

12

→ L'hydrogène



CARACTÉRISTIQUES DE L'HYDROGÈNE
ENJEUX D'UNE ÉCONOMIE
DE L'HYDROGÈNE
MODES DE PRODUCTION
DISTRIBUTION ET STOCKAGE
LA PILE À COMBUSTIBLE
DEMAIN,
L'HYDROGÈNE AU QUOTIDIEN ?



L'hydrogène

CARACTÉRISTIQUES DE L'HYDROGÈNE 4

L'hydrogène : premier de la classe 5

Une petite molécule pleine d'énergie 6

Présent partout... mais disponible nulle part 6

ENJEUX D'UNE ÉCONOMIE DE L'HYDROGÈNE 7

Dihydrogène et combustibles fossiles 8

Une insertion dans le mix énergétique 8

Une solution pour les lieux de consommation isolés 9

De nombreuses applications 9

MODES DE PRODUCTION 11

La production actuelle du dihydrogène 12

Production du dihydrogène à partir des énergies fossiles 14

Production du dihydrogène par décomposition de l'eau 14

Production directe à partir de la biomasse 16

DISTRIBUTION ET STOCKAGE DU DIHYDROGÈNE 17

Les réseaux de distribution 18

Le stockage du dihydrogène 19

LA PILE À COMBUSTIBLE 21

Une technologie d'avenir déjà ancienne 22

Les différentes filières technologiques 24

DEMAIN, L'HYDROGÈNE AU QUOTIDIEN ? 25

Une mise en place progressive 26

Le dihydrogène en toute sécurité 26





Nouveaux matériaux, tests, développement de technologies : le système dihydrogène-pile à combustible alimentera bientôt nombre de nos équipements.

“L’hydrogène comme vecteur énergétique représente aujourd’hui un enjeu majeur, tant scientifique, qu’environnemental et économique.”

Introduction

Il y a plus d’un siècle, Jules Verne écrivait dans « L’Île mystérieuse » qu’un jour l’eau serait employée comme source de combustible :

« *L’hydrogène et l’oxygène, qui la constituent, utilisés isolément ou simultanément, fourniront une source de chaleur et de lumière inépuisables.* » Aujourd’hui, ce qu’on appelle abusivement le « moteur à eau » n’est plus tout à fait un rêve d’écrivain. Grâce au dihydrogène, qui peut être produit à partir de l’eau et qui, en brûlant dans l’air, produit lui-même de l’eau, la réalité est sur le point de rejoindre la fiction. Il est désormais au cœur de recherches internationales. Mais pourquoi tant d’attentes autour du dihydrogène ?

Dominé par les énergies fossiles (pétrole, gaz, charbon), notre système énergétique actuel fait planer une double menace sur notre environne-

ment : il expose la planète à l’épuisement de ses réserves naturelles et contribue à l’effet de serre. Si nous voulons un développement durable pour les générations futures, il devient nécessaire de diversifier nos modes de production d’énergie. Certes, le dihydrogène n’est pas une source d’énergie mais un vecteur : il doit lui-même être produit dans un premier temps. Mais il a un double avantage : il est à la fois inépuisable et non polluant. Il devrait donc jouer, à l’avenir, un rôle très important.

Les technologies de l’hydrogène font l’objet de programmes de recherches au CEA depuis la fin des années 1990. Elles contribuent au développement des énergies nouvelles et reposent notamment sur des savoir-faire en termes de matériaux, de procédés hautes températures et hautes pressions, et d’intégration.

La nomenclature chimique a évolué.

On emploie « hydrogène » pour l’élément et « dihydrogène » pour le gaz. Il en est de même pour l’oxygène.

LÉGER, ABONDANT ET ÉNERGÉTIQUE...
FACE À LA DEMANDE MONDIALE D'ÉNERGIE, IL SERA L'ACTEUR
INCONTOURNABLE DU XXI^E SIÈCLE.

Caractéristiques de l'hydrogène



1766

Le chimiste britannique Henry Cavendish parvient à isoler une étrange substance gazeuse qui, en brûlant dans l'air, donne de l'eau : le dihydrogène.

1781

Appelé jusqu'alors "air inflammable", l'hydrogène doit son nom au chimiste français Antoine-Laurent de Lavoisier, qui effectue la synthèse de l'eau.

1766

Le Français Louis-Joseph Gay-Lussac et l'Allemand Alexander von Humboldt démontrent conjointement que l'eau est composée d'un volume de dioxygène pour deux volumes de dihydrogène.

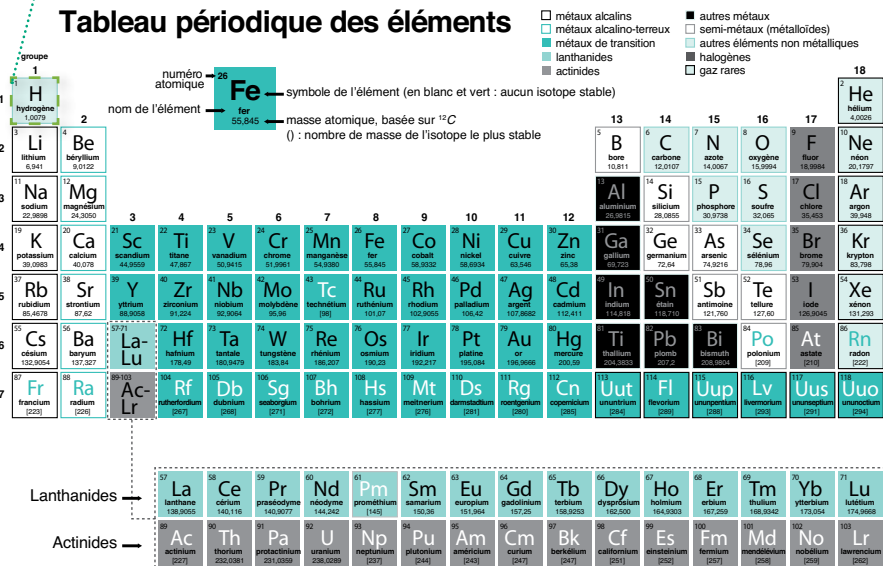
L'histoire du dihydrogène et de la pile à combustible



L'HYDROGÈNE : PREMIER DE LA CLASSE

De tous les éléments chimiques, l'hydrogène est le plus léger car il possède la structure atomique la plus simple : son noyau se compose d'un unique proton et son atome ne compte qu'un électron. Il tient donc la première place dans la classification périodique de Mendeleïev. Chronologiquement, l'hydrogène est d'ailleurs

Tableau périodique des éléments



1839

L'Anglais William R. Grove découvre le principe de la pile à combustible : il s'agit d'une réaction chimique entre le dihydrogène et le dioxygène avec production simultanée d'électricité, de chaleur et d'eau.

1939-1953

L'Anglais Francis T. Bacon fait progresser les générateurs chimiques d'électricité, qui permettent la réalisation du premier prototype industriel de puissance.

1960

À partir de cette date, la Nasa utilise la pile à combustible pour alimenter en électricité ses véhicules spatiaux (capsules Apollo et Gemini).

L'histoire du dihydrogène et de la pile à combustible



l'ancêtre de tous les autres éléments. Présents dès les premiers instants de l'Univers, les noyaux d'hydrogène ont fusionné dans les étoiles pour donner naissance à des noyaux plus lourds et plus complexes.

UNE PETITE MOLÉCULE PLEINE D'ÉNERGIE

La molécule de dihydrogène est constituée de deux atomes d'hydrogène (H_2). Sa combustion avec le dioxygène (O_2) ne produit que de l'eau (H_2O) : $2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O$.

Inodore, inodore, non corrosif, le dihydrogène a l'avantage d'être particulièrement énergétique. La combustion de 1 kg de ce gaz libère environ 3 fois plus d'énergie qu'1 kg d'essence (soit 120 MJ/kg contre 45 MJ/kg pour l'essence).

Millions de joules. Le joule est l'unité d'énergie.

En revanche, comme ce gaz est très peu dense, il occupe, à masse égale, un volume bien plus grand qu'un autre. Ainsi, pour produire autant d'énergie qu'avec 1 litre d'essence, il faut 4,6 litres de dihydrogène comprimé à 700 bars. Ces volumes importants sont une contrainte pour le transport et le stockage sous forme gazeuse. Comme de nombreux combustibles, le dihydrogène peut s'enflammer ou exploser au contact de l'air. Il doit donc être utilisé avec précaution. Toutefois la petitesse de ses molécules lui permet de diffuser très rapidement dans l'air (quatre fois plus vite que le gaz naturel), ce qui est un facteur positif pour la sécurité.

PRÉSENT PARTOUT... MAIS DISPONIBLE NULLE PART

Bien que l'hydrogène soit très abondant à la surface de notre planète - l'eau couvre 70 % du globe terrestre - il n'existe jamais à l'état pur. Le dihydrogène pourrait être utilisé comme source quasi-inépuisable d'énergie... à condition de savoir le produire en quantité suffisante.

On trouve également de l'hydrogène dans les hydrocarbures qui, comme leur nom l'indique, sont issus de la combinaison d'atomes de carbone et d'hydrogène. Enfin, tout organisme vivant, animal ou végétal, est composé d'hydrogène : la biomasse est donc une autre source potentielle d'hydrogène.

Pétrole, gaz naturel...

COMBINÉ À L'ÉLECTRICITÉ, LE DIHYDROGÈNE OBTENU À PARTIR DE SOURCES D'ÉNERGIES BAS CARBONE PRENDRA UNE PLACE CROISSANTE DANS DE NOMBREUSES APPLICATIONS.

Les enjeux d'une économie de l'hydrogène



CI-CONTRE : Piles à combustible souples visant l'alimentation de nombreuses applications portables (micro, lecteurs CD...).

EN DESSOUS : Le dihydrogène à l'état liquide : le carburant incontournable de la propulsion spatiale.

“Le dihydrogène est le parfait complément des énergies renouvelables, qui sont intermittentes.”

DIHYDROGÈNE ET COMBUSTIBLES FOSSILES

Le XIX^e siècle, marqué par l'utilisation du charbon, a vu le dihydrogène trouver un emploi dans les systèmes d'éclairage et de chauffage de certaines villes. Il provenait de la « distillation » de la houille effectuée pour obtenir le **coke** et se trouvait alors mélangé à d'autres

Carbone quasi-pur, sous-produit des cokeries qui alimentaient les usines chargées de produire de l'acier.

gaz comme le monoxyde de carbone. Au cours du

XX^e siècle, avec l'apparition du gaz naturel et surtout du pétrole, le dihydrogène n'a plus guère été utilisé pour fournir de l'énergie, si ce n'est dans le domaine de la propulsion de certaines fusées (Ariane 5 par exemple).

Charbon, pétrole et gaz naturel ont longtemps été les principales sources d'énergie primaire. Mais leurs combustions chargent notre atmosphère en gaz à effet de serre et leur épuisement futur est inévitable. Cela conduit à imaginer leur remplacement par des sources qui permettront de produire, dans un premier temps, de l'énergie électrique. Celle-ci ne pouvant être stockée facilement, il deviendra alors intéressant de s'en servir pour produire du dihydrogène qui sera utilisé à la demande, en fonction des besoins. La filière hydrogène de demain ne sera donc pas celle d'hier. À l'avenir, il permettra de produire





Aujourd'hui, la production de dihydrogène représente à peine 10 % des besoins annuels en énergie des seuls transports.

de la chaleur mais également de l'électricité, grâce à la pile à combustible (lire p. 21), voire des carburants liquides ou gazeux de synthèse.

UNE INSERTION DANS LE MIX ÉNERGÉTIQUE

La production actuelle d'énergie électrique est principalement assurée en France par des réacteurs nucléaires et des barrages hydroélectriques. Ceux-ci fournissent la base de la consommation moyenne et doivent faire face aux **pics de consommation**. En complément,

Qui adviennent à certaines heures et à certaines périodes de l'année.

on a recours à des centrales thermiques au fioul ou au charbon.

On pourrait éviter d'utiliser ces énergies fossiles pour favoriser une filière basée sur l'hydrogène (voir p. 13).

De même, la production d'énergie électrique à l'aide de sources renouvelables est intermittente. La production de dihydrogène, lorsque ces sources fonctionnent à plein, et la restitu-



Le dihydrogène peut aussi être généré dans des plateformes solaires thermiques à concentration.

tion de l'énergie ainsi stockée lorsque la demande est maximale, permettrait d'optimiser l'usage de ces sources en lieu et place de celles émettant des gaz à effet de serre.

UNE SOLUTION POUR LES LIEUX DE CONSOMMATION ISOLÉS

L'acheminement de l'énergie électrique dans les lieux isolés (vallées reculées, îles...) est parfois difficile. Il devient alors intéressant de produire cette énergie électrique sur place grâce à de petites unités d'énergies renouvelables (photovoltaïque et éolien) avec un système de production, stockage et conversion de dihydrogène (pile à combustible). Cette solution peut vite se révéler moins onéreuse et plus performante que celle utilisant des batteries, suivant les cas.

DE NOMBREUSES APPLICATIONS

Notre dépendance aux combustibles fossiles est criante dans le domaine des transports, avec 95 % des besoins couverts par le pétrole. De nouveaux véhicules fonctionnant avec du dihydrogène sont à l'étude ou existent déjà en tant que prototypes. Deux options de motorisation existent : le moteur thermique classique à explosion ; le moteur électrique alimenté par une pile à combustible consommant du dihydrogène. Dans les deux cas, ces véhicules ne rejettent que de l'eau dans l'atmosphère.

PLATE-FORME MYRTE



© PAVANIAN/CEA

Installée en Corse, la plate-forme Myrte (Mission hydrogène renouvelable pour l'intégration au réseau électrique) utilise le principe de stockage de l'énergie renouvelable intermittente via le vecteur hydrogène.

Ce démonstrateur stocke l'énergie photovoltaïque grâce à un électrolyseur qui la transforme en énergie chimique, en décomposant les molécules d'eau en dihydrogène et dioxygène pendant les heures de faible consommation. Cette énergie est ensuite restituée au réseau par une pile à combustible de 100 kW (qui recompose des molécules d'eau par un transfert d'électrons générant de l'énergie électrique) pendant les heures de forte consommation, en particulier le soir alors que les panneaux photovoltaïques ne fonctionnent plus.

La plate-forme 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.

* kWc (kilowatt-crête) est une unité de mesure représentant la puissance maximale d'un dispositif.

On notera que le moteur électrique permet d'augmenter très significativement le rendement de la motorisation (km parcouru / kg de dihydrogène).

La pile à combustible est promise à un bel avenir. Outre ses applications dans le transport, elle peut être miniaturisée et servir de chargeur pour des appareils nomades, tels que téléphone, ordinateur... (voir p. 21).

Si le dihydrogène issu du gaz de synthèse ou du reformage de certains hydrocarbures a déjà de nombreuses applications, pour les industries chimiques et pétrochimiques, son introduction dans le mix énergétique ne présente un véritable intérêt que lorsqu'il est produit à partir des énergies bas carbone (énergies renouvelables ou énergie nucléaire).

Dans le cas des énergies renouvelables, il pallie efficacement leur **intermittence** en stockant

Alternance jour/nuit pour le solaire, vents irréguliers pour l'éolien.

sous forme chimique l'énergie excédentaire produite lors des périodes de forte production et/ou de faible consommation. Dans le cas de l'énergie d'origine

nucléaire, il peut venir au secours d'une production mal adaptée à la gestion des pics de consommation.

Stockable dans des conditions acceptables de sécurité et transportable, le dihydrogène sert d'étape intermédiaire entre la production et la consommation d'électricité.

Son avenir est aussi dans la décentralisation de la production d'énergie électrique, induite par l'utilisation de sources renouvelables de petite ou moyenne taille éparpillées sur de vastes territoires à faible densité de population. Cette perspective est actuellement expérimentée dans le projet éolien-dihydrogène d'Utsira en Norvège ou le projet solaire-dihydrogène Myrte, en Corse (cf encadré).

Mais avant que le dihydrogène n'entre dans la vie quotidienne, des progrès doivent être faits à chaque étape de la filière : production avec une faible empreinte carbone, transport à un coût raisonnable, stockage avec des contraintes de densité énergétique compatibles avec les utilisations visées, conversion.

LE DIHYDROGÈNE PEUT ÊTRE PRODUIT À PARTIR DE
DIFFÉRENTES SOURCES D'ÉNERGIE.

Modes de production du dihydrogène



Nous l'avons vu, le dihydrogène n'est pas directement disponible dans la nature. Il a cependant l'avantage de pouvoir être produit à partir des trois grandes sources que sont les énergies fossiles, nucléaire et renouvelables. Mais pour être économiquement et écologiquement viable, la production de dihydrogène doit répondre à trois critères :

- la compétitivité : les coûts de production ne doivent pas être trop élevés ;
- le rendement énergétique : la production ne doit pas nécessiter trop d'énergie ;
- la propreté : le processus de fabrication doit être non polluant, sous peine d'annuler l'un des principaux atouts du dihydrogène.

Une part de la production mondiale de dihydrogène est utilisée pour le raffinage du pétrole.



© EyeWire

“Compétitivité, rendement énergétique et propreté sont des critères à prendre en compte dans la production de dihydrogène.”

Plusieurs méthodes sont aujourd'hui parfaitement opérationnelles, mais aucune ne répond simultanément à ces trois critères. De nouvelles voies prometteuses sont en cours d'élaboration.

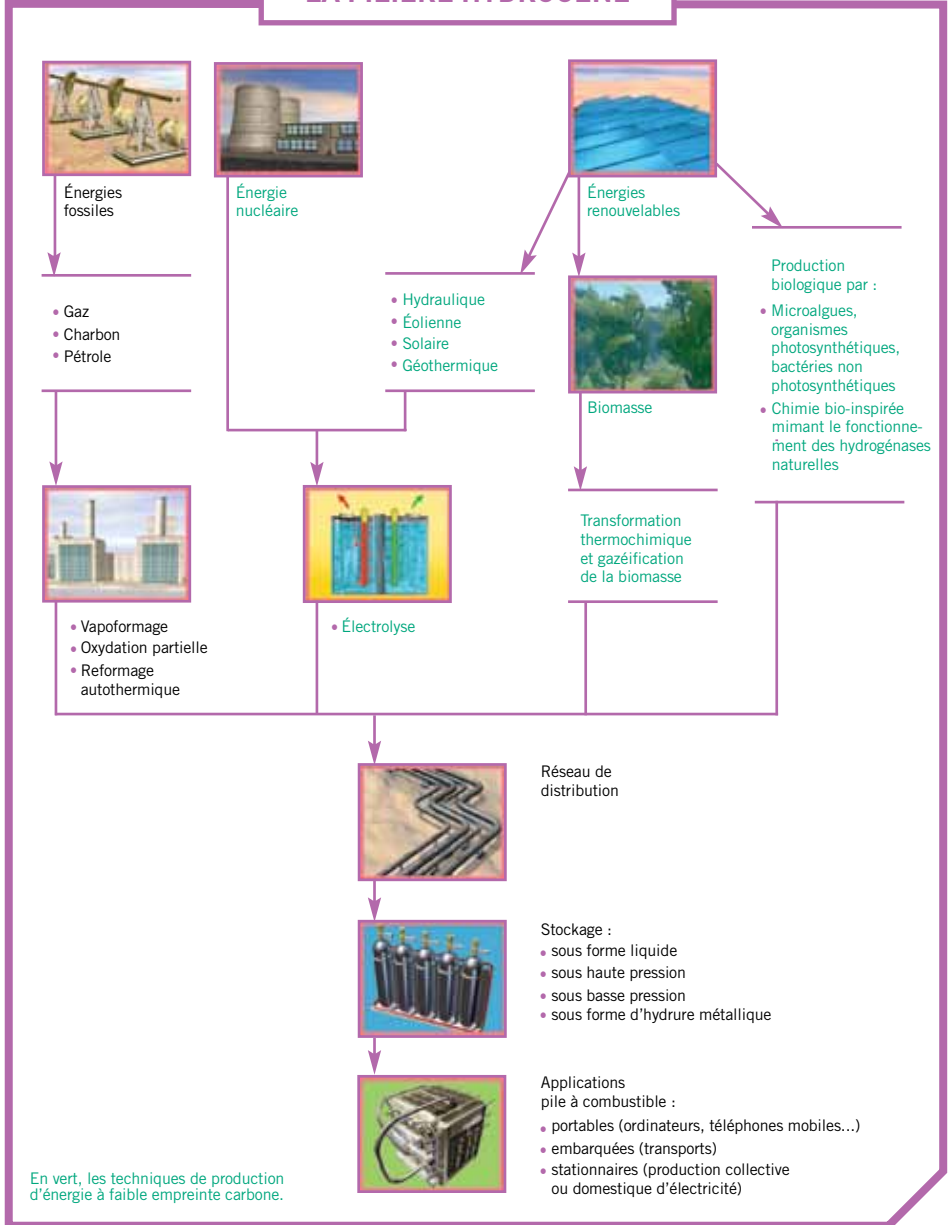
LA PRODUCTION ACTUELLE DE DIHYDROGÈNE

Actuellement, si le dihydrogène n'est quasiment pas utilisé dans le domaine de l'énergie, il est une des matières de base de l'industrie chimique et pétrochimique. Il est utilisé notamment pour la production d'ammoniac et de méthanol, et le raffinage du pétrole. Il est également employé dans les secteurs de la métallurgie, de l'électronique, de la pharmacologie ainsi que dans le traitement de produits alimentaires. Pour couvrir ces besoins, 50 millions de tonnes de dihydrogène sont déjà produits chaque année. Mais si ces 50 millions de tonnes devaient servir à la production d'énergie, elles ne représenteraient qu'1,5 % de la demande mondiale. Utiliser le dihydrogène comme **vecteur énergétique** suppose donc d'augmen-

Un vecteur énergétique, à la différence d'une source d'énergie, transporte de l'énergie.

ter radicalement sa production.

LA FILIÈRE HYDROGÈNE



Usine de vaporeformage



PRODUCTION DE DIHYDROGÈNE À PARTIR DES ÉNERGIES FOSSILES

Aujourd'hui, 95 % du dihydrogène est produit à partir des combustibles fossiles par reformage : cette réaction chimique casse les molécules d'hydrocarbure sous l'action de la chaleur pour en libérer le dihydrogène. Le vaporeformage du gaz naturel est le procédé le plus courant : le gaz naturel est exposé à de la vapeur d'eau très chaude, et libère ainsi le dihydrogène qu'il contient. Mais la production de dihydrogène par reformage a l'inconvénient de rejeter du gaz carbonique (CO₂), principal responsable de l'effet de serre dans l'atmosphère. Pour éviter cela, sa production à partir de combustibles fossiles supposerait donc d'emprisonner le gaz carbonique par des techniques qui doivent faire l'objet de développements (on envisage, par

exemple, de réinjecter le gaz carbonique dans les puits de pétrole épuisés).

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). Le dihydrogène produit à partir du gaz naturel est le procédé le moins cher. Mais son prix de revient reste le triple de celui du gaz naturel.

PRODUCTION DE DIHYDROGÈNE PAR DÉCOMPOSITION DE L'EAU

Une voie possible consiste à dissocier les atomes de dioxygène et de dihydrogène combinés dans les molécules d'eau (selon la réaction H₂O → H₂ + 1/2 O₂). Cette solution est la plus intéressante en terme d'émission de gaz à effet de serre... à condition toutefois d'opérer cette dissociation à partir de sources d'énergie elles

“Utiliser le dihydrogène comme vecteur énergétique implique d’augmenter radicalement sa production.”

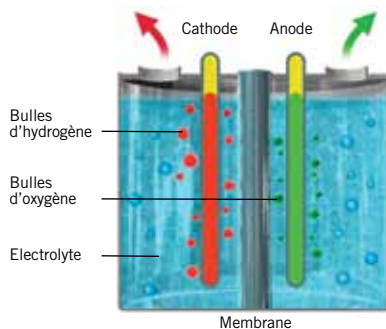
mêmes **non émettrices de CO₂**. Parmi les procédés envisageables, deux sont actuellement à l’étude : l’électrolyse et la dissociation de la molécule d’eau par cycles thermochimiques.

L’électrolyse permet de décomposer chimiquement l’eau en dioxygène et dihydrogène sous l’action d’un courant électrique. La production de dihydrogène par électrolyse peut se faire dans de petites unités réparties sur le territoire national. Pour être rentable, ce procédé exige de pouvoir disposer de courant électrique à très faible coût. Actuellement, la production de dihydrogène par électrolyse coûte 3 à 4 fois plus cher que la production par reformage du gaz naturel. Elle souffre de plus d’un mauvais rendement global. L’électrolyse à haute température, qui est une variante du procédé d’électrolyse disponible aujourd’hui, permettrait

Énergies renouvelables ou énergie nucléaire.

cedés envisageables, deux sont actuellement à l’étude :

ÉLECTROLYSE



Une cellule d’électrolyse est constituée de deux électrodes (anode et cathode) plongées dans un électrolyte (solution conductrice d’ions) et reliées à un générateur de courant.

En faisant circuler un courant électrique, on obtient une réaction chimique par laquelle l’eau se décompose en ses deux composants : oxygène et hydrogène.

d’obtenir de meilleurs rendements. Le prix du dihydrogène produit par des électrolyseurs industriels peut fluctuer entre 5 et 30€/kg d’H₂ suivant le prix de l’électricité.

L’autre procédé de décomposition de la molécule d’eau par cycles thermochimiques permet d’opérer la dissociation de la molécule à des températures de l’ordre de 800 °C à 1 000 °C. Mis à l’étude dans le but de récupérer l’énergie thermique actuellement perdue dans les centrales nucléaires (via les circuits de refroidissement), son intérêt économique n’est pas démontré et son emploi n’est plus envisagé en France.



© G. Le Saëchel/CEA

Certains microorganismes (microalgues et cyanobactéries) ont la capacité de produire naturellement des molécules à forte teneur énergétique.

PRODUCTION DIRECTE À PARTIR DE LA BIOMASSE

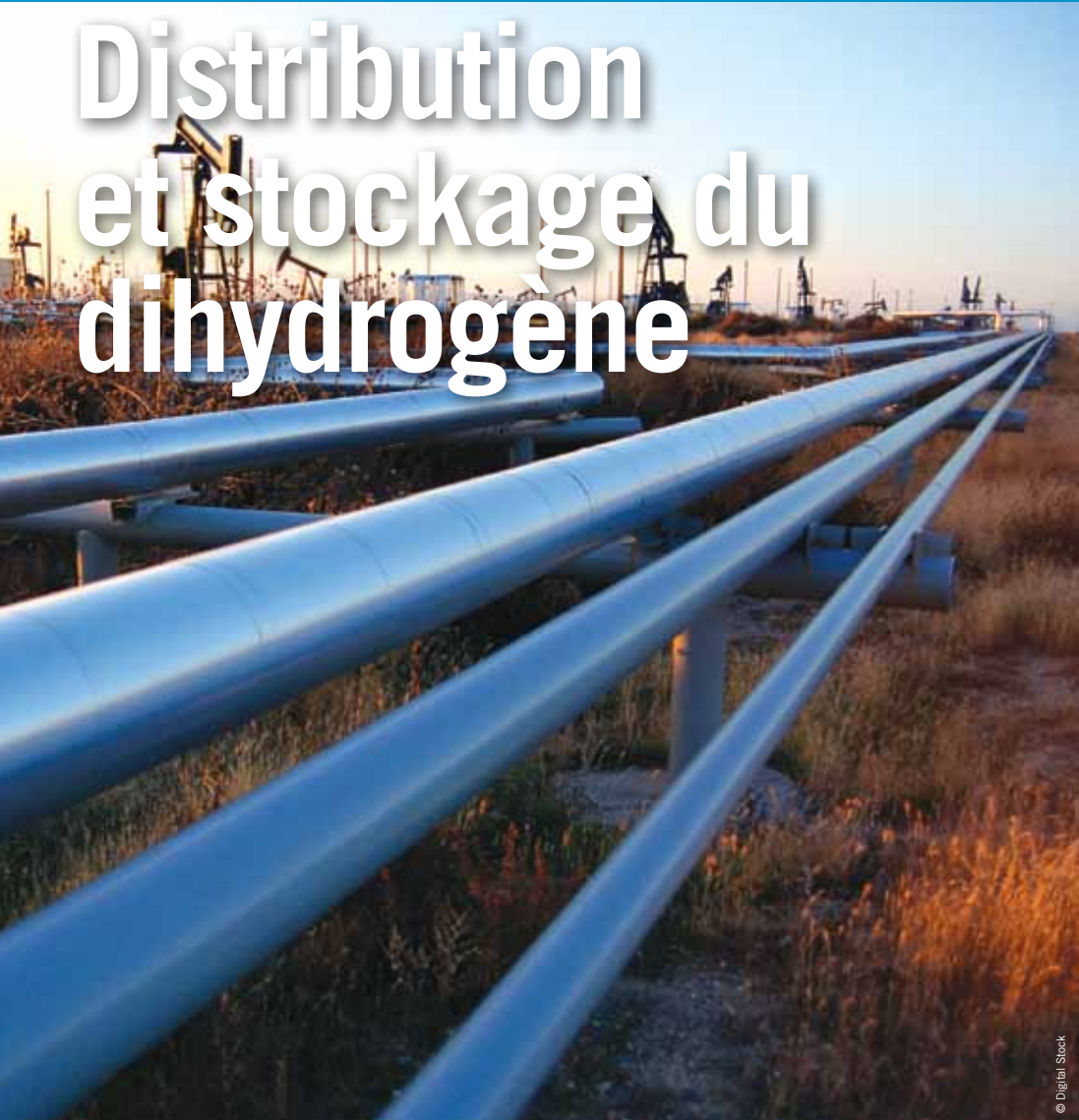
La biomasse est constituée de tous les végétaux (bois, paille, etc.) qui se renouvellent à la surface de la Terre. Elle constitue une source potentielle importante de dihydrogène : on obtient, par gazéification, un mélange ($\text{CO} + \text{H}_2$) que l'on purifie ensuite. Cette solution est attrayante car la quantité de CO_2 émise au cours de la conversion de la biomasse en hydrogène est à peu près équivalente à celle provenant de la photosynthèse ; l'écobilan est donc nul.

On cherche actuellement à faire produire du dihydrogène par des microalgues ou des bactéries qui utilisent la lumière et des enzymes spécifiques : les hydrogénases. De telles recherches sont menées sur la plate-forme HéliBioTEC, au centre CEA Cadarache.

Une autre voie de recherche prometteuse consiste à mimer chimiquement les réactions impliquant ces hydrogénases, pour développer des réacteurs chimiques bio-inspirés de production de dihydrogène.

METTRE EN PLACE UNE ÉCONOMIE DU DIHYDROGÈNE SUPPOSE
QU'IL SOIT DISPONIBLE À TOUT MOMENT
ET EN TOUT POINT DU TERRITOIRE.

Distribution et stockage du dihydrogène





© Total/FinatEif

Les stations pilotes d'approvisionnement en dihydrogène se développent. Ici, une station Total en Allemagne.

“ Développer des technologies de stockage adaptées implique de prendre en compte les caractéristiques physico-chimiques du dihydrogène. ”

Pour que le dihydrogène puisse réellement devenir le vecteur énergétique de demain, un vaste réseau de distribution devra cependant se mettre en place (par pipelines, réservoirs rechargeables...) afin de permettre toutes les utilisations. Il devra être disponible à tout moment, en tout point du territoire. Mettre au point des modes de transport, de stockage et de distribution compatibles avec les faibles usages représente donc un enjeu crucial.

LES RÉSEAUX DE DISTRIBUTION

Dans les schémas actuels, la logique de distribution industrielle est en général la suivante : le dihydrogène est produit dans des unités centralisées, puis utilisé sur site ou transporté par pipelines. Ces réseaux permettent de connecter les principales sources de production aux principaux points d'utilisation (actuellement l'industrie chimique).

Des réseaux de distribution de dihydrogène par pipelines existent déjà dans différents pays pour approvisionner les industries chimiques et pé-

trochimiques (environ 1 500 km en Europe de l'ouest et 1 150 km aux États-Unis). La réalisation de ces infrastructures industrielles démontre que l'on dispose d'une bonne maîtrise de la génération et du transport de dihydrogène. Un bémol cependant : le coût du transport est environ 50 % plus cher que celui du gaz naturel, et à volume et pression égales, le dihydrogène transporte trois fois moins d'énergie que le gaz naturel.

Pour distribuer le dihydrogène aux utilisateurs, des infrastructures de ravitaillement devront être développées. La mise au point de stations-service ne semble pas poser de problèmes techniques particuliers.

Une quarantaine de stations pilotes existe d'ailleurs déjà dans le monde, en particulier aux États-Unis, au Japon, en Allemagne et en Islande.

Il faudra cependant du temps pour que ces stations-service maillent tout le territoire, ce qui freine aujourd'hui le développement du dihydrogène dans les transports.

LE STOCKAGE DU DIHYDROGÈNE

Le dihydrogène ne peut jouer son rôle de vecteur d'énergie que si l'on peut le stocker efficacement, pour un coût limité et dans des conditions de sécurité acceptables.

Le risque de fuite de dihydrogène doit être pris en considération, compte tenu du caractère inflammable et explosif de ce gaz dans certaines conditions. Or, en raison de la petite taille de sa molécule, il est capable de traverser de nombreux matériaux, y compris certains métaux. De plus, il en fragilise certains en les rendant cassants. Différents modes de stockage doivent être envisagés selon l'utilisation qui en sera faite : industrielle, domestique, mobile ou nomade.

STOCKAGE SOUS FORME LIQUIDE À BASSE PRESSION

C'est le moins coûteux et le plus abouti des procédés (par kWh) pour stocker de grosses quantités de dihydrogène. Les réservoirs actuels conditionnent le dihydrogène à -253 °C sous 10 bars. Pour les applications transport, des réservoirs ont été mis au point, permettant le stockage de 12 kg de H_2 pour les petits réservoirs des voitures.

Le principal inconvénient de ce procédé est l'impossibilité d'éviter les fuites : même très bien isolés, les réservoirs absorbent de la chaleur qui vaporise lentement le liquide. Il faut alors laisser s'échapper le gaz obtenu pour éviter que la pression n'augmente trop. Le stockage en milieu confiné, comme dans les parkings, est ainsi rendu problématique.

STOCKAGE GAZEUX SOUS BASSE PRESSION

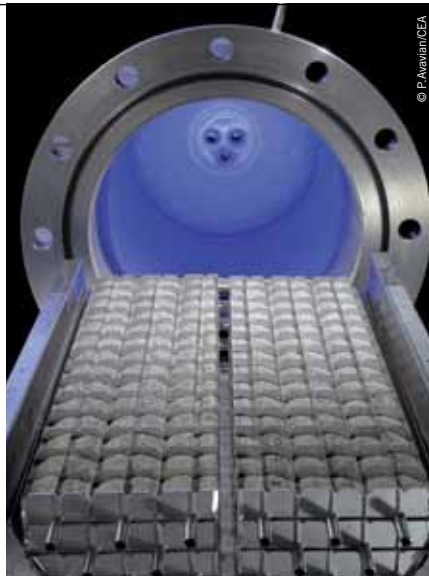
Lorsqu'il n'est pas nécessaire de réduire le volume de stockage (comme dans une maison disposant d'un vaste sous-sol), on peut envisager celui-ci sous forme gazeuse à une pression relativement basse (75 bars). Dans ce cas, la réserve de dihydrogène est régulièrement reconstituée par un dispositif de production *in situ* (électrolyse) alimenté par une source d'énergie renouvelable. Ce moyen de stockage est peu coûteux et parfaitement maîtrisé.

Réservoir de stockage de 15 kg de dihydrogène implanté sur une plate-forme de tests.





© P. Strope/CEA



© P. Avellan/CEA

À GAUCHE : Mise au point du tissage-bobinage pour les liners. À DROITE : Stockage sous forme d'hydrures métalliques.

STOCKAGE GAZEUX SOUS HAUTE PRESSION

Afin d'atteindre une densité d'énergie satisfaisante tout en évitant les inconvénients liés aux très basses températures nécessaires au stockage à l'état liquide, on cherche à développer le stockage à l'état gazeux sous haute pression (700 bars). À ce niveau de compression, 4,6 litres de dihydrogène comprimé sont encore nécessaires pour produire autant d'énergie qu'avec 1 litre d'essence. La R&D actuelle porte sur des réservoirs qui allient l'imperméabilité aux molécules de dihydrogène à la résistance aux hautes pressions et aux chocs. La partie interne du réservoir (le liner), assurant le confinement du dihydrogène, est réalisée en polymère selon un procédé innovant de

De la famille des plastiques.

synthèse et transformation simultanées. La coque composite externe assure quant à elle la résistance et la protection mécaniques. Elle est constituée par

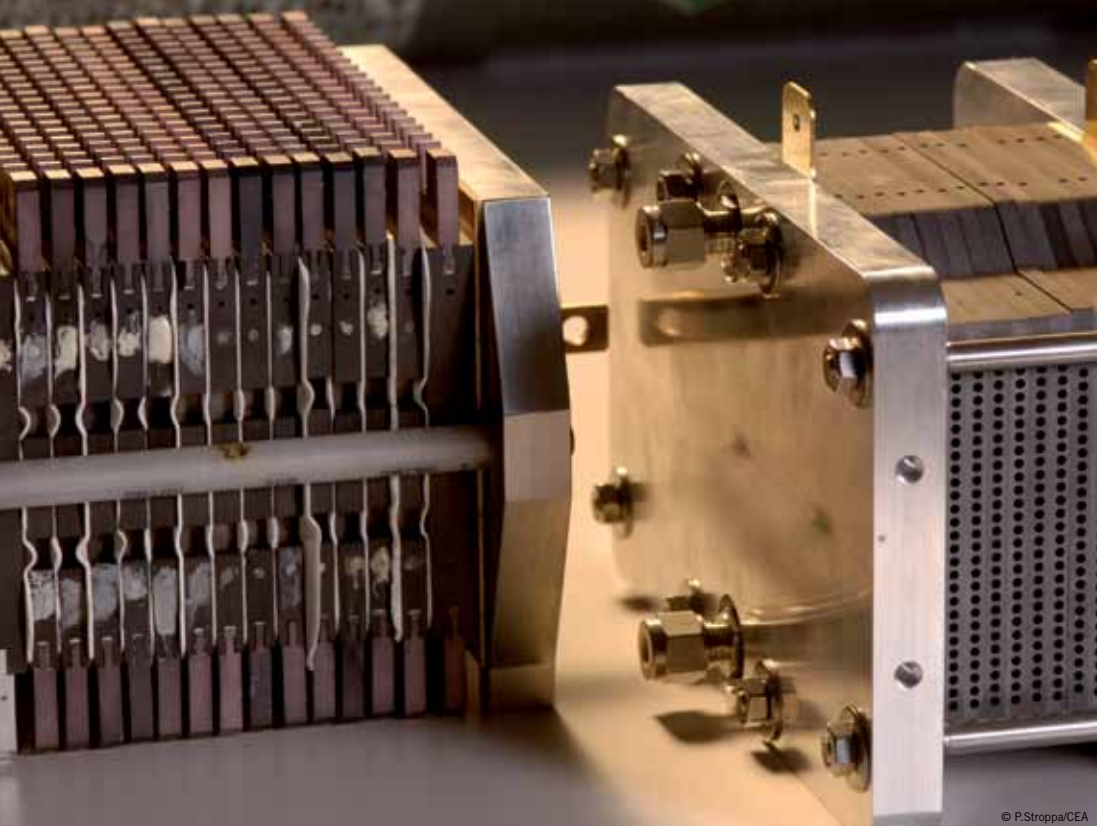
enroulement filamentaire et utilise des matériaux issus de l'aéronautique comme les fibres de carbone haute résistance.

STOCKAGE SOUS FORME D'HYDRURES À BASSE PRESSION

La molécule de dihydrogène présente une affinité chimique pour de nombreux corps et peut soit s'adsorber sur un support organique ou composé de nanotubes de carbone, soit former des composés chimiques nommés hydrures (sur des métaux tels que les alliages de nickel, titane et magnésium), de manière réversible. Selon la nature du support, la température et la pression de stockage et de restitution sont variables, mais jamais excessives. La R&D dans ce domaine permettra de disposer dans un avenir proche de procédés de stockage variés et adaptés à leur usage (toute application à faible contrainte sur le poids : stationnaire, engins spéciaux...).

ELLE REPRÉSENTE UN DOMAINE POTENTIEL DE
PRODUCTION D'ÉLECTRICITÉ ALLANT DE
QUELQUES WATTS À DES MILLIONS DE WATTS.

La pile à combustible



UNE TECHNOLOGIE D'AVENIR DÉJÀ ANCIENNE

Le développement de la filière hydrogène repose en grande partie sur la technologie de la pile à combustible (PAC). Son principe n'est pas nouveau, puisqu'il fut découvert dès 1839 par William R. Grove. À l'époque, cet avocat anglais, chercheur amateur en électrochimie, constate qu'en recombinaison du dihydrogène et du dioxygène, il est possible de créer simultanément de l'eau, de la chaleur et de l'électricité. La pile à combustible est née.

C'est Francis T. Bacon, ingénieur, qui réalisera, en

1953, le premier prototype industriel de puissance notable (de l'ordre du kW). Mais seule la Nasa exploitera cette technologie, dans les années 60, pour fournir en électricité certains de ses vaisseaux Gemini et Apollo.

Car si le principe de la PAC paraît simple, sa mise en œuvre est complexe et coûteuse, ce qui interdisait jusqu'alors sa diffusion dans le grand public. Aujourd'hui, des progrès ont été réalisés et les applications envisageables sont nombreuses. De la microPAC, qui ne produit que les quelques watts nécessaires à l'alimentation d'un téléphone mobile, à la pile capable

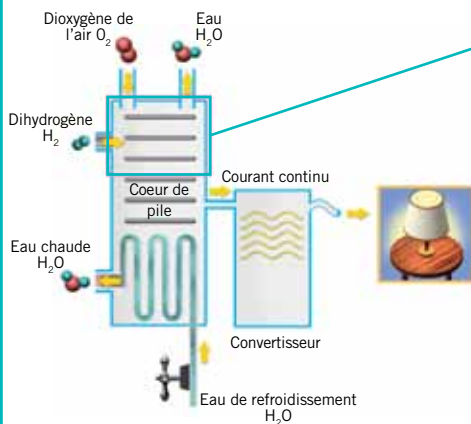
Exemple d'utilisation d'une pile à combustible: Roller Pac, un groupe électrogène de 2 kW, dans une intervention de secours.



© Airstar/Phii Design

PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DE LA PILE À COMBUSTIBLE

La pile à combustible fonctionne sur le mode inverse de l'électrolyse de l'eau. Tandis que l'électrolyse décompose l'eau en dihydrogène et en dioxygène sous l'action d'un courant électrique, la pile à combustible recombine le dihydrogène et le dioxygène en créant un courant électrique.



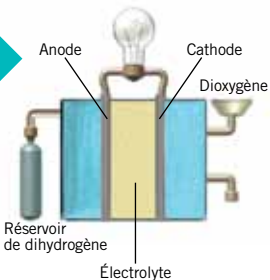
de produire 1 MW pour fournir de l'électricité à un immeuble collectif, en passant par la pile destinée aux applications embarquées, dans le secteur des transports, il en existe désormais toute une gamme. Le principe de fonctionnement est toujours le même, mais différentes technologies sont en développement suivant la nature du combustible envisagé (hydrogène ou méthanol, gaz naturel, ammoniac, etc) et suivant la température de fonctionnement optimale.



© PhotoDisc

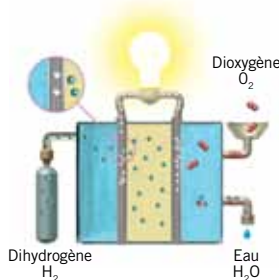
1

La pile à combustible se compose de multiples cellules électrochimiques constituées de deux électrodes (une anode qui est la borne négative et une cathode qui est la borne positive) séparées par un électrolyte (liquide ou solide permettant le transfert d'ions entre les électrodes).

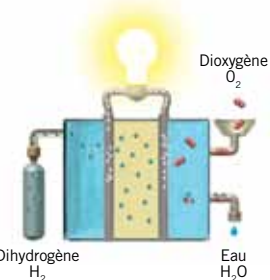


2

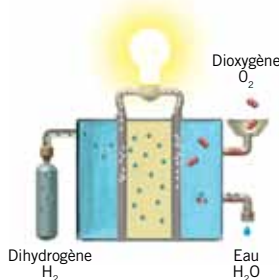
L'anode de la pile est alimentée en dihydrogène ; la cathode est alimentée en dioxygène. À l'anode, les molécules de dihydrogène se dissocient et libèrent des électrons : le dihydrogène est oxydé.



Tandis que les ions H^+ passent par l'électrolyte, les électrons sont contraints de circuler dans un circuit externe et créent ainsi un courant électrique.



À la cathode, où arrivent les électrons, les ions H^+ et les atomes de dioxygène se combinent pour former de l'eau. C'est une réduction du dioxygène. La réaction produit également de l'énergie thermique qui peut être récupérée.



3

4

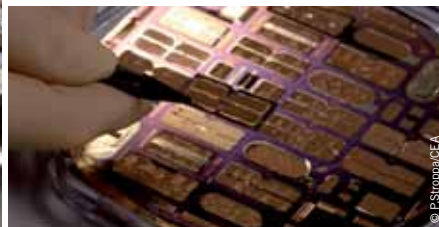
PEMFC, SOFC, microPAC, toutes les piles à combustible sont testées en laboratoire.



© P.Stroppa/CEA



© P.Anavan/CEA



© P.Stroppa/CEA

LES DIFFÉRENTES FILIÈRES TECHNOLOGIQUES

Il existe plusieurs types de piles à combustible qui se différencient par leur **électrolyte**. Celui-ci définit la température de fonctionnement et donc les applications.

Substance conductrice chargée de véhiculer les ions.

Plusieurs types de combustibles sont envisageables : dihydrogène, gaz de synthèse, gaz naturel, gaz issus de la biomasse, alcools. Selon l'origine du combustible, les PAC peuvent, ou non, émettre des gaz à effet de serre. La R&D porte actuellement sur les améliorations techniques (compacité, rendement énergétique, résistance à l'usure, fonctionnement sur de nombreux cycles...) ainsi que sur la baisse des coûts de production. Les deux principales familles étudiées au CEA sont :

- La pile à membrane échangeuse de protons (PEMFC) fonctionne aux alentours de 100 °C avec un électrolyte en polymère. C'est la plus promet-

teuse pour les transports, et la plus développée. On est actuellement au stade pré-industriel avec des coûts de l'ordre de 1 000 €/kW. L'enjeu des recherches est de faire passer ce coût en dessous de 50 €/kW.

Deux variantes, la pile à méthanol direct et la pile à éthanol direct, consomment directement l'hydrogène contenu dans l'alcool. Très compactes, elles sont promises à l'alimentation de la micro-électronique (chargeurs) et de l'outillage portatif.

- La pile à oxyde solide (SOFC) est séduisante pour les applications **stationnaires**, car sa température de fonctionnement très élevée (de l'ordre de 800 °C) permet d'utiliser directement le gaz naturel sans reformage. De plus, la chaleur résiduelle peut être exploitée à son tour directement, ou servir à produire de l'électricité par le biais d'une turbine à gaz. Dans ce cas, le rendement global (électrique et thermique) pourrait dépasser 80 %.

Qui ne supposent pas de déplacement.

DES NORMES DE SÉCURITÉ POUR LA PRODUCTION,
LE STOCKAGE, LE TRANSPORT ET LES UTILISATIONS DE
L'HYDROGÈNE SONT EN COURS D'ÉLABORATION.

Demain, l'hydrogène au quotidien ?



UNE MISE EN PLACE PROGRESSIVE

Piles à combustible, réservoirs de stockage, véhicules, stations d'approvisionnement : de nombreux prototypes existent déjà.

Les défis techniques, qui accompagnent l'usage du dihydrogène comme vecteur d'énergie, rendent nécessairement progressive son émergence dans nos vies quotidiennes. Pourtant, les modes de productions se diversifient, des solutions de transport et de stockage prennent forme et des utilisations variées voient actuellement le jour. En réponse à l'intermittence des énergies renouvelables, il équipera dans un avenir proche des maisons autonomes ou des villages isolés : si trop d'énergie électrique est produite grâce aux éoliennes ou aux capteurs solaires, le dihydrogène produit par électrolyse de l'eau la stocke sous forme chimique, pour la restituer grâce à une pile à combustible.

Source de courant privilégié, il peut désormais assurer la propulsion de véhicules électriques qui circuleront demain, dès lors qu'une distribution aussi performante que celle des hydrocarbures aura été déployée. Déjà des flottes de bus ou de véhicules utilitaires peuvent circuler autour d'un point unique de ravitaillement.

LE DIHYDROGÈNE EN TOUTE SÉCURITÉ

Très inflammable et nécessitant des conditions de stockage complexes (très basses températures ou très hautes pressions), le dihydrogène à usage énergétique est un combustible aussi dangereux que le GPL et nécessite le même type de précautions.

Jusqu'à ces dernières années, ce gaz n'était massivement utilisé que par l'industrie chimique. Son emploi futur en tant que vecteur

“ La production d'électricité est possible en tout lieu et à tout moment grâce à la combinaison d'une pile à combustible et d'une réserve de dihydrogène. ”



L'exploitation du dihydrogène pourrait servir pour alimenter les habitations en chaleur et électricité.

d'énergie, ainsi que l'apparition de nouvelles techniques de production, de transport, de stockage et d'utilisation rendent nécessaires l'édiction de réglementations adaptées ainsi que la rédaction de normes spécifiant les caractéristiques techniques assurant la sécurité des usagers.

À l'échelle mondiale, le comité technique ISO¹ TC 197 (auquel l'Afnor² participe), créé en 1990, rédige des normes relatives aux différentes étapes d'utilisation du dihydrogène. Le comité technique IEC³ TC 105 s'occupe lui plus particulièrement des normes associées aux piles à combustible.

Le réseau HYSAFE⁴ (auquel le CEA participe) contribue à l'élaboration de normes, de règlements et de guides de bonnes pratiques au niveau européen.

Des directives européennes spécifiques aux applications stationnaires, mobiles et nomades sont régulièrement transposées en droit français.

Cet effort réglementaire et normatif s'appuie sur les travaux des principaux centres de recherche tels que le CEA qui réalise systématiquement des tests sur tous les dispositifs qu'il projette de développer ; comme par exemple des tests d'éclatement, de chute et de perforation sur les réservoirs haute pression.

- 1 - ISO : International standard organisation
- 2 - Afnor : Association française de normalisation
- 3 - IEC : International Electrotechnical Commission
- 4 - HYSAFE : Safe Use of Hydrogen as an Energy Carrier

Essai de chute de 14 m d'un réservoir de dihydrogène sous haute pression.



1



2

© CEA/DAM

- 1 → L'atome
- 2 → La radioactivité
- 3 → L'homme et les rayonnements
- 4 → L'énergie
- 5 → L'énergie nucléaire : fusion et fission
- 6 → Le fonctionnement d'un réacteur nucléaire
- 7 → Le cycle du combustible nucléaire
- 8 → La microélectronique
- 9 → Le laser
- 10 → L'imagerie médicale
- 11 → L'astrophysique nucléaire
- 12 → L'hydrogène
- 13 → Le soleil
- 14 → Les déchets radioactifs
- 15 → Le climat
- 16 → La simulation numérique
- 17 → Les séismes
- 18 → Le nanomonde
- 19 → Energies du XXI^e siècle
- 20 → La chimie pour l'énergie

DE LA RECHERCHE À L'INDUSTRIE



© Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives, 2013
Direction de la communication
Bâtiment Siège
91191 Gif sur Yvette cedex - www.cea.fr

ISSN 1637-5408.

