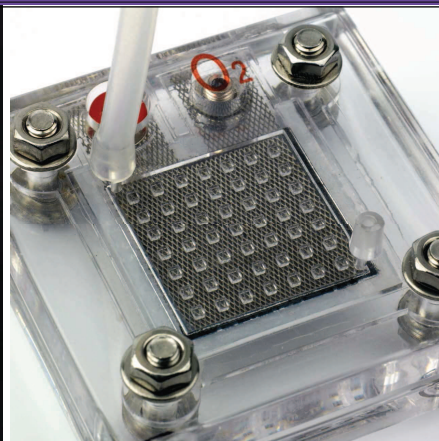
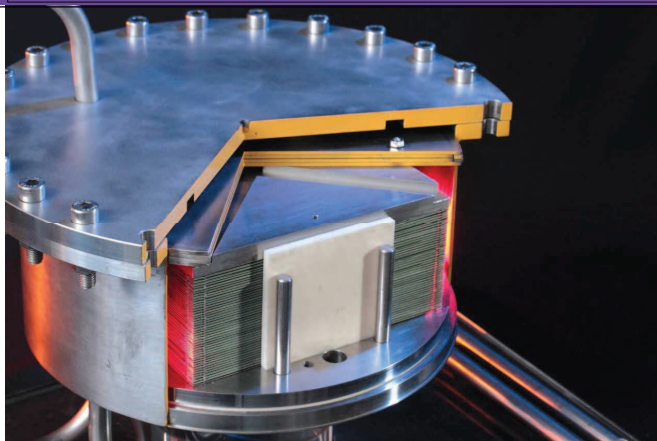




énergie atomique • énergies alternatives

DOSSIER DE PRESSE



Les technologies de l'hydrogène au CEA

mai 2012

CONTACT PRESSE : CEA / Service Information-Média

Stéphane LAVEISSIERE Tél. : 01 64 50 27 53 - stephane.laveissiere@cea.fr

CEA Saclay / Siège
Direction de la Communication
Service Information-Média
91191 Gif-sur-Yvette Cedex
Tél. : (33) 01 64 50 20 11
Fax : (33) 01 64 50 28 92
www.cea.fr/presse

Sommaire :

Les technologies de l'hydrogène au CEA

3 Introduction

4 Produire l'hydrogène pour équilibrer offre et demande d'énergie

Encadré : La production d'hydrogène aujourd'hui

1- Développer des technologies de production décarbonée d'hydrogène

5 Encadré : Arrêt de la R&D sur les cycles thermochimiques)

Objectifs pour l'électrolyse : rendement énergétique et coût

6 Le CEA privilégie l'électrolyse haute température (EHT)

7 Développer les matériaux pour l'électrolyse à haute température

Résultats récents

8 Encadré : le prix de l'hydrogène

2- Une opportunité : accompagner les productions décentralisées d'électricité (renouvelable)

9 Première démonstration sur la plateforme MYRTE

10 Le projet PUSHY, ou l'ambition d'un hydrogène vert rentable

Accompagner les projets par des études technico-économiques

11 Une nouvelle idée : l'hydrogène pour recycler le CO₂ (concept « *power to gas* »)

12 L'hydrogène carburant : la R&D du CEA sur les piles à combustible (PAC)

Encadré : Au niveau international : des piles à combustible compétitives

1- La R&D du CEA sur les piles à combustible pour applications transport

14 Les axes d'amélioration des piles de type PEMFC

15 Le CEA dans une perspective de pré-industrialisation

Encadré : Un exemple d'intégration des technologies pour un marché de niche : le voilier Zéro CO₂

16 2- Les travaux sur les piles de type SOFC pour les applications stationnaires

18 Stocker l'hydrogène, une fonction à maîtriser pour tous les « systèmes » hydrogène

1- Le stockage solide dans des « hydrures », privilégié pour les applications stationnaires

19 Les premières démonstrations pré-industrielles

20 2- Les technologies de stockage embarqué

Le stockage gazeux sous pression

21 Le stockage liquide

Le stockage solide dans des hydrures

22 ANNEXES :

23 Principe de fonctionnement d'un électrolyseur

24 Principe de fonctionnement d'une pile à combustible

Images de couverture :

A gauche : électrolyseur Haute Température développé au CEA-Liten. © P.Avavian/CEA

A droite : membrane de pile à combustible à faible chargement en platine. © P-F.Grosjean/CEA

Introduction

Longtemps, les recherches du CEA et des autres organismes de recherche ou industriels impliqués ont tendu vers le développement de la voiture à hydrogène, équipée d'une pile à combustible (PAC). Les technologies de la voiture à hydrogène deviennent matures, mais nécessitent des infrastructures encore difficiles à mettre en place.

Surtout, l'intérêt de l'hydrogène comme carburant propre demeure contraint par ses modes de production, encore liés en grande majorité aux énergies fossiles.

La stratégie du CEA se concentre davantage sur la pré-industrialisation de différentes briques technologiques, avec l'idée que chaque expérimentation permet une meilleure qualification des systèmes.

Deux grands domaines d'applications sont visés :

- Production de l'hydrogène par les énergies renouvelables (ENR), pour alimenter les usages industriels et comme moyen de stockage de l'électricité et d'équilibrage des réseaux. Accompagnant la montée en puissance des ENR, l'hydrogène apparaît comme un outil « tampon » adapté pour pallier l'intermittence de certaines sources d'énergie. Les technologies de production propre et de stockage d'hydrogène devenant de plus en plus matures, les premières expérimentations sont lancées.
- Le développement de la pile à combustible sur des marchés de niche, en particulier dans le secteur des transports. Au-delà d'un rôle de vitrine, ces marchés de niche permettent d'intégrer les technologies, de soutenir l'industrialisation sur de petites séries, et de convaincre de la rentabilité d'une technologie.

Objectif constant : renforcer l'intérêt économique de ce vecteur énergétique et, pour le CEA, être au meilleur niveau des technologies de l'hydrogène pour accompagner les industriels le moment venu.

Les technologies de l'hydrogène font l'objet de programmes de recherches au CEA depuis la fin des années 1990. Elles prennent part dans les missions de l'organisme en matière de développement des énergies nouvelles et reposent notamment sur des savoir faire en termes de matériaux, de procédés hautes températures et hautes pressions, et en termes d'intégration des technologies.

Ces recherches sont menées principalement sur le centre CEA de Grenoble, au sein de l'institut Liten, et pour partie sur le centre CEA du Ripault, près de Tours. Elles bénéficient de nombreux équipements de caractérisation et de tests, ainsi que de la complémentarité des compétences, par exemple sur l'énergie solaire pour le couplage aux ENR (avec l'INES, à Chambéry), ou sur les transports avec le savoir-faire acquis sur les batteries électriques (à Grenoble également).

Produire l'hydrogène pour équilibrer offre et demande d'énergie

L'intérêt de l'hydrogène comme vecteur énergétique, inépuisable et non polluant, est limité aujourd'hui par ses modes de production, aujourd'hui essentiellement à partir d'énergies fossiles.

La R&D sur des procédés de production « propre » d'hydrogène, c'est-à-dire sans émission de gaz à effet de serre (GES), suscite une forte attente car l'hydrogène est perçu depuis plusieurs années comme un bon moyen de pallier l'intermittence des énergies renouvelables, appelées à prendre une place croissante dans le mix énergétique.

Les activités du CEA sur la production d'hydrogène ont comme objectif de répondre à ces deux enjeux :

- développer des technologies matures de production propre d'hydrogène ;
- démontrer l'utilité de ces technologies en les couplant à des réseaux locaux.

La production d'hydrogène aujourd'hui

Aujourd'hui, un peu plus de 900 000 tonnes d'hydrogène sont produites et consommées chaque année en France, essentiellement pour deux applications industrielles : la chimie (production d'ammoniac) et le raffinage.

Sans même considérer de nouvelles utilisations de l'hydrogène, les besoins devraient croître, dans les raffineries pour traiter des hydrocarbures lourds (dont le rapport carbone/hydrogène est très élevé) ou dans la sidérurgie pour des procédés avancés de réduction du minerai. On estime, à l'échelle de l'Europe, que les besoins en hydrogène devraient croître de 4% par an. En France, la production vers 2030 devrait dépasser 1 million de T. par an.

La quasi-totalité de l'hydrogène produit aujourd'hui provient de la décomposition d'hydrocarbures. Le principal procédé est le vaporeformage du méthane : Il s'agit de « craquer » un hydrocarbure (le méthane), en présence de vapeur d'eau et de chaleur, pour le séparer en ses deux composants majeurs : H₂ et CO.

L'hydrogène produit aujourd'hui par vaporeformage du méthane coûte environ 1,5 €/kg d'H₂ (prix de production en usine, sans compter la distribution).

Ce procédé génère environ 10 kg de CO₂ par kg d'H₂ produit. Ainsi, les procédés de production d'hydrogène sont responsables de 1 à 2% des émissions totales françaises de CO₂.

1- Développer des technologies de production décarbonée d'hydrogène

Face aux procédés fossiles, seule la décomposition de la biomasse ou de l'eau est susceptible d'apporter également de grosses quantités d'hydrogène en réduisant les émissions de GES.

Les procédés de décomposition de la biomasse ne sont pas étudiés en priorité par le CEA aujourd'hui, car celle-ci est prioritairement dédiée à la production de biocarburants.

L'électrolyse de l'eau consiste à décomposer l'eau en oxygène et hydrogène avec un courant électrique (voir annexes, p.23).

En termes d'impact environnemental, l'intérêt de l'électrolyse dépend donc du mix électrique d'origine. Ainsi, les émissions de CO₂ sont de 20 tonnes, 5

tonnes ou de l'ordre de 0,3 tonnes par tonne d'hydrogène selon que l'on utilise respectivement le mix électrique européen ou français sans captage de CO₂, ou une énergie d'origine 100% nucléaire et renouvelable.

Aujourd'hui, l'électrolyse basse température n'est pas développée à grande échelle et est utilisée pour produire de l'hydrogène de grande pureté et lorsque l'électricité est disponible à faible coût. En France, seulement 1% de la production d'hydrogène est issu de la décomposition de l'eau par électrolyse. Le prix de l'hydrogène produit par des électrolyseurs industriels (« basse température ») est fortement corrélé au prix de l'électricité, et pénalisé par le coût élevé des électrolyseurs qui ne sont pas fabriqués encore en grandes séries. Il peut fluctuer entre 5 et 30€/kg d'H₂ selon la taille de l'installation. Dans l'hypothèse d'une usine de production massive utilisant des électrolyseurs à coût réduit par l'industrialisation, il pourrait diminuer jusqu'à atteindre environ 3€/kg d'H₂ pour une électricité à 40€/MWh.

En vue d'une filière hydrogène « propre » (sans carbone), le CEA privilégie les procédés d'électrolyse couplés à une électricité de type ENR et/ou nucléaire. L'enjeu majeur pour la R&D réside donc dans la baisse du coût des procédés d'électrolyse et dans l'augmentation de leurs rendements, via l'électrolyse haute température (EHT).

Arrêt de la R&D sur les cycles thermochimiques

Les procédés de décomposition de l'eau à haute température « par cycles thermochimiques » ont été étudiés dans les années 2000 au CEA. Cette technique consiste à mettre en œuvre une série de réactions chimiques en cycle fermé (c'est-à-dire avec recyclage intégral des réactifs intermédiaires), afin de décomposer l'eau pour produire de l'hydrogène et de l'oxygène.

Dans son principe, cette approche est très adaptée à une production de masse : à partir d'une matière première (l'eau) pratiquement inépuisable, les débits d'hydrogène sont proportionnels aux flux des réactifs et des apports énergétiques, et non aux phénomènes de diffusion aux interfaces, et cela sans apport d'électricité.

Le CEA a arrêté en 2009 ses études « laboratoire » sur différents cycles, les procédés n'ayant pas d'intérêt économique prouvé à court/moyen terme. Les Etats-Unis ont choisi également d'arrêter la R&D sur cette filière ; d'autres pays comme le Japon poursuivent leurs programmes.

Objectifs pour l'électrolyse : rendement énergétique et coût

Classiquement, l'électrolyse se fait à basse température (inférieure à 100°C). Ce type d'électrolyse (de type « alcaline » ou « PEM » pour *Proton Exchange Membrane* – voir aussi p.23, et voir piles à combustible de type PEMFC, p.14 et p.24) est un procédé consommateur d'électricité et plus coûteux que les modes de production d'hydrogène à base de combustibles fossiles.

Pour illustration, plusieurs types d'électrolyseurs sont commercialisés aujourd'hui, dont la production varie entre 0,5 Nm³/h¹ (soit ≈ 40 g d'H₂ par heure) et plus de 750 Nm³/h (soit ≈ 70 kg d'H₂ par heure).

¹ Nm³/h = normo-mètre³ /h, soit un mètre-cube d'hydrogène gazeux par heure (ou 90 g. d'hydrogène), dans des conditions normales de température et de pression.

Si l'on retient l'application d'une voiture familiale équipée d'une pile à combustible et de réservoirs H₂ pour une autonomie d'environ 500 km, 70 kg d'H₂ permettent d'alimenter une douzaine de voitures.

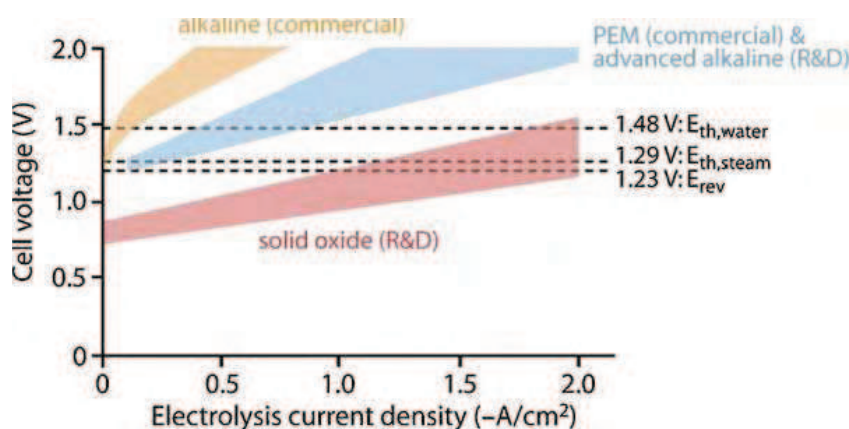
Un électrolyseur de 750 Nm³/h se présente comme un cylindre de ≈ 3 m. de diamètre sur 8 m. de longueur. Le rendement de ce type d'électrolyseur basse température est d'environ 5 kWh/Nm³ d'hydrogène produit.

La quantité d'énergie électrique nécessaire à l'électrolyse dépend des conditions de pression et de température du procédé. Pour les procédés utilisés aujourd'hui, à basse température, 80% du coût de l'hydrogène obtenu est dû à l'électricité consommée.

Le CEA privilégie l'électrolyse haute température (EHT)

Les procédés d'électrolyse haute température (EHT), entre 700°C et 800°C, sont privilégiés par le CEA. Une partie de l'énergie nécessaire à la réaction est apportée par de la chaleur, sous forme de vapeur d'eau ; c'est pourquoi on utilise aussi l'expression « électrolyse de la vapeur d'eau à haute température » (EVHT). Intégrée dans un système, l'EHT peut utiliser la chaleur fournie par l'usine où l'électrolyseur est installé, par des réservoirs à hydrures (voir p.18), voire par une source industrielle sans rapport mais située à proximité, un incinérateur par exemple.

A haute température, l'électrolyse ne nécessite pas l'utilisation d'un catalyseur. La haute température permet aussi de réaliser la dissociation de l'eau avec un meilleur rendement énergétique que l'électrolyse à basse température : plus la température augmente, plus l'énergie électrique à fournir diminue. Les électrolyseurs à haute température ont des rendements de l'ordre de 3 kWh/Nm³, soit un gain de 40% par rapport à leurs équivalents à basse température.



Le schéma ci-dessus compare les performances de l'électrolyse basse température (de type alcaline en jaune, PEM en bleu) et de l'électrolyse haute température (rouge).

La production est proportionnelle à l'intensité du courant (horizontal). Le rendement (Nm³/kWh) est inversement proportionnel à la tension (vertical).

Un intérêt de l'électrolyse à haute température est de pouvoir être réalisée avec des sources de chaleur dès 200°C. En effet, la réaction d'électrolyse est exothermique (c'est-à-dire qu'elle dégage de la chaleur) et la chaleur récupérée en sortie de procédé (oxygène et hydrogène) peut être utilisée pour préchauffer la vapeur d'eau en entrée. Par ailleurs, la souplesse du procédé offre des

perspectives pour une production décentralisée d'hydrogène, notamment dans de petites installations utilisant des énergies renouvelables.

Pour que l'EHT soit économiquement intéressant face aux procédés fossiles, l'objectif est d'approcher un coût de procédé de 2,5€/kg d'hydrogène produit (pour une production massive, avec une électricité à 40€/MWh). Une étude économique menée au 1^{er} trimestre 2012 montre que cette cible est désormais atteignable avec les solutions techniques actuellement développées et testées expérimentalement par le CEA.

Développer les matériaux pour l'électrolyse à haute température

Le principal enjeu technique pour l'EHT consiste à démontrer la robustesse du procédé sur de longues durées à partir d'électrolyseurs aux coûts compétitifs.

Un électrolyseur haute température est constitué d'un empilement de cellules d'électrolyse en matériaux céramiques (pour l'électrolyse classique on utilise des membranes polymères), liées par des interconnexions métalliques (destinées à alimenter en courant et à amener et collecter les gaz). Les interconnexions doivent rester en contact électrique permanent malgré les déformations différentes des pièces et les phénomènes de corrosion amplifiés par la haute température (800°C).

Face aux contraintes de la haute température, le principal axe de recherche vise à développer des matériaux céramiques performants et bon marché. Cela nécessite des compétences dans de nombreux domaines techniques : électrochimie, matériaux, thermomécanique, fluide, thermique, ...

Les laboratoires du CEA-Liten sont équipés de moyens importants pour caractériser et tester les équipements, depuis les composants (cellules céramiques, interconnecteurs métalliques...) jusqu'aux « stacks » (empilements de cellules). On peut par exemple mesurer l'étanchéité des stacks sur des durées de plusieurs milliers d'heures, pour des conditions de fonctionnement représentatives.

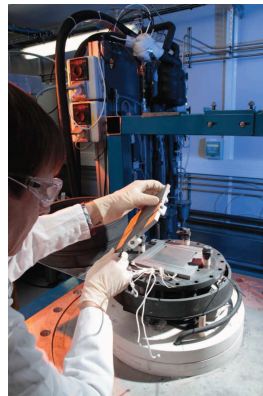


Image : un électrolyseur HT sur banc d'essais, sur le centre CEA de Grenoble. © P.Avavian/CEA

Aujourd'hui, le CEA fait partie des 4 organismes leader dans le monde sur l'EHT (à côté d'organismes américain, chinois et danois). Il est le premier déposant de brevets au niveau mondial dans ce domaine.

Résultats récents

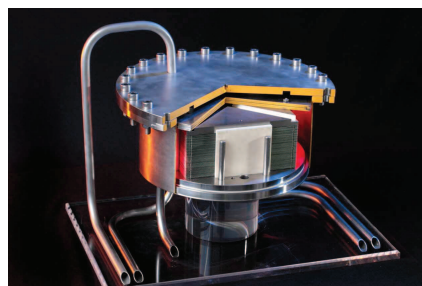
Depuis 5 ans, les chercheurs du CEA-Liten ont prouvé le potentiel des technologies d'EHT, avec des composants ayant fonctionné plus de 4 000 heures avec des taux de dégradation de quelques pourcents seulement pour mille heures.

En septembre 2011, un électrolyseur de vapeur d'eau à haute température fonctionnant à 700°C a été mis au point et testé, avec un taux de conversion de la vapeur d'eau en hydrogène de 77%. Cette température « réduite » de fonctionnement entraîne une augmentation de sa durabilité, avec un taux de dégradation de 2% pour 1 000 heures.

Les programmes actuels visent à développer des empilements de cellules, des « stacks », de plus en plus gros, selon des procédés industrialisables à coût réduit, notamment à partir de tôles minces embouties.

- **Objectif pour début 2013** : concevoir et tester un démonstrateur d'électrolyseur HT de 5 kW.
- **Objectif de moyen terme (2-3 ans)** : réunir les technologies et les industriels pour produire des électrolyseurs haute température en petite série.

Image : un électrolyseur HT à bas coût développé au CEA-Liten. © P.Avavian/CEA



Le prix de l'hydrogène

Le prix de l'hydrogène est extrêmement variable selon ce que l'on considère. Produit massivement à partir du reformage de gaz naturel, son coût de production avoisine les 1,5 à 2 €/kg, en fonction du prix du gaz.

En comparaison à ce type d'usine, le CEA s'est fixé un scénario de référence par électrolyse de l'eau en visant une production de 500 tonnes d'hydrogène par jour, avec un tarif d'électricité correspondant à un usage industriel massif aux alentours de 40€/MWh. C'est dans ces conditions que l'électrolyse basse température permet d'atteindre environ 3€/kg, et que la haute température permet d'envisager 2,5€/kg, avec des émissions de GES fortement diminuées ce qui est donc à moyen terme favorable (hausse anticipée du prix des crédits CO₂). L'hydrogène produit de façon centralisée par reformage du gaz naturel est généralement liquéfié ou fortement comprimé pour pouvoir être transporté. Cette étape a un coût énergétique important, et renchérit l'hydrogène. Selon le besoin du consommateur, il peut être également purifié de façon plus ou moins drastique. Il est ensuite distribué par camion, conditionné en bouteilles elles-mêmes livrées aux utilisateurs finaux. Les grands clients industriels de l'hydrogène s'approvisionnent aux alentours de 10 à 20€/kg, rarement en dessous de 8€/kg. Une grande bouteille d'hydrogène ultrapur, utilisé dans les laboratoires de recherche, est achetée à plus de 100€/kg !

La production décentralisée par électrolyse couplée aux ENR vise donc des marchés accessibles aux alentours de 10€/kg. Pour l'application transport, un prix cible entre 5 et 10€/kg serait acceptable, en fonction du niveau de taxation applicable. Un kg d'hydrogène permet de faire 100km. 5 litres aux 100km à 2€/l d'essence amène également à un coût d'environ 10€/100km.

2- Une opportunité : accompagner les productions décentralisées d'électricité (renouvelable)

L'hydrogène est un moyen de stocker de l'électricité renouvelable intermittente (photovoltaïque / éolien) : le principe est d'utiliser l'électricité excédentaire en heures creuses pour produire de l'hydrogène et d'utiliser l'hydrogène obtenu :

- soit pour alimenter des utilisateurs industriels d'hydrogène (électronique, chimie, etc.) qui utilisent aujourd'hui de l'hydrogène

produit à partir d'énergies fossiles ;

- soit pour produire de l'électricité à l'aide d'une pile à combustible (PAC) en période de pointe de consommation ou aux heures où l'énergie renouvelable n'est plus disponible ;
- soit pour l'injecter dans le réseau de gaz naturel, qui peut absorber plusieurs pourcents d'hydrogène sans risque, ce qui constitue des quantités gigantesques d'énergie compte-tenu du volume du réseau de gaz naturel en France et en Europe ;
- soit pour alimenter un réseau local de distribution d'hydrogène, une station-service par exemple.

Première démonstration sur la plateforme MYRTE

Installée en Corse, la plateforme MYRTE (Mission hydrogène renouvelable pour l'intégration au réseau électrique) utilise ce principe de stockage de l'énergie renouvelable intermittente via le vecteur hydrogène.

Le démonstrateur MYRTE stocke l'énergie photovoltaïque via un électrolyseur (débit de 40 Nm³/h), qui convertit l'électricité photovoltaïque en hydrogène et oxygène pendant les heures de faible consommation. Cette énergie est ensuite restituée au réseau via une pile à combustible de 100 kW (qui reconvertit l'hydrogène et l'oxygène en électricité), pendant les heures de forte consommation, en particulier le soir alors que les panneaux photovoltaïques ne produisent plus.

La plateforme est constituée d'une centrale photovoltaïque d'une puissance installée de 560 kWc sur 3 700 m², reliée directement à une chaîne hydrogène, utilisée comme un moyen de stockage.

Cette démonstration technique est particulièrement pertinente sur un territoire insulaire comme la Corse : réseaux électriques non interconnectés, territoire adapté aux énergies intermittentes et en même temps limité en capacité d'accueil de nouveaux moyens de production « de base ».

L'enjeu de la plateforme est d'améliorer la gestion et la stabilisation du réseau électrique corse :

- répondre aux pics de consommation, en restituant le soir sur le réseau l'énergie électrique stockée ;
- atténuer les variations de production des panneaux photovoltaïques selon l'ensoleillement ;
- limiter les surtensions sur le réseau en situation de forte production photovoltaïque ET de faible consommation.

Ainsi, idéalement, l'hydrogène produit et stocké permet de gérer les fluctuations de puissance des énergies renouvelables intermittentes intégrées dans le réseau. MYRTE est la 1^{ère} installation utilisant l'hydrogène dans une fonction « tampon » à être couplée au réseau national d'électricité.

Image : la plateforme MYRTE, près d'Ajaccio. © Université de Corse

La plateforme MYRTE est issue de l'engagement de trois partenaires : l'Université de Corse Pasquale Paoli, HELION et le CEA. Elle est labellisée par le pôle de compétitivité CAPENERGIES.



Le projet PUSHY, ou l'ambition d'un hydrogène vert rentable

Piloté par la société McPHY, leader dans le domaine du stockage d'hydrogène sous forme d'hydrures métalliques, le projet PUSHY financé par OSEO vise le développement d'une filière industrielle compétitive de production et distribution d'hydrogène vert. Le CEA est partenaire de ce projet.

Couplé à des petites centrales de micro-hydraulique, un électrolyseur basse température pourra remplir progressivement un réservoir tampon d'hydrogène McPHY. Le réservoir sera ensuite transporté sur une courte distance vers le client industriel, avec un bilan CO₂ réduit d'un facteur 10 par rapport à l'état de l'art (on vise environ 2 kg(CO₂)/kg d'hydrogène livré au client, alors qu'aujourd'hui ce ratio peut atteindre environ 20 kg(CO₂)/kg d'hydrogène. Autre ambition, permettre aux industriels de produire directement sur leur site l'hydrogène dont ils ont besoin, avec un électrolyseur basse température et un stockage tampon McPHY.

Tout l'enjeu de ce programme est de capter des marchés solvables pour l'hydrogène vert, à un tarif compétitif, ce qui permettra de déployer sur le territoire un premier maillage d'infrastructures hydrogène rentables. Dans un second temps, ce réseau pourra être progressivement mobilisé pour alimenter de la distribution d'hydrogène pour les véhicules à piles à combustible, à un coût réduit, et en garantissant un bilan écologique favorable pour cet hydrogène.

Accompagner les projets par des études technico-économiques

Le couplage hydrogène / ENR est une solution technique séduisante pour optimiser la fourniture des réseaux électriques. La rentabilité de l'installation des technologies et de leur couplage à un réseau doit être démontrée.

Le CEA compte deux départements pour développer ces études :

- L'Institut de technico-économie des systèmes énergétiques (CEA-Itésé, à Saclay), qui focalise son effort sur l'analyse de l'économie de l'énergie au niveau systémique ;
- Le laboratoire L2ED (études, évaluations et démonstrateurs de procédés pour l'énergie) au sein du CEA-Liten, qui accompagne les programmes du Liten selon trois grands axes :
 - la technico-économie des composants et des chaînes énergétiques ;
 - l'analyse du cycle de vie des technologies ;
 - le développement d'outils multicritères visant à identifier les meilleurs systèmes énergétiques hybrides pour un usage donné.

Les compétences de ce laboratoire permettent donc de focaliser les développements de la R&D sur les points clés qui limitent encore la compétitivité des solutions hydrogène, et au niveau des systèmes de préparer des stratégies de pilotage optimisées en fonction du coût de l'électricité, de plus en plus variable au cours de la journée, en couplage aux énergies intermittentes, et en fonction de la prévision de la demande d'hydrogène par les clients.

Une nouvelle idée : l'hydrogène pour recycler le CO₂ (concept « *power to gas* »)

L'hydrogène, combiné au CO₂, permet de former n'importe quel hydrocarbure, et notamment du méthane ou gaz naturel. Une nouvelle idée se développe donc depuis quelques années : utiliser de l'hydrogène produit par les énergies renouvelables, ou par l'électricité nucléaire la nuit, pour transformer le CO₂ émis par certaines usines en gaz naturel injecté dans le réseau, ou en tout autre combustible hydrocarboné. Recyclage du CO₂ et stockage de l'électricité sont ainsi réalisés conjointement.

Cet usage de l'hydrogène, complémentaire aux autres, est particulièrement intéressant dans le cas où l'on dispose de l'électrolyse à haute température : une étude spécifique sera réalisée par le CEA sur ce sujet dans l'année qui vient.

L'hydrogène carburant : la R&D du CEA sur les piles à combustible (PAC)

Le CEA-Liten développe des technologies de piles à combustible (PAC) principalement pour le secteur des transports (automobile grand public, marchés de niche) et, dans une moindre mesure, pour les applications stationnaires (cogénération, couple énergies renouvelables...).

Le principe de la pile à combustible est de produire simultanément de l'électricité et de la chaleur en recombinaison de l'oxygène et de l'hydrogène, avec de l'eau pour seul « rejet ».

Il existe plusieurs types de piles à combustible (PAC) qui se différencient par leur électrolyte, l'élément chargé de véhiculer les ions (voir aussi p.24). Cet électrolyte définit la température de fonctionnement de la pile et, de fait, son application.

Parmi ces différentes technologies, le CEA privilégie le développement des piles à membranes échangeuses de protons (PEMFC, pour *Proton exchange membrane fuel cell*) et les piles à oxydes solides (SOFC, pour *Solid oxide fuel cell*).

Les PEMFC, fonctionnant à basse température, sont privilégiées pour les applications transport en raison de leur compacité. Les SOFC sont quant à elles privilégiées pour les applications stationnaires de cogénération.

Au niveau international : des piles à combustible compétitives

Au niveau international, les technologies de pile à combustible commencent à être concurrentielles sur différents marchés « de niches ».

On peut citer trois exemples :

- Axane, filiale du groupe Air Liquide, commercialise des piles à combustible afin d'alimenter des relais télécom dans des zones isolées, où le raccordement à un réseau électrique s'avère compliqué et coûteux.

- Au Japon, le programme ENE-FARM d'installation de 70 000 unités de micro-cogénération (électricité + chaleur) est en cours. Le principe repose sur un système PAC à usage domestique, capable de reformer du gaz naturel issu du réseau (méthane → hydrogène) pour fournir électricité et chaleur à la maison. Près de 20 000 unités sont déjà installées, pour 70 000 à l'horizon 2015. Le programme bénéficie de subventions des pouvoirs publics.

- Enfin, un marché avéré est celui des chariots élévateurs, où l'utilisation de piles à combustible est concurrentielle par rapport aux batteries électriques. Aux Etats-Unis, près de 2 000 chariots élévateurs sont utilisés dans différents entrepôts commerciaux. En France, Air Liquide et la société américaine Plug Power ont créé la coentreprise HyPulsion, localisée à Sassenage (Isère), pour développer ce marché au niveau européen. Air Liquide indique que ce marché pourrait représenter 10 000 unités en Europe à l'horizon 2015.

1- La R&D du CEA sur les piles à combustible pour applications transport

Promesse depuis plusieurs années pour équiper les voitures de demain, la pile à combustible est complémentaire du véhicule tout électrique équipé de batteries.

La PAC permet d'augmenter l'autonomie qui fait défaut aux batteries, et les deux technologies sont étroitement liées.

Les technologies de pile à combustible PEMFC sur lesquelles travaille le CEA ont notamment été étudiées dans le cadre d'un partenariat privilégié avec PSA Peugeot Citroën. Une 1^{ère} pile de 80 kW, baptisée GENEPAC, a été présentée en 2006. Ce partenariat a abouti, mi 2009, à la présentation du véhicule FISYPAC (prototype Peugeot « 307 Epure ») intégrant une pile développée au CEA. C'est alors une PAC parmi les plus performantes dans le monde,



présentant un très bon rapport puissance / compacité, 1,4 kW/kg et 2,1 kW/L.

Image : la pile GENEPAC développée en 2006 avec PSA Peugeot-Citroën.
© P.Stroppa/CEA

Pour les applications transports, les PAC sont couplées à des batteries Li-ions, domaine de R&D dans lequel le CEA-Liten mène également un programme de R&D approfondi, avec une plateforme de R&D dédiée.

Ce couplage a une double fonction :

- améliorer les performances et la durabilité du système PAC :
La principale contrainte pour une PAC embarquée dans un véhicule est de ne jamais fonctionner en mode « nominal » : la PAC est soumise en continu à des variations de puissance, de 0 à 80 kW par exemple, correspondant à toutes les situations entre l'arrêt du véhicule et une accélération à pleine charge. Ces variations influencent fortement la tenue dans le temps et les performances des composants de la PAC, en particulier du cœur de pile. Le couplage avec des batteries permet de lisser le fonctionnement de la PAC en réduisant sa plage de fonctionnement : les batteries assurent le surplus d'énergie nécessaire en phase de forte accélération par exemple, tandis qu'à l'arrêt ou en décélération, la PAC libère son surplus d'énergie pour recharger les batteries.
- assurer une prolongation de l'autonomie en traction électrique.
Avec cette architecture, la PAC devient aussi un « prolongateur d'autonomie » des véhicules électriques, dont c'est aujourd'hui la principale limite.
Cette fonction a été démontrée avec succès par le CEA et PSA Peugeot-Citroën sur le projet FiSyPAC, avec la présentation en 2009 d'un prototype équipé d'une pile type GENEPAC. La voiture comprenait une pile de 20 kW (avec 4 kg d'hydrogène embarqué dans des réservoirs sous pression à 700 bars), associée à un moteur électrique de 15 kW, pour une autonomie de près de 500 kilomètres.
Avec des puissances de batteries / PAC modulables, le concept peut être décliné selon différents cahiers des charges.

Les axes d'amélioration des piles de type PEMFC

(Voir aussi principe de fonctionnement d'une PAC, en annexes page 24)

Les recherches menées au CEA répondent à plusieurs enjeux :

- Optimiser les assemblages membrane-électrodes (AME) :

Les AME concentrent l'attention des chercheurs parce qu'une grande part du coût et de la performance d'une PAC tient à ces éléments.

Le catalyseur (anode et cathode), en platine, est le principal responsable du coût élevé d'une PAC, à hauteur de 50% du coût d'un « cœur » de pile, et à hauteur de 25% du coût d'un « système PAC » complet. Le CEA-Liten étudie différentes options technologiques afin de réduire la charge en platine, sans perte notable des performances électrochimiques. Aujourd'hui, l'état de l'art se situe à des performances de 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 0,1-0,2 gPt/kW).

La membrane fait également l'objet d'études : aujourd'hui, elle est réalisée en Nafion[®], un matériau qui impose une température de fonctionnement maximale de +/- 80°C pour conserver ses propriétés. Or l'augmentation de la température de fonctionnement permettrait d'améliorer les performances et de réduire encore la taille du système (en diminuant voire en supprimant certains périphériques assurant la bonne circulation des fluides).

Les chercheurs travaillent sur des matériaux de membranes acceptant une température de fonctionnement de 120°C, au lieu de 80°C actuellement (l'objectif ultime serait d'atteindre 180 à 200°C).



Image : membrane pour PAC. © P.Avavian/CEA

- Diminuer le volume des plaques bipolaires :

Il y a dix ans, les plaques bipolaires constituaient 90% de l'encombrement de la PAC ; depuis, leur épaisseur individuelle a pu être réduite d'environ 8 mm à moins d'1 mm en passant du graphite usiné à une solution métallique (pour des applications stationnaires, les chercheurs du centre CEA du Ripault développent aussi des plaques bipolaires composites, avec des procédés de fabrication bas coût).

- Comprendre le comportement de la pile en conditions réelles d'utilisation :

Les chercheurs travaillent à la modélisation et à la caractérisation fine des éléments pouvant perturber le bon fonctionnement de la pile : mécanismes de dégradation de la membrane et du vieillissement des assemblages membrane-électrode (AME), effets de l'humidification, transferts à l'interface AME...

Au CEA-Liten, différents systèmes de tests permettent d'améliorer la compréhension du fonctionnement des piles dans des conditions d'usage représentatives d'un fonctionnement réel.

Les outils de simulation numérique apportent un complément très important à l'expérimentation, en permettant des études multi-échelles : les chercheurs peuvent comprendre un même processus depuis le grain de platine, atome par atome, jusqu'aux transferts chimiques d'ensemble dans le cœur de pile.

Le CEA dans une perspective de pré-industrialisation

Il est encore difficile de donner des échéances de diffusion à grande échelle des PAC pour les véhicules particuliers. La technologie de la PAC est mature (ainsi, le groupe Daimler a avancé de 2015 à 2014 la commercialisation de premiers modèles « de grande série ») mais il subsiste des incertitudes sur les infrastructures et le coût associé.

Les recherches menées au CEA-Liten visent un double objectif :

- valider l'intégration des technologies H₂-PAC dans des démonstrateurs en conditions réelles d'utilisation ;
- susciter les transferts industriels dès que les technologies sont matures et concurrentielles.

L'objectif de viser des marchés où la PAC est concurrentielle explique que les premiers développements pour applications transports concernent des marchés de niche. Cette stratégie s'illustre, dans le cas des applications mobilité, par le transfert à Symbiofcell des technologies de la pile GENEPAC. Ce soutien technique permet à Symbiofcell de lancer actuellement le premier site français de production industrielle de PAC pour les transports.

Symbiofcell propose des chaînes de traction électrique pour des véhicules utilitaires très spécifiques – une dameuse par exemple – où la PAC peut présenter un réel avantage concurrentiel.

Un exemple d'intégration des technologies pour un marché de niche Le voilier Zéro CO₂

Présenté en 2009, le projet Zéro CO₂ est porté par quatre partenaires : le CEA, l'Université Joseph Fourier, la société de valorisation Floralis, et le constructeur RM. Ce projet démontre l'intérêt et la maturité d'un système PAC pour le marché de la plaisance.

Zéro CO₂ est un voilier de 12 mètres capable d'utiliser un panel d'énergies propres le rendant autonome vis-à-vis du pétrole : une pile à combustible à hydrogène alimente son moteur auxiliaire électrique, des énergies renouvelables (solaire, éolien, hydraulique) subviennent aux besoins du bord. La pile à combustible, le stockage hydrogène et l'intégration sont réalisés par l'Institut Liten du CEA à Grenoble. Le module de puissance à pile à combustible (de type PEMFC) de 35 kW est dédié à la propulsion du voilier et aux batteries de secours 400V. Il assure également la conversion électrique basse tension pour les servitudes et le chauffage de l'eau sanitaire.

Le voilier Zéro CO₂ vient de bénéficier d'une convention entre le CEA et la Ville de Nice pour pouvoir bénéficier du port de Nice comme point d'attache permanent.



Image : le voilier Zéro CO₂
© CEA

En 2012, le CEA-Liten se dote d'une ligne-pilote pour la conception et la fabrication de piles à combustible, avec le soutien de partenaires industriels majeurs (Renault, Michelin, SFC). Cette ligne-pilote piles à combustible regroupera l'ensemble de la chaîne de fabrication :

- la réalisation et l'assemblage membrane-électrodes (AME) ou « cœurs de piles » ;
- la réalisation des « stacks ».

Cette plate-forme a pour vocation de rendre accessible aux industriels toute la chaîne de fabrication. Les équipements permettront de réaliser des prototypes ou des petites séries de composants incluant les dernières technologies développées dans les laboratoires du CEA-Liten, et de répondre à des demandes concernant tous types d'usages (véhicules routiers, usage stationnaire, ...).

2- Les travaux sur les piles de type SOFC pour les applications stationnaires

La spécificité des piles SOFC (*Solid oxide fuel cells*) réside dans leur haute température de fonctionnement, de l'ordre de 800-900°C.

Ces PAC possèdent de nombreux atouts : leur rendement électrique est important (supérieur à 50%) et elles fonctionnent sans catalyseur à base de métaux nobles comme le platine, ce qui permet de réduire les coûts et d'utiliser directement des gaz de synthèse (hydrogène + CO issu d'un reformeur ; gazéification de la biomasse). Leurs rendements globaux importants, électrique et thermique, permettent de disposer de vapeur d'eau à haute température valorisable en cogénération (chauffage des bâtiments et de l'eau ou alimentation d'une turbine à gaz).

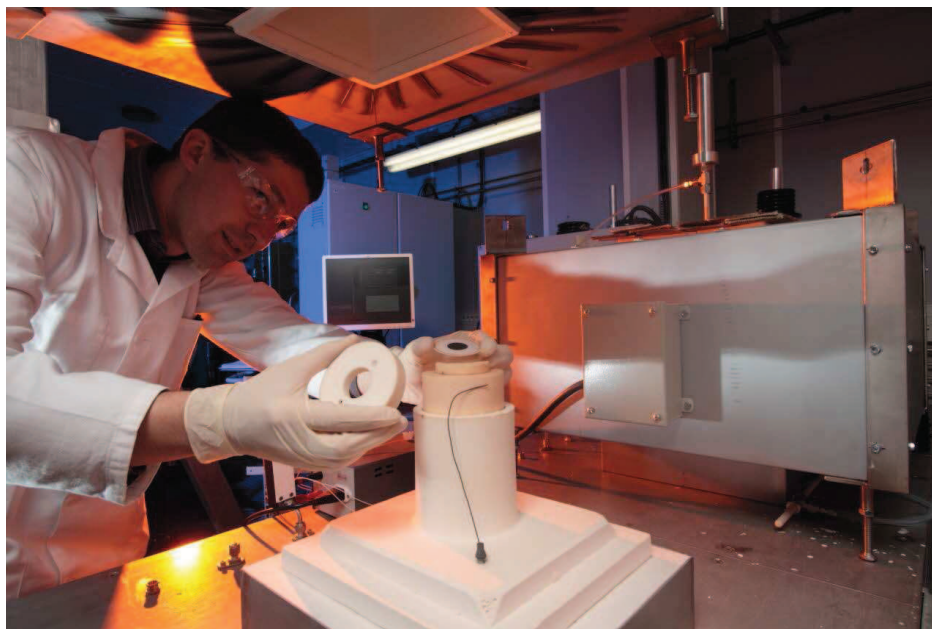


Image : Four servant aux tests de composants de cellules SOFC, à Grenoble. © P.Avavian/CEA

Deux enjeux font actuellement l'objet de recherches au CEA :

- Limiter le coût et la dégradation des SOFC :
La température élevée des piles de type SOFC nécessite des matériaux relativement coûteux et limite la durée de vie et la fiabilité des systèmes lors des cycles de marche/arrêt. En totale synergie avec les programmes sur l'EHT, les travaux menés par le CEA permettront de réduire le coût et d'améliorer la durabilité des piles de type SOFC.
- Permettre l'alimentation de la pile avec des gaz variés :
Dans la perspective du développement progressif d'une filière hydrogène, la mise sur le marché en grande série de PAC susceptibles d'être alimentées par un autre gaz que l'hydrogène présente un intérêt majeur. Dans un premier temps, on envisage une alimentation par du gaz naturel et, à terme, à partir de gaz issus de la biomasse.

Les principes de fonctionnement de l'électrolyse à haute température (EHT, voir partie *Production de l'hydrogène*) étant très proches (processus inverse) de celles d'une SOFC, les verrous technologiques à lever sont similaires. La R&D menée actuellement vise à démontrer la faisabilité de la réversibilité sur la base d'une architecture innovante mise au point dans le cadre des programmes EHT du CEA. Un tel système réversible permettrait d'aborder des applications de type stockage des énergies intermittentes (cf. programme Myrte) en réduisant le coût par l'usage d'un seul stack fonctionnant soit en mode électrolyseur, soit en mode pile à combustible.

Stocker l'hydrogène, une fonction à maîtriser pour tous les « systèmes » hydrogène

Piles à combustible et électrolyseurs constituent deux procédés inverses d'un même principe de conversion d'énergie chimique (hydrogène) en énergie électrique. En entrée ou en sortie de procédé, il est nécessaire de disposer de moyens de stockage de l'hydrogène. Un enjeu technique important puisque l'hydrogène est le plus léger des éléments : il occupe, à poids égal, beaucoup plus de volume qu'un autre gaz.

Les travaux du CEA sur le stockage d'hydrogène visent deux applications majeures : le stockage stationnaire pour la valorisation des énergies renouvelables, et la fourniture d'énergie pour des systèmes embarqués (piles à combustible). Dans les deux cas, il faut atteindre des densités volumiques et massiques compatibles avec les applications visées.

- **Stockage stationnaire pour palier l'intermittence des énergies renouvelables :**
Pour ce type d'application, on cherchera tout d'abord un système très peu cher par rapport au kilogramme d'hydrogène stocké, avec un rendement énergétique élevé. Les solutions actuelles s'orientent vers un stockage à basse pression afin d'éviter le coût énergétique de compression du gaz, ou vers des solutions mettant en œuvre des hydrures.
- **Stockage embarqué :**
Concernant ces applications, les impératifs de volume et de poids sont prépondérants. On cherchera aussi une cinétique de remplissage rapide.

Les différentes technologies de stockage présentées ici sont comparées selon leurs densités volumiques d'énergie, sachant qu'en conditions normales de température et de pression (CSTP) 1 bar, 20°C, l'hydrogène occupe un volume de **333 litres/kWh** et, dans les mêmes conditions, l'essence occupe **0,1 litre/kWh**.

1- Le stockage solide dans des « hydrures », privilégié pour les applications stationnaires



Il s'agit d'exploiter la capacité de certains matériaux dits hydrures à absorber et désorber de l'hydrogène de manière réversible.

Dans les hydrures métalliques (alliage de nickel, de titane, de magnésium) par exemple, les atomes du dihydrogène gazeux entrent dans le matériau et forment une nouvelle « phase » de ce matériau.

Image : un réservoir de stockage d'hydrogène sous forme d'hydrures métalliques de conception Liten. © P.Avavian/CEA

Les matériaux hydrures se présentent sous forme de poudre, forme vers laquelle les atomes d'hydrogène migrent naturellement. Cela comporte deux avantages : d'une part cela permet à l'hydrogène d'accéder au matériau de manière

uniforme ; d'autre part, la porosité constitue un tampon qui permet d'encaisser le gonflement de matière lorsque l'hydrogène est absorbé.

Le stockage dans les hydrures est le moyen le plus efficace pour obtenir une forte densité volumique d'énergie : le volume occupé peut se réduire à **0,25 litre/kWh** dans les conditions normales de température et de pression. Ceci se fait par contre au détriment du poids, puisque au bilan il faut ajouter le poids du matériau dans lequel l'hydrogène s'insère.

La réaction d'absorption de l'hydrogène dans le matériau est exothermique (dégagement de chaleur). La réaction de désorption (libération de l'hydrogène) est quant à elle endothermique (apport de chaleur nécessaire). En général pour absorber de l'hydrogène à une température donnée, on injecte du gaz dihydrogène à une pression supérieure à la pression d'équilibre de formation de l'hydrure tout en évacuant la chaleur produite. La vitesse de remplissage d'un réservoir dépend de l'efficacité de l'échange thermique de refroidissement. Au contraire, pour libérer de l'hydrogène, on se place en dépression par rapport à la pression d'équilibre de la réaction tout en apportant de la chaleur.

Les premières démonstrations pré-industrielles

Sur le centre de Grenoble, le CEA travaille avec la société McPhy afin de concevoir et tester des réservoirs sous forme d'hydrures à visées industrielles. Le principal marché visé est celui du stockage d'énergies renouvelables. Les installations du CEA permettent de tester et mesurer les performances des réservoirs en les couplant avec des électrolyseurs (en entrée) ou des piles à combustible (en sortie). Le partenariat avec McPhy porte sur des réservoirs utilisant des hydrures de magnésium, qui réagissent avec l'hydrogène à un peu plus de 300°C pour une pression de 10 bars. Les réservoirs testés jusqu'à présent se présentent sous forme de cartouches pouvant stocker chacune 4 kg d'hydrogène, soit l'équivalent de 132 kWh. L'hydrogène est relâché sous forme gazeuse en diminuant la pression, avec un rendement de 97%. Le CEA-Liten a testé récemment avec succès une version de 15 kg (500 kWh).

La société McPhy présente une stratégie originale de démonstration des réservoirs à hydrures. En attendant le déploiement de systèmes combinant hydrogène / ENR, l'idée est de rentabiliser ces réservoirs sur des marchés

existants. McPhy proposera ainsi aux industriels des dispositifs couplant un électrolyseur basse température avec un réservoir McPhy, dédiés à leurs besoins en hydrogène et implantés sur leurs sites d'activité. Le stockage serait donc assuré par un réservoir à hydrures de 250 kg d'hydrogène, pour un coût de revient de 10€/kg (Cf. projet PUSHY p.10).



Image : réservoir de stockage de 15kg d'hydrogène de McPhy implanté sur la plateforme de tests du Liten.
© P.Avavian/CEA

2- Les technologies de stockage embarqué

Différentes technologies de stockage sont en concurrence pour les applications transports. Pour des véhicules légers, le stockage gazeux sous pression constitue une voie mature. Pour des véhicules lourds, le stockage sous forme d'hydrures peut être une alternative. Le CEA travaille sur les deux axes.

Le stockage gazeux sous pression

Image : Démoulage d'un liner polyuréthane après un cycle de rotomoulage (centre CEA du Ripault).
© P.Stroppa/CEA

Le stockage sous forme gazeuse se fait dans des réservoirs dits hyperbares composés d'un *liner* protégé par un enroulement filamentaire. Le CEA a développé des réservoirs pour des pressions de service de 700 bars, formule privilégiée pour les applications automobile. La partie interne du réservoir (le liner), assurant l'étanchéité de l'hydrogène, est réalisée en polymère selon un procédé innovant de synthèse et transformation simultanées. Cette technologie a fait l'objet de brevets par le CEA. La coque composite externe assure quant à elle la résistance et la protection mécaniques. Elle est constituée par enroulement filamentaire et utilise des matériaux issus de l'aéronautique comme les fibres de carbone haute résistance. Lors d'un « benchmark » à l'échelle européenne en 2008, cette technologie à l'état de prototype était la seule à satisfaire simultanément les trois principaux critères issus des cahiers des charges européens pour le stockage embarqué à 700 bars :

- Durée de vie : pour représenter leur vieillissement au cours de la vie d'un véhicule, les réservoirs CEA ont fait la preuve de leur résistance à plus de 15 000 cycles de remplissage (20-875 bars) sans perte notable de propriétés (norme en vigueur) ;
- Etanchéité : le taux de fuite des réservoirs CEA était *a minima* 20 fois inférieur à la valeur demandée par la norme ($1\text{cm}^3/\text{L/h}$) ;
- Sécurité : les réservoirs du CEA ont démontré leur résistance à des pressions internes supérieures à la pression d'éclatement fixée par la norme (1 575 bars, près de 2,3 fois la pression de service).

Avec cette technologie, l'hydrogène occupe un volume de **0,47 litre/kWh**.

L'utilisation de 3 réservoirs compacts de +/- 35 litres de volume interne permet d'embarquer environ 4,5 kg d'hydrogène. Cette configuration permet d'envisager avec les technologies actuelles une autonomie d'environ 500 km pour une voiture familiale équipée d'une pile à combustible PEMFC de 70 à 80 kW.

Le centre CEA du Ripault, près de Tours, a créé une plateforme de transfert technologique, baptisée Alhyance, sur laquelle sont réunies toutes les compétences et techniques pour la fabrication des réservoirs composites haute pression.

Cette plateforme permet également de procéder aux tests de performances et de sécurité des réservoirs d'hydrogène. Dans ce cadre, le centre CEA du Ripault a développé un partenariat avec la société RAIGI pour permettre les premières industrialisations de ces réservoirs.

Image : réalisation de la coque composite structurante des réservoirs, sur le centre CEA du Ripault. © P.Stroppa/CEA



Le stockage liquide

Certains constructeurs automobiles se sont intéressés au stockage cryogénique de l'hydrogène sous forme liquide. Cette technique offre aujourd'hui les meilleures performances en termes de masse et de volume (l'hydrogène occupe un volume de **0,38 litre/kWh**) mais présente deux inconvénients importants : la liquéfaction est très gourmande en énergie et la sécurité des réservoirs est plus difficile à assurer (phénomène de boil-off² et fragilité des réservoirs).

Le stockage solide dans des hydrures

Concernant les applications embarquées, même si l'automobile reste pour l'instant hors de portée des hydrures existant actuellement, à cause du poids, le CEA-Liten développe des réservoirs pour des applications dites lourdes, là où le poids n'est pas forcément rédhibitoire, par exemple pour les gros engins agricoles ou les bateaux. Par rapport aux hydrures utilisés pour les applications stationnaires, ces travaux se différencient par une température de fonctionnement moins élevée, compatible avec les piles à combustible « basse température » de technologie PEMFC.

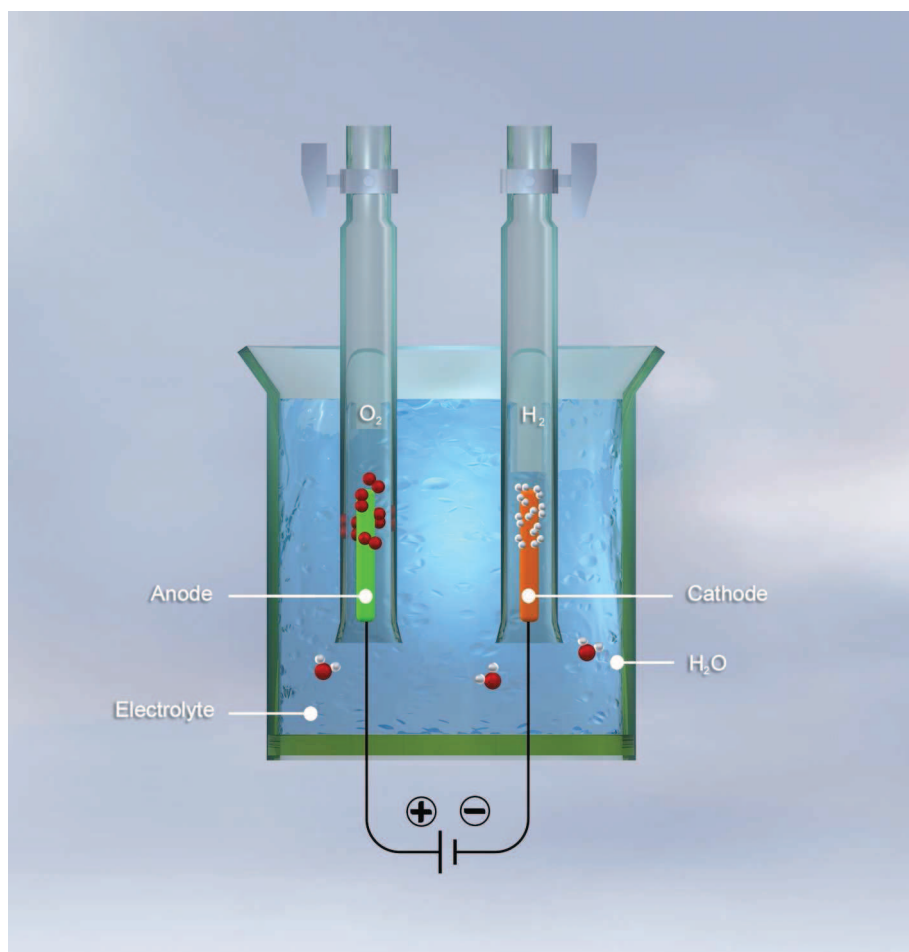
Un prototype de réservoir contenant près de 2 kg d'hydrogène a ainsi été réalisé et testé par le CEA-Liten fin 2011, en collaboration avec la société AGCO pour une application tracteur. La chaleur de la pile à combustible, à environ 60°C, suffit à libérer l'hydrogène du réservoir.

Les axes actuels de la R&D du CEA dans ce domaine consistent à lancer le développement d'une filière industrielle de matériaux hydrures bas coût. Ces matériaux, souvent historiquement développés pour des applications métallurgiques de pointe, sont en effet encore trop onéreux. Le CEA recherche également de nouveaux partenaires industriels pour lancer une première filière française de réservoirs embarqués pour véhicules lourds.

² Fuite par évaporation.

Annexes

La production d'hydrogène : principe de l'électrolyse



Le courant électrique circule dans l'**électrolyte** (milieu conducteur d'ions, ici **l'eau**) pour dissocier les deux atomes d'hydrogène et l'atome d'oxygène de chaque molécule d'eau. A l'**anode** (oxydation de l'eau), les ions se recombinent en oxygène O_2 . A la **cathode** (réduction de l'eau), ils se recombinent en hydrogène H_2 qui peut être ainsi récupéré.

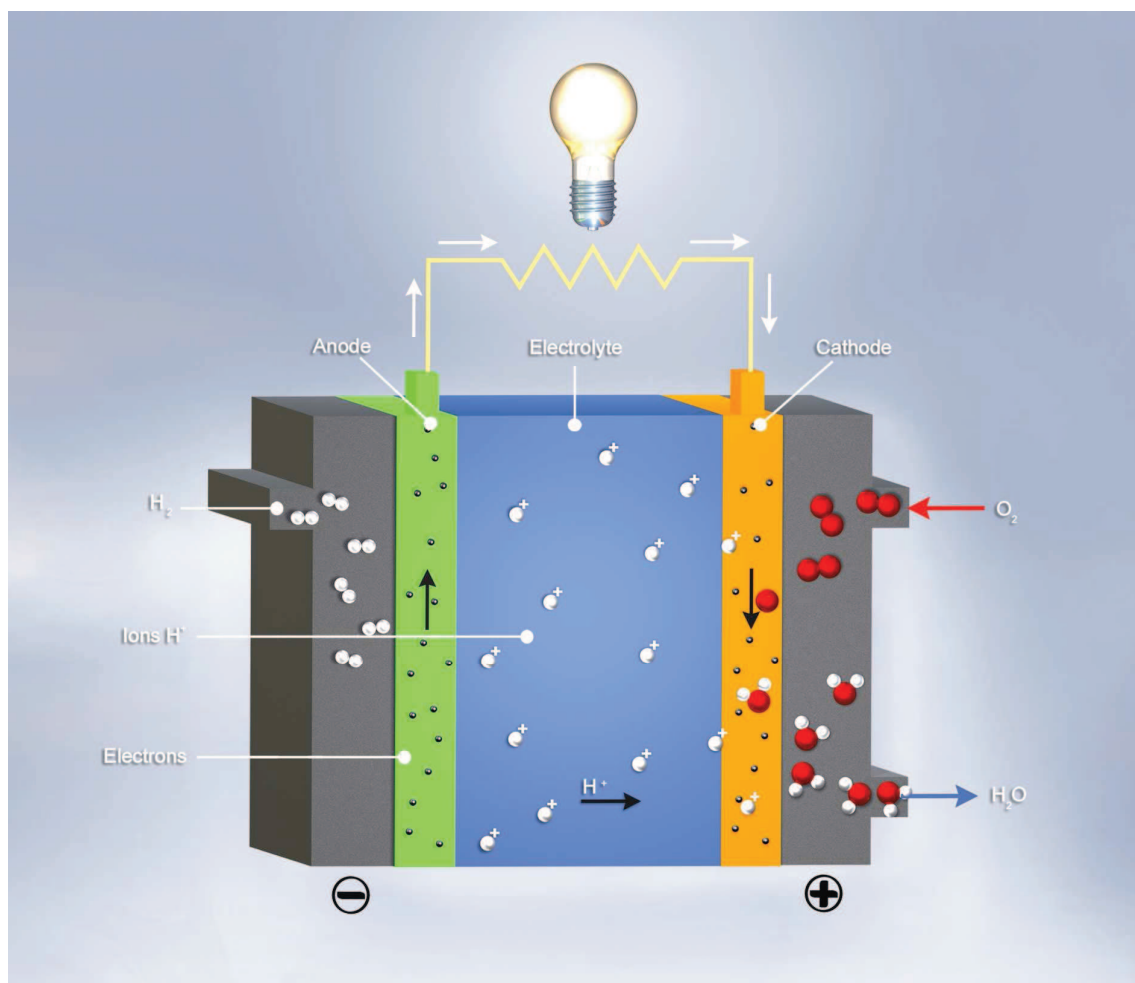
L'anode est l'électrode où a lieu l'oxydation, c'est-à-dire la réaction dans laquelle un atome ou un ion perd des électrons ; la cathode est l'électrode où a lieu la réduction, c'est-à-dire la réaction dans laquelle un atome ou un ion gagne des électrons (également pour la pile à combustible).

Ce schéma correspond à une vision « historique » de l'électrolyse. Selon les technologies, l'électrolyte (ou membrane) peut être liquide ou solide :

- une solution aqueuse acide.
- une membrane polymère échangeuse de protons : cas de l'électrolyse PEM, principe inverse de la pile à combustible de type PEMFC.
- une membrane céramique conductrice d'ions O^{2-} , comme dans le cas de l'électrolyse haute température (EHT).

L'utilisation de l'hydrogène : principe de la pile à combustible

L'hydrogène est injecté à l'**anode** de la pile à combustible. Les molécules H_2 se dissocient en **ions H^+** qui migrent vers l'**électrolyte** et en **électrons** qui sont contraints de circuler dans un circuit qui génère un courant et donc de l'électricité. A la **cathode**, ces électrons se recombinaient avec les **ions H^+** et les molécules O_2 (issues de l'air ambiant) pour rejeter de l'eau H_2O . Cette réaction produit également de la chaleur.



Dans la conception d'une pile, l'électrolyte est aussi appelée la membrane. Elle assure le transport des ions tout en étant un excellent isolant électronique, et a également pour fonction de séparer les gaz hydrogène et oxygène. Les réactions électrochimiques au sein des électrodes ne peuvent se réaliser qu'en présence d'un catalyseur, en l'occurrence le platine.

La membrane et les électrodes sont conçues ensemble : on parle d'assemblages membrane-électrodes AME. Les plaques bipolaires (en gris sur le schéma) servent à distribuer les gaz (hydrogène, oxygène ou air), à collecter le courant électrique et à assurer la gestion thermique de la pile.

Les AME et les plaques bipolaires vont s'additionner les unes aux autres pour définir les caractéristiques de la pile (performances, dimensions).