche verticale, du matériau au système en passant par les composants», précise Florence Lambert, directrice du Liten. À ceux-là s'ajoute l'ADEME qui ne mène pas de recherche en propre mais, en tant qu'agence d'objectifs, oriente la R&D par le financement des investissements d'avenir dans le domaine de l'énergie et par ses appels à projets. Ceux concernant l'hydrogène et les piles ont pour but de soutenir des recherches industrielles appliquées et des démonstrations afin de permettre un développement vers l'aval de ces technologies, en favorisant le transfert industriel.

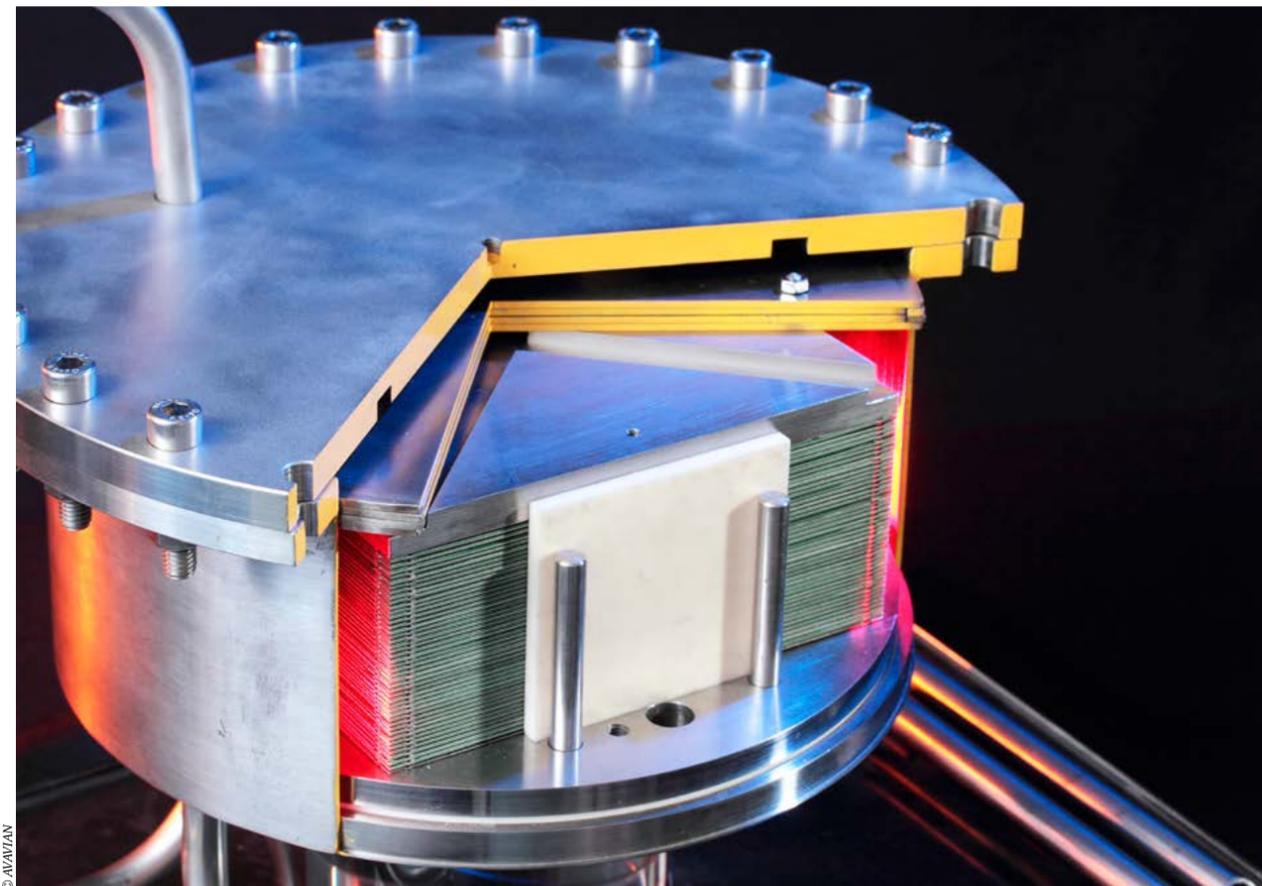
H₂E : UN PROGRAMME DE 200 MILLIONS D'EUROS

Côté industrie, les grands groupes sont aux avant-postes. Air Liquide maîtrise l'ensemble de la chaîne industrielle : production, stockage, distribution et applications. Le groupe propose une gamme large de piles à combustible pour l'alimentation électrique de sites isolés, utilisant une logistique hydrogène haute pression, ainsi que des piles pour les chariots élévateurs à hydrogène. En matière de production, le groupe ambitionne de produire la moitié de son hydrogène-énergie sans rejet de CO₂, notamment à partir d'énergies renouvelables à l'horizon 2020.

Air Liquide pilote le programme Horizon Hydrogène Énergie (H₂E) lancé dès 2008 et fédérant 19 partenaires pour 7 ans. Doté de près de 200 millions d'euros, il travaille sur chacun des maillons de la filière : production d'hydrogène vert, stockage et transport du gaz ainsi que sur l'industrialisation des piles à combustible (www.horizonhydrogeneenergie.com).

GDF Suez se penche, lui, sur deux autres filières : les technologies de pile à combustible comme système performant de cogénération au gaz naturel et le «Power to Gas» ou l'usage du mélange hydrogène gaz naturel pour «verdir» les usages énergie et carburant du gaz naturel et y intégrer une part d'énergies renouvelables, qui sont ainsi transportées dans le réseau et utilisées dans les applications du gaz naturel. Le groupe travaille notamment sur la chaîne énergie renouvelable-électrolyse pour produire l'Hythane® (carburant composé de GNV et de 20% d'hydrogène), la chaîne ENR – électrolyseur-réseau gaz-usages du gaz (dont la production locale d'électricité par pile à combustible) – et enfin la production de méthane de synthèse par méthanation d'hydrogène et de CO₂.

Autre grande entreprise, Areva, via sa filiale Areva Stockage d'Énergie, est en particulier actif dans le domaine des électrolyseurs et piles de puissance pour les applications stationnaires ainsi que sur des unités complètes de stockage et de restitution d'électricité (voir page 13). S'ajoute à ce tableau nombre de PMI et deux pôles de compétitivité voués à l'énergie avec une composante «hydrogène» : Capenergies et Tenerrdis. ■



Électrolyseur à haute température en développement sur le site du CEA Liten.

Les promesses de l'électrolyse haute température

PRODUCTION. Les recherches sur l'électrolyse classique et sur l'électrolyse haute température visent à obtenir un hydrogène bas carbone à un prix compétitif.

Il existe mille et une façons potentielles de produire de l'hydrogène bas carbone ou totalement exempt de carbone. Beaucoup sont en phase de recherche amont au sein du CNRS en particulier : biohydrogène, photocatalyse, photoélectrochimie... D'autres comme l'électrolyse sont plus mûres mais continuent à faire l'objet de recherches intenses. Le défi consiste essentiellement à abaisser le coût du gaz produit par ce moyen. Selon l'origine de l'électricité et la taille de l'installation, il peut être jusqu'à vingt fois

plus cher que celui obtenu par la méthode industrielle de vaporeformage de gaz naturel.

Cela dit, si l'électrolyse ne représente actuellement que 1% de l'hydrogène produit, le développement des nouveaux usages de l'hydrogène – énergie, plus diffus et nécessitant un hydrogène plus pur – favorise le développement de cette technologie.

Pour cela, différentes voies existent. La première est celle de l'amélioration des performances de l'électrolyse classique qui s'effectue à basse température. Traditionnellement, l'électrolyse faisait appel à un électrolyte composé d'une solution alcaline conductrice d'ions (électrolyse alcaline). Pour obtenir de meilleures performances, la recherche, notamment au CNRS, travaille sur la technologie PEM (proton exchange membrane). Elle s'appuie cette fois sur un électrolyte solide à membrane polymère échangeuse de

LE CO₂ DEVIENT MATIÈRE PREMIÈRE...

Les recherches sur la filière « Power to Gas » qui produit du gaz de synthèse à partir d'une réaction H₂-CO₂, peuvent avoir un effet significatif sur la façon de considérer le CO₂. Grâce à ces procédés, il passe de façon inespérée du statut de nuisance à celui de matière première ! Ces procédés ouvrent ainsi la voie au concept de « Captage

et utilisation du CO₂ » (CCU pour Carbon Capture and Utilization, en anglais) en complément de celui de captage et stockage géologique (CCS pour Carbon Capture and Sequestration). De quoi justifier pleinement la récupération du CO₂ pour ces deux filières... sur les unités de production d'hydrogène par vapocraquage notamment.

protons. Cette technologie est particulièrement adaptée à une production décentralisée d'hydrogène (petite taille, proche des usages). Sa souplesse de fonctionnement est en outre compatible avec une source d'électricité fluctuante et intermittente telles les EnR.

« La technologie des membranes est aujourd'hui assez bien maîtrisée, la recherche s'intéresse principalement aux matériaux utilisés pour les électrodes afin d'améliorer ses performances », indique Gérald Pourcelly, directeur du Groupement de recherche PACS du CNRS. Des avancées, enfin, sont également attendues non plus de la technologie, mais... de la simple production en grande série des électrolyseurs. Le CEA estime que, dans l'hypothèse d'une usine de production massive utilisant des électrolyseurs à coût réduit par l'industrialisation, le prix de l'hydrogène pourrait diminuer jusqu'à environ 3 €/kg avec une électricité à 40 €/MWh.

DES RENDEMENTS PLUS ÉLEVÉS

Plus en rupture est la seconde voie étudiée pour doper l'électrolyse : la recherche menée sur l'électrolyse haute température (EHT). Une température élevée permet en effet de réaliser la dissociation de l'eau avec un bien meilleur rendement énergétique que l'électrolyse classique. Les électrolyseurs à haute température, qui utilisent un électrolyte en oxyde solide, procurent ainsi des rendements significativement plus élevés que celui de leurs équivalents à basse température.

En outre, comme la quantité d'énergie électrique à fournir diminue à mesure que la température augmente, le coût de l'électrolyse est significativement abaissé. L'électricité constitue 80 % du coût de l'hydrogène produit par les procédés actuels.

En France, le CEA travaille l'EHT à des températures comprises entre 700 °C et 800 °C. Une partie de l'énergie

nécessaire à la réaction est apportée par de la chaleur, sous forme de vapeur d'eau, d'où l'autre appellation du procédé : électrolyse de la vapeur d'eau à haute température ou EVHT. L'un des intérêts de l'EVHT est de pouvoir être réalisé avec des sources de chaleur aussi peu élevées que 200 °C car la réaction d'électrolyse dégage de la chaleur qui peut être récupérée en sortie de procédé et utilisée pour préchauffer la vapeur d'eau en entrée.

L'objectif du CEA est d'approcher un coût de 2,50 €/kg pour l'hydrogène produit par EVHT, ce qui suppose des installations de grande taille et une électricité à un prix de 40 €/MWh, typiquement dans le cadre d'une installation adossée à une centrale nucléaire. Ce prix serait alors compétitif avec celui obtenu à partir des énergies fossiles. Des études récentes montrent que cette cible est atteignable avec les solutions expérimentales actuellement testées.

DU MÉTHANE DE SYNTHÈSE À PARTIR D'H₂

L'intérêt du procédé pourrait ne pas se limiter aux grands sites de production et prendre sa place dans des petites installations utilisant les énergies renouvelables. De quoi changer la donne pour l'énergie produite par l'éolien ou le solaire à des fins de stockage, qui s'appuie aujourd'hui exclusivement sur des électrolyseurs basse température.

En matière d'EHT, les enjeux de la recherche portent sur la mise au point de dispositifs robustes sur la longue durée, ce qui passe en particulier par le développement de matériaux tels que les céramiques, capables de supporter les contraintes dues à une température de fonctionnement qui atteint les 800 °C. Après avoir testé depuis 2011 un premier électrolyseur haute température, le CEA a mis en place cette année un autre démonstrateur d'une puissance de 5 kW. Son objectif est de produire des appareils en petite série d'ici deux à trois ans.

L'autre grand domaine de recherche, concernant cette fois l'utilisation de l'hydrogène, est lié au « Power to Gas », autrement dit à la production de méthane de synthèse (GNS) via l'hydrogène obtenu par électrolyse. « Tous les procédés consistent d'une manière ou d'une autre à faire réagir de l'hydrogène, obtenu par électrolyse de l'eau, avec du CO₂ ou du CO », explique Jean-Paul Reich, directeur scientifique à GDF Suez. La classique méthanation, procédé qui consiste à faire réagir l'hydrogène avec du CO₂ au sein d'un réacteur, est mûre mais ses performances sont limitées. Elle peut toutefois encore progresser via l'amélioration des réacteurs et en tirant profit de l'EHT. Le procédé est en effet exothermique, et la chaleur produite peut être utilisée pour l'électrolyse. En outre, estime Jean-Paul Reich, « la méthanation se marie très bien avec les productions d'électricité à faible coût marginal, intermittentes, telles que l'éolien ou le solaire, mais aussi avec celles peu flexibles comme le nucléaire ».

Deux autres technologies sont explorées, comme celle qui consiste à effectuer une coélectrolyse de vapeur d'eau et de CO₂ à haute température (850 °C) pour obtenir du syngas (CO + H₂) puis du GNS. Le CEA s'y intéresse en France. Le Danemark (laboratoire Risoe) et les États-Unis également (Idaho National Laboratory). ■

Deux filières vedettes

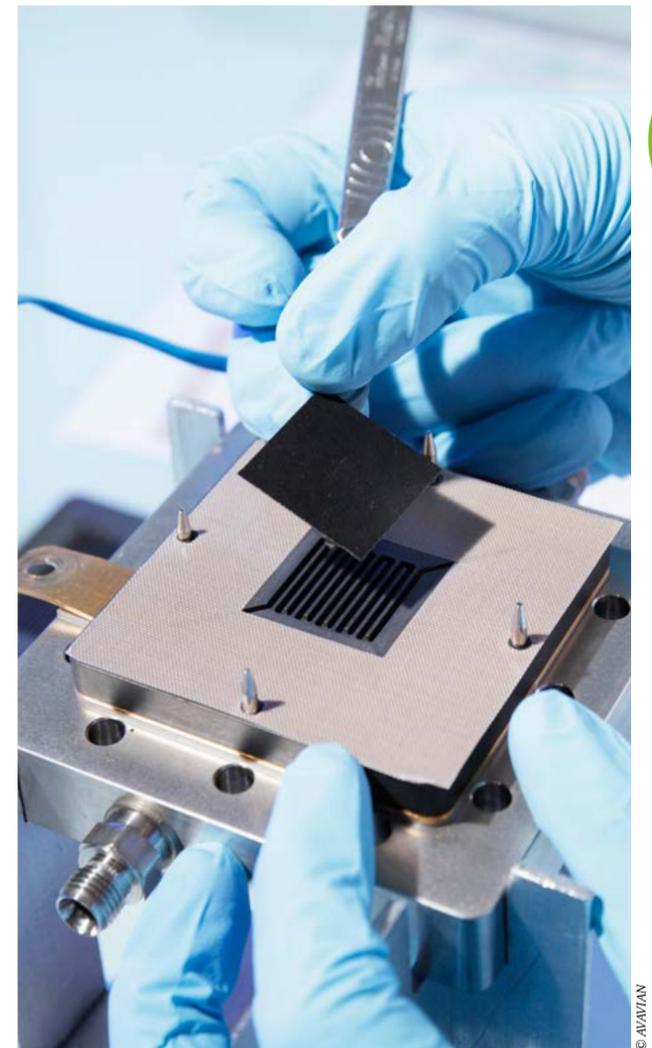
PILES À COMBUSTIBLE. Les technologies de piles à membrane échangeuses de protons, pour les applications liées à la mobilité, et de piles à oxyde solide, pour les applications stationnaires, sont privilégiées pour le futur.

La pile à combustible est l'exact inverse de l'électrolyseur. Au lieu d'utiliser l'électricité pour produire de l'hydrogène et de l'oxygène, elle produit de l'électricité au point d'utilisation, en recombinaison des deux gaz et ne rejette que de l'eau (et de la chaleur). Parmi les nombreuses technologies utilisées pour mettre au point des piles à combustible, la feuille de route Hydrogène-Energie et Piles à combustible de l'ADEME a identifié deux technologies prioritaires, même si l'Agence considère que « les autres technologies à moyennes et hautes températures sont à prendre en considération afin de préparer et d'anticiper les problèmes technico-socio-économiques d'utilisation en conditions réelles ».

MOINS DE PLATINE

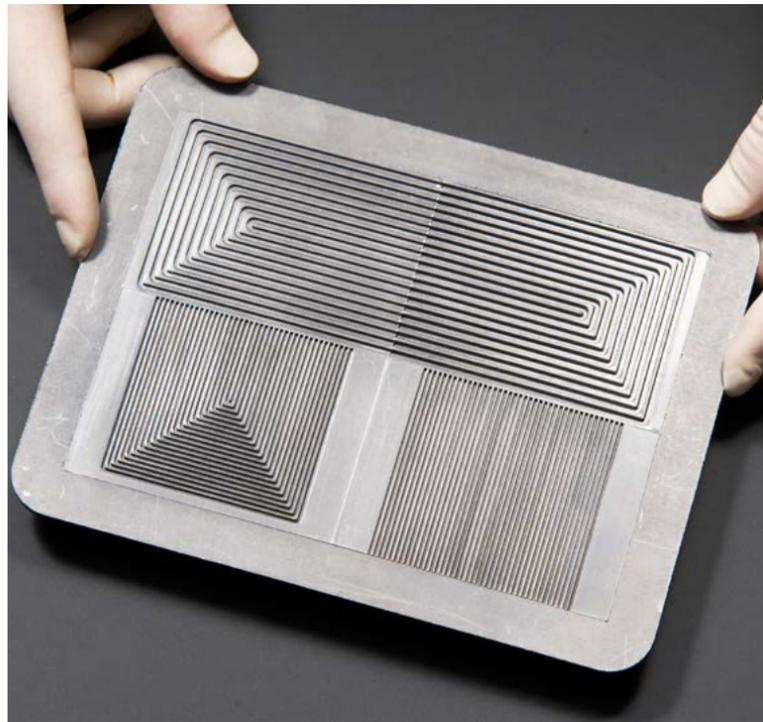
Les technologies retenues sont, *mutatis mutandis*, les mêmes que celles qui motivent la recherche dans le domaine de l'électrolyse. D'une part, les piles PEM (ou encore PEMFC pour Proton Exchange Membrane Fuel Cell) proches des électrolyseurs PEM sont compactes et travaillent à basse température (environ 80 °C) ce qui les destine aux applications liées à la mobilité, en particulier terrestre. La seconde technologie en lice utilise un oxyde solide et donne naissance aux SOFC (Solid Oxide Fuel Cell). De même que les électrolyseurs faisant appel à cette technologie, ces piles fonctionnent à haute température (de 700 à 1 000 °C) et se destinent aux applications stationnaires comme la cogénération.

La technologie PEMFC est d'ores et déjà mature avec plusieurs produits commercialisés (notamment par SymbioFCell avec une technologie issue du CEA ou par Air Liquide via sa filiale Axane, spécialisée sur la pile à combustible, et HyPulsion, coentreprise détenue à 80 % par Axane et à 20 % par Plug Power). Elle fait cependant encore l'objet de nombreuses recherches et travaux d'optimisation. Premier enjeu, diminuer son coût qui est notamment dû à l'utilisation de platine comme catalyseur (l'anode et la cathode). Le métal précieux est responsable de 15 à 25 % du coût d'un « cœur » de pile (membrane et électrodes) et de près de 15 % de celui d'une pile PEM complète. Diverses solutions, dont la nanostructuration du métal, sont étudiées pour réduire la charge en platine sans perte notable de performances électrochimiques. Aujourd'hui, l'état de l'art se situe à 0,7-0,8 W/cm² avec 0,6 mg de platine par cm². Le cahier des charges des industriels de l'automobile vise 1 W/cm² avec le moins de platine possible (idéalement



Test de pile à combustible au CEA.

0,1-0,2 g/kW). Autre voie d'amélioration, la montée en température : « Passer d'un fonctionnement à 80 °C pour atteindre 120 °C permettrait d'une part d'utiliser de l'hydrogène de moins grande pureté dans la pile mais également de diminuer la quantité de platine dans les piles », souligne Gérald Pourcelly du CNRS. L'augmentation de la température permettrait en outre d'améliorer les performances et de réduire encore la taille du système. Pour atteindre 120 °C dans un premier temps (puis idéalement 180, voire 200 °C) l'obstacle technologique à franchir se situe au niveau du matériau de la membrane. Le Nafion® (résine échangeuse d'ions fluorée) actuellement utilisé ne doit en effet pas excéder le seuil fatidique des 80 °C sous peine de



À gauche : presse industrielle permettant de fabriquer des plaques bipolaires. À droite : plaque bipolaire (composant de pile).

perdre ses propriétés. L'automatisation des process de production est également une solution pour abaisser le coût des piles. Côté industrialisation, le CEA Liten a installé il y a un an une ligne pilote capable de produire des électrodes au rythme de 200 par heure. Il lancera d'ici à la fin de l'année une autre ligne pilote : pour les piles cette fois (emboutissage et assemblage de plaques). Objectif : la production d'une pile de quelques dizaines de kW par jour.

DES CÉRAMIQUES POUR LES HAUTES TEMPÉRATURES

Les PEMFC sont, au-delà de la mobilité terrestre, bien adaptées aux installations stationnaires de niches, comme l'alimentation de sites isolés ou la sauvegarde d'installations critiques. Elles constituent aussi la technologie de choix pour les appareils nomades (téléphones, ordinateurs...). Paxitech ou Pragma Industries, notamment, en proposent déjà en France pour des puissances de deux à quelques dizaines de watts. Par rapport aux batteries lithium, la pile à combustible présente l'intérêt d'être nettement plus légère, divisant le poids par un facteur trois. Pour cette raison, la Délégation générale de l'armement (DGA) étudie son usage en remplacement des batteries dans l'équipement du fantassin dans le cadre de son programme FELIN (Fantassins à équipements et liaisons intégrés). Le système prototype utilise une technologie de piles du CEA Liten et un système d'alimentation très original développé par Bic. La recharge en hydrogène provient d'une petite cartouche de 300 g contenant du borohydrure de sodium. Il suffit d'y adjoindre de l'eau pour disposer d'hydrogène fournissant 120 Wh d'électricité. Un vélo à pile à combustible utilisera d'ailleurs cette source d'hydro-

gène (voir Innovation page 14). Contrairement aux PEMFC, les SOFC (Solid Oxide Fuel Cell) sont au stade de la recherche et commencent seulement à être disponibles sur le marché. Leur choix pour les applications stationnaires s'explique par leurs nombreux atouts. Elles fonctionnent avec des composés carbonés ce qui libère de l'utilisation d'hydrogène de grande pureté et ouvre accès au gaz naturel du réseau. Ensuite elles offrent un excellent rendement électrique (supérieur à 50%) ainsi qu'un très bon rendement thermique. Cela les rend particulièrement bien adaptées aux applications de cogénération, que ce soit pour le chauffage des bâtiments, de l'eau ou pour la production d'électricité.

Les technologies des piles et des électrolyseurs haute température à oxyde solide étant très proches, les recherches menées portent dans les deux cas sur les mêmes thèmes : utilisation de matériaux aptes à supporter les hautes températures de fonctionnement, comme les céramiques, afin d'améliorer leur durée de vie ; capacité à utiliser d'autres gaz que l'hydrogène, comme le gaz naturel ou le biogaz issu de la biomasse (mélange CH₄/CO₂). L'usage du biogaz pour alimenter les SOFC est en particulier étudié dans le cadre du projet Pile-eau-biogaz de l'Agence nationale de la recherche (ANR), un projet réunissant notamment le CNRS, le CEA, GDF Suez et Suez Environnement. Parmi les défis : concevoir des matériaux d'anodes tolérants aux nombreuses impuretés présentes dans le biogaz (H₂S, composés halogénés et silicés) ainsi que des techniques d'épuration et de conditionnement de ce gaz.

La problématique de la tenue des matériaux et du système aux différents cyclages (arrêt/démarrage) est également au cœur des travaux de recherche menés par les acteurs. ■

Le stockage « solide » dans les starting-blocks

STOCKAGE ET DISTRIBUTION. Alternative séduisante au stockage sous haute pression, la solution basée sur les hydrures métalliques doit encore abaisser son coût et diminuer le poids des réservoirs.

Ne songez pas à faire le plein d'hydrogène à pression atmosphérique. Il est si léger que pour embarquer 4 kg de ce gaz dans une voiture, soit la quantité nécessaire pour parcourir 400 km, il faudrait un réservoir de 45 000 litres ! La recherche s'attaque donc à toutes les voies possibles pour surmonter cet important handicap. La liquéfaction est pratiquée à l'échelle industrielle, mais il faut maintenir l'hydrogène à -253 °C pour qu'il reste liquide à température ambiante, ce qui rend sa mise en œuvre pour le domaine automobile extrêmement difficile.

L'hydrogène liquide est principalement utilisé dans les applications spatiales et électroniques. Reste la traditionnelle voie de la compression et une méthode beaucoup plus originale : le stockage à relativement basse pression dans des hydrures métalliques, encore appelé stockage solide.

Le stockage et le transport dans des bouteilles ou réservoirs à une pression de 350 bars est une solution pour certaines applications ne nécessitant pas de compacité forte, telles les flottes d'autobus. Pour les applications dans l'automobile particulière, cette compacité pourrait cependant ne pas être suffisante si l'on recherche des autonomies longues des véhicules.

DES BOUTEILLES D'HYDROGÈNE EN MATÉRIAUX COMPOSITES

Aussi la recherche a-t-elle développé plus récemment des bouteilles où le gaz est stocké à 700 bar. Ces réservoirs équipent les quelques centaines de véhicules à pile à combustible en circulation dans le monde. Ces bouteilles sont intégralement en matériaux composites liner en polyuréthane, polyéthylène ou polyamide réalisés à partir de tubes, extrudé soufflé ou roto-moulé et la coque est bobinée en fibre de carbone. Elles offrent de quoi envisager, avec les technologies actuelles, une autonomie de plus de 500 km

pour une voiture dotée de trois réservoirs compacts d'environ 35 litres, soit quelque 4,5 kg d'hydrogène. L'enjeu de la recherche est d'améliorer significativement les performances de ce stockage, autrement dit de réduire encore le poids du réservoir. « Il faut aujourd'hui un réservoir de 100 kg pour stocker 6 kg d'hydrogène, soit un rapport de masse de 6 %. L'objectif est d'atteindre les 9 % à l'horizon 2025 », précise Gérald Pourcelly, directeur de GDR Pacs.

DES ÉPONGES À HYDROGÈNE

Cela dit, un autre sujet qui mobilise actuellement la recherche, aussi bien au CNRS qu'au CEA ou dans l'industrie, est le stockage solide. La technologie exploite la capacité de certains matériaux, les hydrures, à absorber et désorber de l'hydrogène de manière réversible. Ces métaux (alliage de nickel, de titane, de magnésium...) se présentent sous forme de poudre vers laquelle les atomes d'hydrogène migrent naturellement. Ces véritables « éponges à hydrogène » constituent la solution la plus efficace pour obtenir une forte densité volumique d'énergie. Inconvénients : le poids élevé résultant de l'utilisation de métal et la nécessité d'apporter de la chaleur pour libérer l'hydrogène, ainsi que la nécessité d'utiliser des catalyseurs pour accélérer les cinétiques de désorption.

Le poids élevé de ces réservoirs conduit à privilégier leur usage dans les applications stationnaires, en particulier le stockage de gaz obtenu par les énergies renouvelables. La société McPhy Energy en partenariat avec le CEA a mis au point des réservoirs utilisant des hydrures de magnésium sous une pression de 10 bars, qui libèrent l'hydrogène à un peu plus de 300 °C. McPhy Energy produit déjà ces réservoirs et va installer un système complet en Corse sur la plate-forme MYRTE. Il est capable de stocker 24 kg d'hydrogène (soit 800 kW) obtenu à partir d'électricité photovoltaïque. La PMI de Grenoble, spécialiste du stockage solide, participe également à plusieurs projets dont l'un où un couple électrolyseur-stockage solide sera utilisé pour assurer la continuité d'une activité industrielle. Le premier démonstrateur vient d'être installé dans sa propre usine. Avec un stockage solide d'hydrogène de 100 kg, l'installation alimentera également le four servant à fabriquer ses hydrures métalliques.



© AVAVIAN

En la matière, les voies de progrès passent par la baisse des coûts des hydrures métalliques développés initialement pour des applications métallurgiques de pointe. Le CEA s'attache ainsi à développer une filière industrielle de production à bas coût.

EN QUÊTE DE NOUVEAUX HYDRURES

L'autre défi consiste à réduire le poids et à abaisser la température de fonctionnement afin, notamment, d'ouvrir au procédé les applications embarquées. Dans les laboratoires, les chercheurs sont ainsi aujourd'hui en quête de nouveaux hydrures métalliques. Parmi les candidats, ceux à base d'aluminium, qui relâchent l'hydrogène à environ 100 °C. Mais ils mettent en jeu une réaction chimique pointue et n'offrent qu'une capacité de stockage modeste. Quant aux alliages de terres rares et de nickel, ou ceux à base de titane et de vanadium, ils possèdent l'énorme avantage d'être utilisables à la température ambiante mais recèlent un inconvénient majeur : le rapport entre leur masse et la quantité d'hydrogène est très faible.

Pour aller plus loin encore, certains chercheurs tentent même de développer des hydrures fonctionnant à une température négative en utilisant des composés prometteurs, tel celui comportant du titane, du chrome et du manganèse.

Une autre piste plus prospective est explorée. Elle exploite la capacité de l'hydrogène à se fixer par des liaisons chimiques à des matériaux poreux à base de carbone, tels les charbons actifs, les nanotubes de carbone, le graphène ou encore les MOF (Metal Organic Frameworks, des maté-

riaux hybrides organiques-inorganiques). Atout : il est alors assez facile, en réchauffant le matériau, de libérer à nouveau l'hydrogène. Seul problème, mais de taille : le mécanisme a lieu à des températures très basses, de l'ordre de -190 °C. ■

POUR LA DISTRIBUTION AUSSI

Suite logique du stockage, la distribution. Celle de l'hydrogène s'effectue aujourd'hui, selon les volumes mis en jeu, soit par pipeline, soit par camions ou par bouteilles sous pression. Les hydrures métalliques constituent une nouvelle solution. Témoin la récente entrée d'Air Liquide au capital de la start-up australienne Hydrexia, spécialiste de cette technologie. Pour l'entreprise française, au-delà de son aspect

innovant, c'est bien la meilleure compétitivité présumée de cette technologie qui devrait lui permettre de concurrencer les procédés de stockage existants. Une évolution qui n'empêche pas la recherche de s'intéresser à la problématique des gazoducs, notamment sous des aspects d'amélioration des techniques de soudage, du choix des matériaux ainsi que des procédés d'inspection et de détection de fuite.



Allemagne, ville de Düsseldorf.
Station hydrogène Air Liquide
accessible au grand public
pour les voitures particulières.

© AIR LIQUIDE

AUTOMOBILE

Une hybride... 100 % électrique



Une pile plus une batterie...

© MIA ELECTRIC

Pour compenser l'autonomie limitée

d'un véhicule mu par une batterie par un dispositif lui permettant d'élargir son domaine d'action, pourquoi ne pas avoir recours à la pile à combustible en lieu

et place d'un moteur thermique ? On obtiendrait ainsi un hybride 100 % électrique ! C'est le choix fait par le constructeur de petites voitures électriques Mia Electric. Installée à Cerizay (Deux-Sèvres), l'entreprise a été rachetée en juin dernier par Focus Asia, un groupe d'investisseurs franco-coréens. Elle a doté son véhicule d'une pile à combustible fournie justement par Magnum, société qui participe à Focus Asia et qui travaille avec Mia Electric

depuis sa création en juillet 2010. La petite voiture est dérivée des modèles de Mia. Encore sous forme de prototype, elle embarque une pile de quelque 60 kg qui s'ajoute à la

batterie de 60 kg également. Au total : un poids sensiblement équivalent à celui du véhicule électrique à batterie du constructeur, mais le système pile + batterie occupant un volume plus faible. En profitant du complément de la pile à combustible, le modèle en développement chez Mia possède une autonomie de 300 km. « Il sera facile de doubler ce chiffre par la suite, il suffit d'installer un réservoir d'hydrogène plus volumineux », souligne Patrick Largeau, directeur R & D de l'entreprise. Dans un premier temps, le véhicule qui sortira du site de Cerizay sera préférentiellement destiné à des applications professionnelles. Celles qui ont la possibilité de disposer facilement d'une source d'hydrogène et ont besoin d'une grande disponibilité – de 10 à 16 heures par jour – de leur voiture, pour des livraisons, par exemple.

STOCKAGE ET PRODUCTION

Une solution « tout en un »

La Greenenergy Box a été mise au point par la filiale Stockage de l'énergie d'Areva dans le cadre du programme Horizon Hydrogène Énergie (voir page 6). Cette solution associe un électrolyseur, un système de stockage d'hydrogène et d'oxygène et une pile à combustible. Elle permet ainsi la production d'hydrogène et d'oxygène par électrolyse, la production d'énergie électrique et thermique grâce à la pile à combustible et, simultanément, le stockage énergétique de longue durée. Modulaire, elle offre une gamme de puissance de 20 kW à 100 kW. D'un poids de 6 tonnes, la Greenenergy Box se destine en particulier aux applications de stockage de l'énergie excédentaire produite par les énergies renouvelables. Elle constitue également une solution pour les régions, telles que les îles, où l'approvisionnement électrique est complexe.

La sécurisation du réseau national et une gestion énergétique décentralisée de type microquartiers figurent également parmi ses domaines d'utilisation. Deux premières installations de ce système sont prévues en 2013. La première concerne le site du projet MYRTE en Corse, où l'hydrogène est produit à partir d'énergie photovoltaïque. Une Greenenergy Box de 50 kW en pile et 13 Nm³/h en électrolyse (65 kW) amènera l'installation à sa

puissance nominale de 150 kW. Le second site se trouve à La Croix-Valmer (Var). Alimenté par les panneaux solaires (35 kWc) d'un bâtiment public, le système permettra le stockage de l'énergie puis la production d'eau chaude grâce à la récupération de la chaleur produite par l'appareil. Il se justifie également par le fait que la commune est située en bout de ligne dans une zone où le réseau est sous fortes contraintes.



Greenenergy Box, une solution « tout en un » : électrolyseur, stockage d'H₂ et d'O₂, et pile à combustible.

© AREVA

STOCKAGE

100 kg d'hydrogène dans du métal

Le système de stockage d'hydrogène de McPhy Energy a été développé à partir des travaux du CNRS valorisés par le CEA. Il utilise la capacité des hydrures métalliques à absorber et à relarguer une grande quantité d'hydrogène gazeux. Le système HDS-100-S, breveté par McPhy Energy, est ainsi capable de stocker 100 kg d'hydrogène. Le dispositif, d'un poids de 11,5 tonnes, se présente sous la forme d'un parallélépipède de 6,06 x 2,44 x 2,70 m. L'hydrogène est chargé à une pression de 10 bars dans les réservoirs contenant plusieurs centaines de disques en hydrure de magnésium. L'opération dure 24 heures pour un remplissage complet. La récupération de l'hydrogène, opération qui prend également 24 heures pour être effectuée complètement, s'effectue à la pression de 4 bars. À ce jour, outre celui qui est utilisé sur son site



Remplissage en 24 heures.

© MCPHY ENERGY

de production, la société McPhy Energy s'appête à installer cinq dispositifs de stockage de ce type, dont l'un en Corse, dans le cadre du programme MYRTE. Il y sera utilisé pour recueillir l'hydrogène obtenu à partir d'un électrolyseur alimenté en électricité par des panneaux photovoltaïques. En plus de cette application de stockage lié aux

énergies intermittentes, un tel système se destine à stocker l'hydrogène utilisé par l'industrie (chimie, verrerie, alimentaire, sidérurgie, pétrochimie...), aux applications de type Power to Gas (injection d'hydrogène dans le réseau de gaz naturel) ainsi qu'aux stations de remplissage en hydrogène destinées à tout type de véhicules.

MOBILITÉ

Vélo électrique à pile à combustible

Il sera commercialisé dès 2015 sous la marque Gitane. L'Alter Bike est un vélo électrique comprenant une batterie lithium ion et une pile à combustible. Il a été conçu par Cycleurope, premier fabricant européen de vélo, Pragma Industries, producteur de piles à combustible de

faible puissance, et Ventec, spécialiste de la régulation des batteries. La pile à combustible conçue et fabriquée par Pragma Industries offre une puissance de 60W. Très légère, elle permet à la fois de diminuer le poids du système d'alimentation électrique et d'offrir une autonomie accrue au vélo. Le couple batterie lithium-pile à combustible trouve une autre justification. La batterie permet en effet de délivrer des pics de courant plus rapidement qu'une pile, tandis que la seconde permet à l'utilisateur de recharger très rapidement son véhicule en faisant le plein d'hydrogène. La recharge en hydrogène s'effectue à l'aide d'un système de cartouches

recyclables. Ces petites cartouches de 300 grammes contiennent du borohydrure de sodium qui produit de l'hydrogène par simple adjonction d'eau. S'il n'y a pour l'instant pas d'annonce de date de commercialisation de ces cartouches pour le grand public, on peut imaginer qu'elle débutera avec la mise sur le marché du vélo. Ce dernier devrait être vendu à un prix comparable à celui des cycles électriques dotés d'une simple batterie, soit aux environs de 2 500 euros. Il se vend actuellement environ un million de vélos électriques par an en Europe. Pragma Industries est confiant dans sa capacité à fournir des piles en quantité sur ce marché. Il installe actuellement une ligne pilote automatisée capable de produire 50 000 piles par an.



Le vélo Cycleurope équipé d'une pile à combustible.

© PRAGMA INDUSTRIES

STOCKAGE

H₂ facile à transporter sur site

Dans le cadre du programme innovation Horizon Hydrogène Énergie (H₂E, voir page 6), Air Liquide et ses partenaires dont Composites Aquitaine et IMF ont mis au point un nouveau système de stockage d'hydrogène ainsi que la logistique qui l'accompagne. Il utilise des bouteilles de 142 litres en matériaux composites dans lesquelles le gaz est stocké à la pression de 525 bars, dans une première phase, puis 700 bars, en seconde génération. Pour le transport et l'utilisation sur site de l'hydrogène, Air Liquide a également développé autour de ces bouteilles un cadre regroupant quatre réservoirs d'hydrogène à 525 bars. D'un poids de 650 kg, il contient 20 kg d'hydrogène à 525 bars et 23 kg à 700 bars. Les cadres actuellement en cours de validation possèdent un transmetteur de pression intelligent, sans fil ni pile, qui permet de visualiser à distance la pression interne des réservoirs, un fusible thermique libérant progressivement la pression dans les réservoirs lorsqu'ils sont soumis à un feu extérieur. Le robinet de

détente intégré au cadre permet non seulement de détendre le gaz à la pression d'utilisation, évitant ainsi toute exposition des utilisateurs à la haute pression, mais aussi un sectionnement d'urgence automatique de l'arrivée d'hydrogène piloté à distance. Avec ses quatre bouteilles et sa forme cubique, le dispositif facilite le transport de l'hydrogène et offre une grande autonomie d'utilisation du gaz sur site. Il dispose du marquage

PI lié aux équipements sous pression transportables. Ce cadre permettra de fournir de l'hydrogène à des piles à combustible utilisées pour l'alimentation de sites isolés (antenne télécom...) ou l'alimentation de secours pour garantir la disponibilité d'électricité en cas de coupure réseau, notamment pour des équipements critiques pour la santé ou la sécurité, tels que les sites nucléaires, les centres de données, les sites militaires, les hôpitaux.



4 bouteilles à 525 bars dans un cube.

© AIR LIQUIDE/PHYDESIGN

INGÉNIERIE

Autonomie énergétique clés en main

Ingénieur et fabricant, Ataway étudie, conçoit et assemble des éléments constituant une solution complète d'autonomie énergétique utilisant les énergies renouvelables : soleil, eau ou vent. Le système mis en œuvre par la PMI savoyarde est réalisé sur mesure en fonction des besoins spécifiques des sites. Il est réalisé à partir de quatre éléments de base : un électrolyseur (technologie alcaline), conçu et fabriqué par l'entreprise et un partenaire, pour produire l'hydrogène ; un ensemble

de batteries au plomb pour le stockage de courte durée de l'électricité (typiquement jour-nuit) ; un système de stockage solide d'hydrogène s'appuyant sur les produits à base d'hydrures métalliques de McPhy Energy ; enfin, une pile à combustible de technologie PEM, issue de différents fournisseurs, pour transformer l'hydrogène en électricité. Le tout est complété par des équipements de conversion de puissance et des logiciels de contrôle commande.

Le système se destine en premier lieu aux installations en site isolé (relais télécom, stations météo...) mais également aux sites raccordés à un réseau électrique défaillant. Deux familles de produits sont proposées par Ataway. La première réunit les différents éléments pour fournir une solution dans une gamme d'énergie de 1 à 4 MWh. Une autre configuration adresse des besoins en énergie s'étendant de 4 à 20 MWh. Deux installations sont prévues l'année prochaine, l'une d'1 MWh, la seconde de 8 MWh.

PILES À COMBUSTIBLE

Des prolongateurs d'autonomie pour véhicules

SymbioFCCell fabrique une gamme de piles à combustible PEM (Proton Exchange Membrane) conçues à partir d'une technologie du CEA Liten. Parmi ses produits, les plus puissants atteignent 300 kW et se destinent notamment à des camions, véhicules industriels, voire bateaux (un projet avec les Bateaux-Mouches de Paris vient justement de commencer). L'entreprise propose une série de systèmes piles d'une puissance de 5 à 300 kW basées sur des modules de 5 kW ou 20 kW. Ces « prolongateurs d'autonomie » sont destinés à accroître l'autonomie des voitures électriques à usage commercial. Ils sont utilisés pour recharger les batteries du véhicule

électrique grâce à l'hydrogène stocké dans un réservoir sous pression. La chaleur fournie par la pile permet également le chauffage du véhicule. Les piles à combustible sont dotées d'un bus CAN, d'interfaces électriques et d'un logiciel de maintenance. SymbioFCCell a notamment adapté ce système à un Renault Kangoo ZE. Grâce à sa pile de 5 kW, ce véhicule utilitaire léger, baptisé HyKangoo, double son autonomie : elle passe de 160 km avec la seule batterie à 320 km. Le véhicule embarque juste 1,2 kg d'hydrogène dans des bouteilles à 350 bars et consomme en moyenne



HyKangoo par Symbio FCell, Kangoo ZE Renault équipé d'un prolongateur d'autonomie H₂.

0,3 kg d'hydrogène à l'heure. Le chauffage s'effectuant par récupération de chaleur de la pile, son utilisation n'a aucune influence sur l'autonomie du véhicule.

ÉLECTROLYSEURS

Grande puissance pour technologie PEM



Électrolyseur de 24 Nm³/h destiné à une centrale électrique.

production d'hydrogène et d'oxygène, et réalise également l'isolation électrique des électrodes. Ces électrolyseurs modulaires sont construits à partir de « stacks » de 5 Nm³/h, 10 Nm³/h ou 15 Nm³/h. Ainsi, en assemblant quatre unités de 15 Nm³/h au sein d'un même appareil. CETH₂ produit des électrolyseurs permettant de générer jusqu'à 60 Nm³/h d'hydrogène. Cette production peut très bien être constante et continue 24h sur 24h. En assemblant en grappe de quatre ces électrolyseurs de grande puissance, contrôlés par un automate programmable, CETH₂ offre également la possibilité de disposer de très grande capacité proposant jusqu'à 240 Nm³/h, soit plus de 20 kg d'hydrogène par heure. Enfin, les gaz produits par ces électrolyseurs sont d'une grande pureté qui atteint 99,999 % pour l'hydrogène et 99,5 % pour l'oxygène.

CETH₂ produit une gamme d'électrolyseurs faisant appel à la technologie PEM (Proton Exchange Membrane). Dans cette technologie, les cellules d'électrolyse sont

constituées d'une membrane polymère solide qui permet la conduction des protons au travers de la membrane. Étanche au gaz, elle assure une parfaite séparation de la