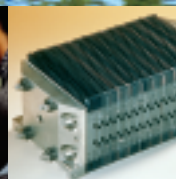


- 1 → L'atome
- 2 → La radioactivité
- 3 → L'homme et les rayonnements
- 4 → L'énergie
- 5 → L'énergie nucléaire : fusion et fission
- 6 → Le fonctionnement d'un réacteur nucléaire
- 7 → Le cycle du combustible nucléaire
- 8 → La microélectronique
- 9 → Le laser
- 10 → L'imagerie médicale
- 11 → L'astrophysique nucléaire
- 12 → L'hydrogène

DE LA RECHERCHE
À L'INDUSTRIE

12 > L'hydrogène



LES CARACTÉRISTIQUES DE L'HYDROGÈNE
ENJEUX D'UNE ÉCONOMIE DE L'HYDROGÈNE
LES 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

LES ENJEUX D'UNE ÉCONOMIE DE L'HYDROGÈNE 7

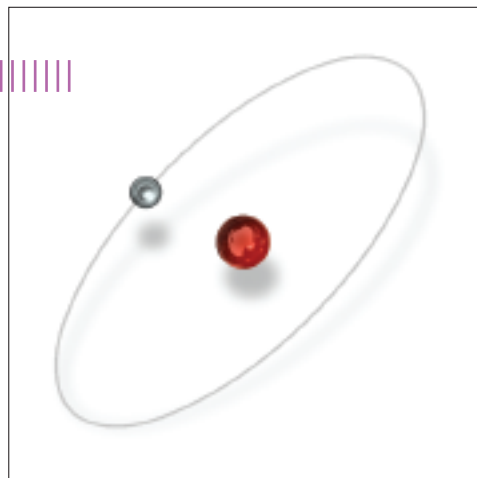
Hydrogène et énergies fossiles	8
L'hydrogène ou l'électricité sans fil à la patte	8
Des applications possibles	9

LES MODES DE PRODUCTION DE L'HYDROGÈNE 11

La production actuelle d'hydrogène	12
Production d'hydrogène à partir des énergies fossiles	14
Production de l'hydrogène par décomposition de l'eau	14
Production directe à partir de la biomasse	15

DISTRIBUTION ET STOCKAGE DE L'HYDROGÈNE 17

Les réseaux de distribution	18
Le stockage de l'hydrogène	19



L'atome d'hydrogène 'H.

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
L'hydrogène en toute sécurité	26



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

“L'hydrogène comme système 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 combustible : « *L'hydrogène et l'oxygène, qui la constituent, utilisés isolément ou simultanément, fourniront une source de chaleur et de lumière inépuisables.* » Aujourd'hui, le “moteur à eau” n'est plus tout à fait un rêve d'écrivain. Grâce à l'hydrogène, 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. L'hydrogène est désormais au cœur des recherches internationales.

Mais pourquoi tant d'attentes autour de l'hydrogène ?

Dominé par les énergies fossiles (pétrole, gaz, charbon), notre système énergétique actuel fait planer une double menace sur notre environnement : 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, l'hydrogène n'est pas une source d'énergie : 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.

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

Caractéristiques de l'hydrogène



© Digital Vision

1766

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

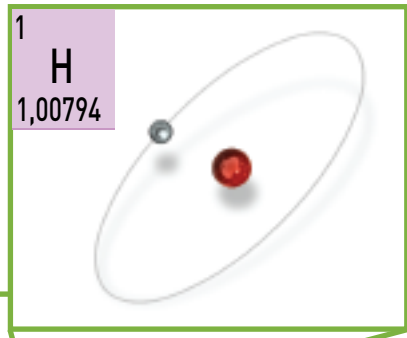
1781

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

1804

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

L'histoire de L'hydrogène 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

Table de Mendeleïv

Période 1																Période 2																			
1 H 1,00794																2 He 4,00206																			
3 Li 6,941		4 Be 9,0122												5 B 10,811		6 C 12,011		7 N 14,0067		8 O 15,9994		9 F 18,9984		10 Ne 20,1797											
11 Na 22,9898		12 Mg 24,3050												13 Al 26,9815		14 Si 28,0855		15 P 30,9736		16 S 32,066		17 Cl 35,4527		18 Ar 39,948											
19 K 39,0983		20 Ca 40,078		21 Sc 44,956		22 Ti 47,88		23 V 50,942		24 Cr 51,996		25 Mn 54,9309		26 Fe 55,847		27 Co 58,9332		28 Ni 58,69		29 Cu 63,546		30 Zn 65,39		31 Ga 69,723		32 Ge 72,61		33 As 74,9216		34 Se 78,96		35 Br 79,904		36 Kr 83,80	
37 Rb 85,468		38 Sr 87,62		39 Y 88,906		40 Zr 91,224		41 Nb 92,906		42 Mo 95,94		43 Tc (98)		44 Ru 101,07		45 Rh 102,906		46 Pd 106,42		47 Ag 107,868		48 Cd 112,41		49 In 114,82		50 Sn 118,710		51 Sb 121,75		52 Te 127,60		53 I 126,905		54 Xe 131,29	
6																7																			
55 Cs 132,905		56 Ba 137,327		57 La 138,906		58 Ce 140,115		59 Pr 140,908		60 Nd 144,24		61 Pm (145)		62 Sm 150,36		63 Eu 151,965		64 Gd 157,25		65 Tb 158,925		66 Dy 162,50		67 Ho 164,930		68 Er 167,26		69 Tm 168,934		70 Yb 173,04		71 Lu 174,967			
89 Ac 227,028		90 Th 232,038		91 Pa 231,036		92 U 238,029		93 Np 237,048		94 Pu (244)		95 Am (243)		96 Cm (247)		97 Bk (247)		98 Cf (251)		99 Es (252)		100 Fm (257)		101 Md (258)		102 No (259)		103 Lr (260)							
87 Fr (223)		88 Ra 226,025		89 à 103		104 Rf (261,11)		105 Db 262,11		106 Sg 263,12		107 Bh 264,12		108 Hs 265,13		109 Mt 268		110 Uun* 269		111 Uuu* 272		112 Uub* 277		81 Tl 204,383		82 Pb 207,2		83 Bi 208,980		84 Po (209)		85 At (210)		86 Rn (222)	

LÉGENDE
 Numéro atomique = nombre de protons
 = nombre d'électrons
 Symbole → H
 Masse atomique = nombre de protons + neutrons = nombre de nucléons dans le noyau
 Les chiffres entre parenthèses indiquent le nombre de masse de l'isotope le plus stable.

D'après Handbook of chemistry and physics, 74^e Ed. 1993, CRC Press et Pure and Applied Chemistry, 1997, 69, 2471

1839

L'Anglais William R. Grove découvre le principe de la pile à combustible: il s'agit d'une réaction chimique entre l'hydrogène et l'oxygène 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*).

ère de L'hydrogène et de la pile à combustible en quelques dates.



© Digital Vision

L'hydrogène est l'élément le plus abondant de la planète; pourtant il n'existe pratiquement pas à l'état pur dans la nature.

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

UNE PETITE MOLÉCULE PLEINE D'ÉNERGIE

La molécule d'hydrogène que nous utilisons le plus couramment est composée de deux atomes d'hydrogène (H_2).

Incolore, inodore, non corrosive, cette molécule a l'avantage d'être particulièrement énergétique: 1 kg d'hydrogène 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 utilisée pour mesurer l'énergie.

En revanche, comme l'hydrogène est le plus léger des éléments, il occupe, à poids égal, beaucoup plus de volume

qu'un autre gaz. Ainsi, pour produire autant d'énergie qu'avec 1 litre d'essence, il faut 4,6 litres d'hydrogène comprimé à 700 bars. Ces volumes importants sont une contrainte pour le transport et le stockage sous forme gazeuse. Comme de nombreux combustibles, l'hydrogène peut s'enflammer ou exploser au contact de l'air. Il doit donc être utilisé avec précaution. Mais 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

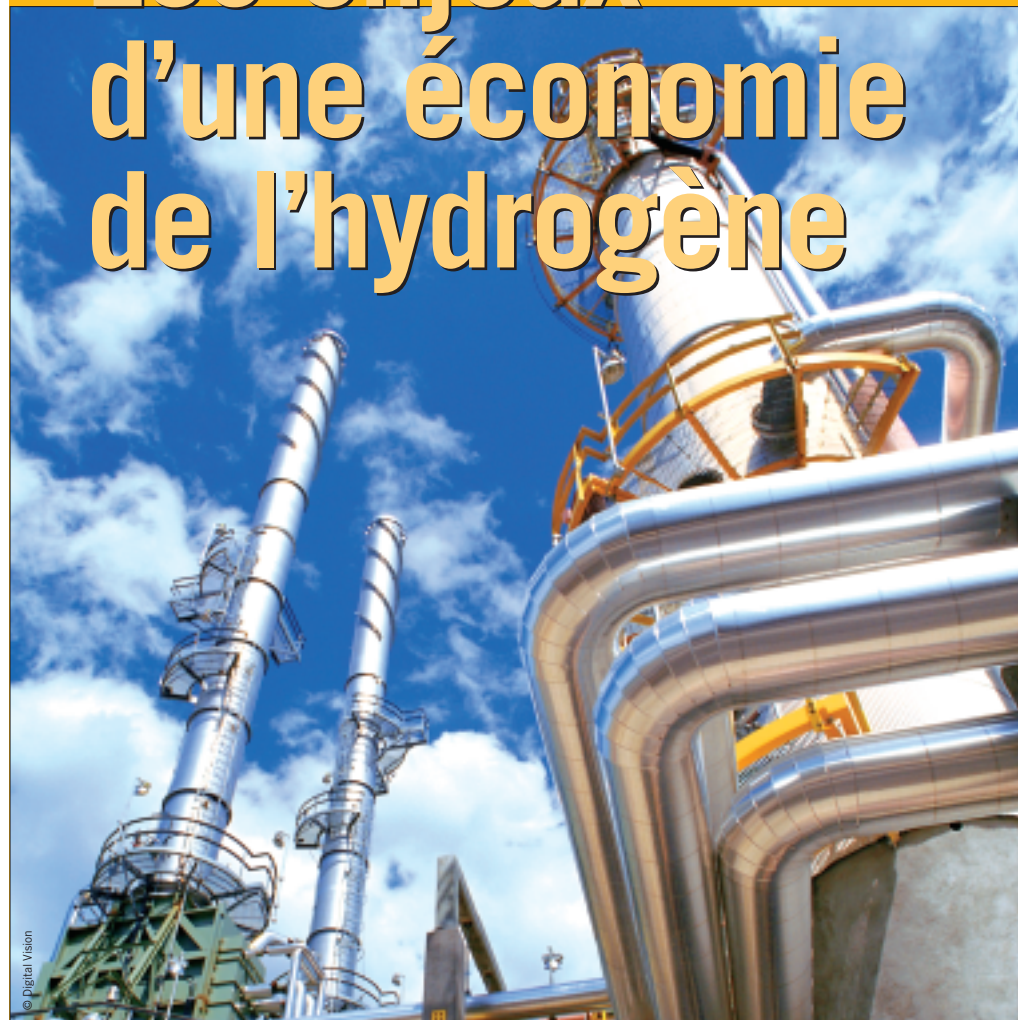
L'hydrogène est extrêmement abondant sur notre planète. Chaque molécule d'eau (H_2O) est le fruit de la combinaison entre un atome d'oxygène et deux atomes d'hydrogène. Or, l'eau couvre 70% du globe terrestre. On trouve également de l'hydrogène dans les hydrocarbures qui, comme leur nom l'indique, sont 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.

Mais bien qu'il soit l'élément le plus abondant de la planète, l'hydrogène n'existe pratiquement pas dans la nature à l'état pur. L'hydrogène pourrait donc être converti en énergie de façon inépuisable... à condition de savoir le produire en quantité suffisante.

Pétrole,
gaz naturel...

COMBINÉ À L'ÉLECTRICITÉ, L'HYDROGÈNE DEVRAIT PERMETTRE DE SATISFAIRE LES PRINCIPAUX BESOINS DE L'HOMME EN ÉNERGIE.

Les enjeux d'une économie de l'hydrogène



© Digital Vision

HYDROGÈNE ET ÉNERGIES FOSSILES

À la fin du XIX^e siècle, l'hydrogène était un combustible incontournable. Il était employé dans les lampes afin de fournir de l'éclairage et également dans le "gaz de ville", où il était mélangé à de l'oxyde de carbone. Au cours du XX^e siècle, avec l'apparition du gaz naturel et surtout du pétrole, l'hydrogène n'a plus guère été utilisé pour fournir de l'énergie, si ce n'est dans le domaine de la propulsion des fusées. En effet, pétrole et gaz naturel peuvent être utilisés directement puisqu'ils se trouvent déjà dans la nature ; leur utilisation est donc plus simple. Mais l'épuisement progressif des réserves est inévitable. D'où un regain d'intérêt pour l'hydrogène. Il n'est pas pour autant un simple pis-aller, car contrairement aux énergies fossiles, sa combustion ne rejette pas de gaz à effet de serre.

La filière hydrogène de demain ne sera pas celle d'hier. À l'avenir, il permettra de produire de la chaleur mais également de l'électricité, grâce à la pile à combustible (voir p. 21).

L'HYDROGÈNE OU L'ÉLECTRICITÉ SANS FIL À LA PATTE

Mais pourquoi avoir recours à l'hydrogène pour produire de l'électricité ? Pourquoi ne pas produire directement de l'électricité ? En fait, l'hydrogène apporte à l'électricité la souplesse d'utilisation qui lui fait défaut. En effet, si l'on sait produire de l'électricité de multiples façons, on ne sait pas la stocker efficacement.

“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 d'hydrogène.”

Les batteries sont coûteuses et n'offrent qu'une autonomie très limitée. L'hydrogène, lui, peut être stocké. Ainsi, avec une réserve d'hydrogène et une pile à combustible, il devient possible de produire de l'électricité n'importe où.



L'hydrogène à l'état liquide : le carburant incontournable de la propulsion spatiale.

et n'importe quand, sans être relié au réseau électrique. Grâce à l'hydrogène et à la pile à combustible, électricité et mobilité deviennent plus aisément compatibles.

DES APPLICATIONS POSSIBLES

Dans le secteur des transports, des véhicules électriques alimentés par une pile à combustible fonctionnant à l'hydrogène pourront remplacer avantageusement nos véhicules actuels : de nos voitures, ne s'échappera plus que de l'eau. Les enjeux sont immenses car le secteur automobile dépend aujourd'hui exclusivement des énergies fossiles. Trouver une alternative est donc indispensable.



Aujourd'hui, la production annuelle d'hydrogène couvre à peine 10% des besoins annuels d'énergie des seuls transports.

À plus petite échelle, la pile à combustible peut s'adapter aux appareils portables (téléphones, ordinateurs...). Par rapport au système actuel, elle multipliera par 5 leur autonomie et sera rechargeable en un instant et n'importe où.

Les applications **stationnaires** de la pile à combustible sont également intéressantes. Dans les habitations, l'hydrogène sera tout à la fois source de chaleur et d'électricité. Il permettra, de plus, d'alimenter en électricité les relais isolés qui ne peuvent être raccordés au réseau (sites montagneux, mer...).

Sur ce terrain, il peut devenir le parfait complément des énergies renouvelables. En effet, les

Qui ne suppose pas de déplacement.



Adaptée aux appareils portables, la pile à combustible multipliera leur autonomie par 5 et sera rechargeable en un instant.

énergies solaire ou éolienne ont l'inconvénient d'être **intermittentes**. Grâce à l'hydrogène, il devient possible de gérer ces aléas : en cas de surproduction, l'électricité excédentaire peut servir à produire de l'hydrogène ; lorsque la production est insuffisante, l'hydrogène peut à son tour être converti en électricité.

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

“L'hydrogène est le parfait complément des énergies renouvelables, qui, elles, sont intermittentes.”



© PhotoDisc

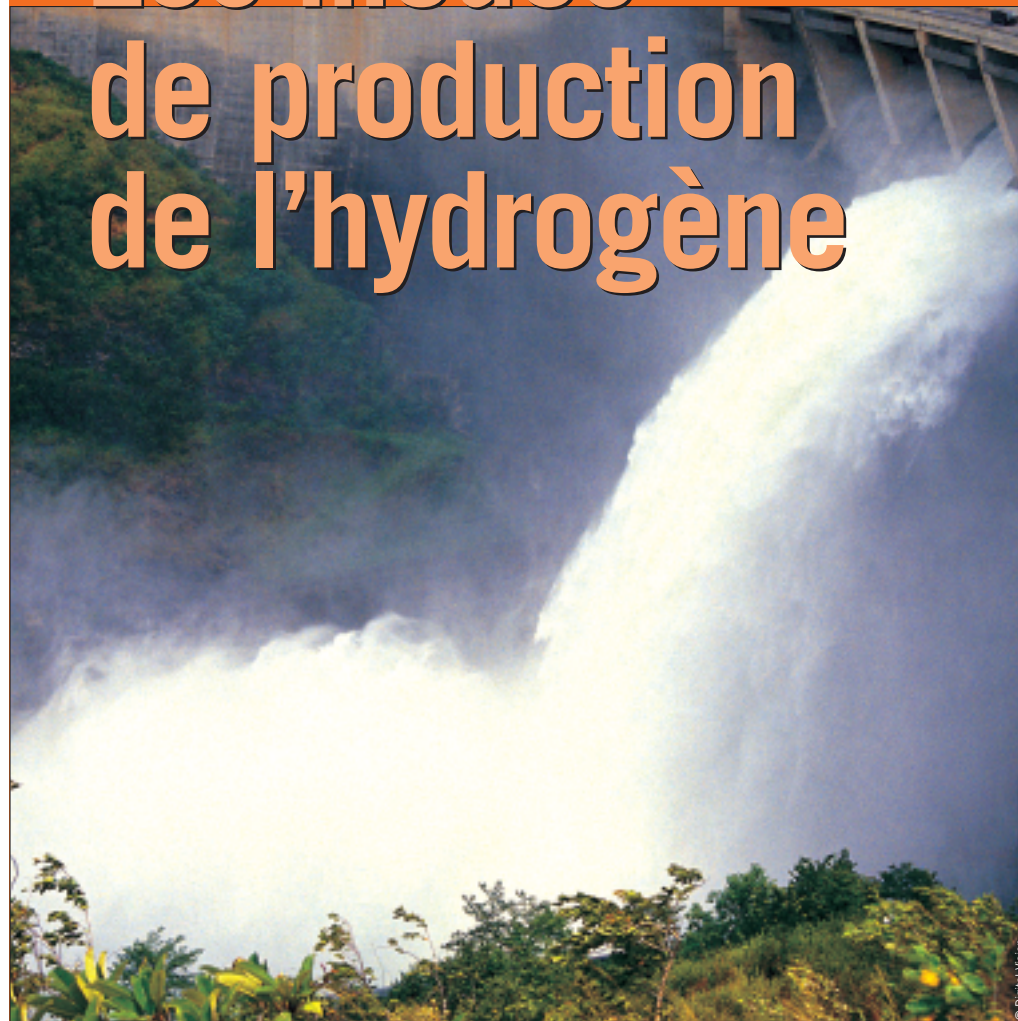
L'hydrogène permettra d'alimenter en électricité les relais isolés qui ne peuvent être raccordés au réseau.

Les potentialités de l'hydrogène ne se limitent pas à la production d'électricité. L'hydrogène peut également fournir de l'énergie par combustion. C'est déjà le cas dans le domaine spatial, où il sert à la propulsion des fusées. Il pourrait entrer également dans la composition de gaz de synthèse, ce qui permettrait d'obtenir des carburants plus énergétiques que les carburants actuels.

Inépuisable, respectueux de l'environnement, souple dans son utilisation, l'hydrogène offre de nombreux avantages. Combiné à l'électricité, il devrait permettre de satisfaire les principaux besoins en énergie de l'homme. Face à la pénurie des énergies fossiles qui se profile, l'intérêt de la filière hydrogène est incontestable. Mais avant que l'hydrogène n'entre dans notre vie quotidienne, des progrès doivent être faits à chaque étape de la filière : production, transport, stockage, utilisation.

L'HYDROGÈNE PEUT ÊTRE PRODUIT À PARTIR DE DIFFÉRENTES SOURCES D'ÉNERGIE.

Les modes de production de l'hydrogène



© Digital Vision

“Compétitivité, rendement énergétique et propreté sont des critères à prendre en compte dans la production d'hydrogène.”

Nous l'avons vu, l'hydrogène 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 d'hydrogène doit répondre à trois critères :

- la compétitivité : les coûts de production ne doivent pas être trop élevés ;
- le rendement énergétique : la production d'hydrogène 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 de l'hydrogène.



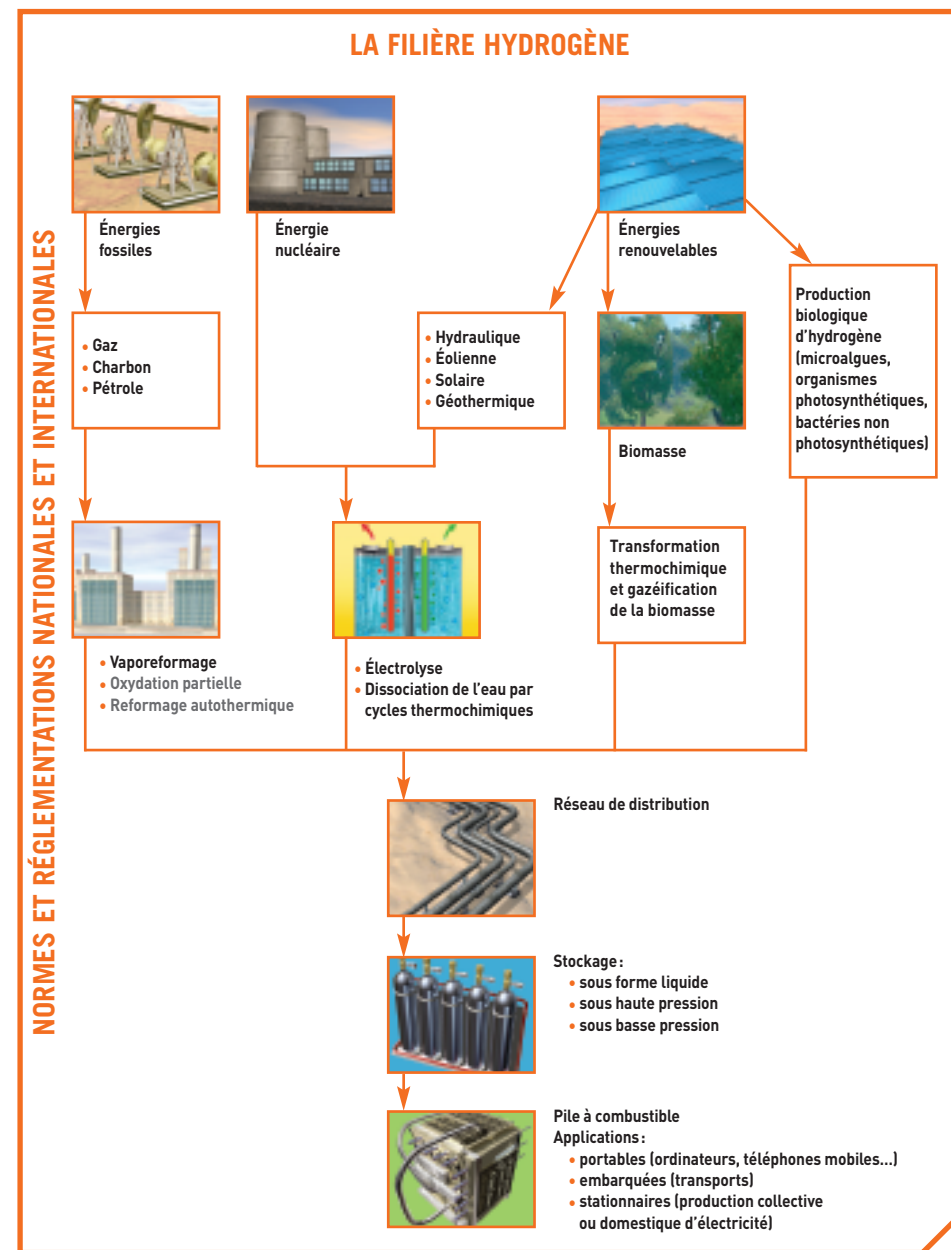
© EyeWire
Une part de la production mondiale d'hydrogène est utilisée pour le raffinage du pétrole.

LA PRODUCTION ACTUELLE D'HYDROGÈNE

Si l'hydrogène 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, pour 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 d'hydrogène 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 d'énergie primaire. Utiliser l'hydrogène comme **vecteur énergétique** suppose

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

donc d'augmenter radicalement sa production.





© Air Liquide

Usine de vaporeformage.

PRODUCTION D'HYDROGÈNE À PARTIR DES ÉNERGIES FOSSILES

Aujourd'hui, 95 % de l'hydrogène 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 l'hydrogène. 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 l'hydrogène qu'il contient. Mais la production d'hydrogène par reformage a l'inconvénient de rejeter du gaz carbonique (CO₂) dans l'atmosphère, principal responsable de l'effet de serre. Pour éviter cela, la production d'hydrogène 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 à partir du gaz naturel est le procédé le moins cher. Mais son prix de revient reste le triple de celui du gaz naturel. Comme ce mode de production est polluant et comme les ressources en énergies fossiles sont appelées à décroître, diversifier les modes de production s'avère indispensable.

PRODUCTION DE L'HYDROGÈNE PAR DÉCOMPOSITION DE L'EAU

Une voie possible consiste à dissocier les atomes d'oxygène et d'hydrogène combinés dans les molécules d'eau (selon la réaction $H_2O \rightarrow H_2 + 1/2 O_2$). 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-mêmes **non émettrices de CO₂**. Parmi les pro-

Énergies renouvelables ou énergie nucléaire.

cédes envisageables, deux sont actuellement à l'étude : l'électrolyse et la dissociation de la molécule d'eau par cycles thermo-chimiques. L'électrolyse permet de décomposer chimiquement l'eau en oxygène et hydrogène sous l'action d'un courant électrique. La production d'hydrogène par électrolyse peut se faire dans de petites unités réparties sur le territoire national. Pour être rentable, ce procédé

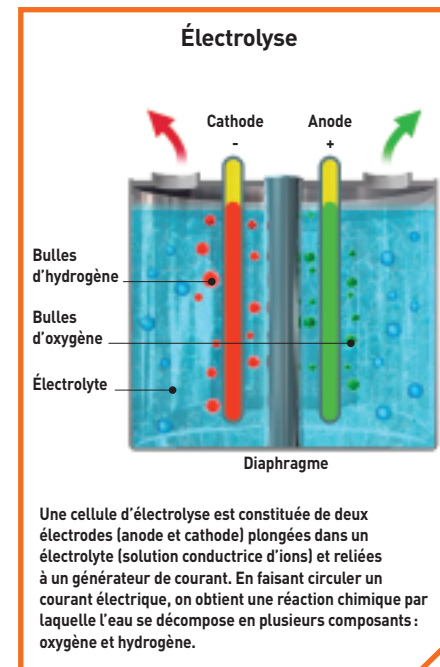
“Utiliser l'hydrogène comme vecteur énergétique implique d'augmenter radicalement sa production.”

L'autre procédé de décomposition de la molécule d'eau par cycles thermo-chimiques permet d'opérer la dissociation de la molécule à des températures de l'ordre de 800° à 1 000 °C. De telles températures pourraient être obtenues par le biais de réacteurs nucléaires à haute température de nouvelle génération, actuellement à l'étude, ou de centrales solaires.

PRODUCTION DIRECTE À PARTIR DE LA BIOMASSE

La biomasse est une source de production d'hydrogène potentiellement très importante. Elle est constituée de tous les végétaux (bois, paille, etc.) qui se renouvellent à la surface de la Terre. L'hydrogène est produit par gazéification, laquelle permet l'obtention d'un gaz de synthèse (CO + H₂). Après purification, celui-ci donne de l'hydrogène. Cette solution est attrayante car la quantité de CO₂ émise au cours de la conversion de la biomasse en hydrogène est à peu près équivalente à celle qu'absorbent les plantes au cours de leur croissance ; l'écobilan est donc nul.

Un jour, il sera peut-être possible de produire de l'hydrogène à partir de bactéries et de microalgues. On a en effet découvert récemment que certains de ces organismes avaient la particularité de produire de l'hydrogène sous l'action de la lumière. Mais ce procédé n'en est aujourd'hui qu'au stade du laboratoire.



exige de pouvoir disposer de courant électrique à très faible coût. Actuellement, la production d'hydrogène 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 amélioration de l'électrolyse classique, permettrait d'obtenir de meilleurs rendements.



© Digital Vision

Procédé de gazéification du bois

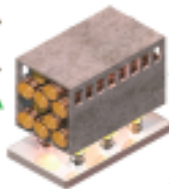
La transformation des végétaux – bois, paille, etc. – constitue l'une des sources de production d'hydrogène.



Biomasse humide forêt



Séchage : le bois est mis six mois sous abri...



... puis est chauffé à 120 °C

Biomasse sèche

Particules de biomasse

Gaz de synthèse (CO*, hydrogène, méthane...)

Broyage

Particules de biomasse

T: 950 °C

Sable chaud

T: 800 °C

Vapeur d'eau (H₂O)

1 Les particules sont mélangées avec la vapeur d'eau puis entraînées.

2 Des résidus solides carbonés, issus de la gazéification de la biomasse, sont entraînés par du sable circulant dans le circuit.

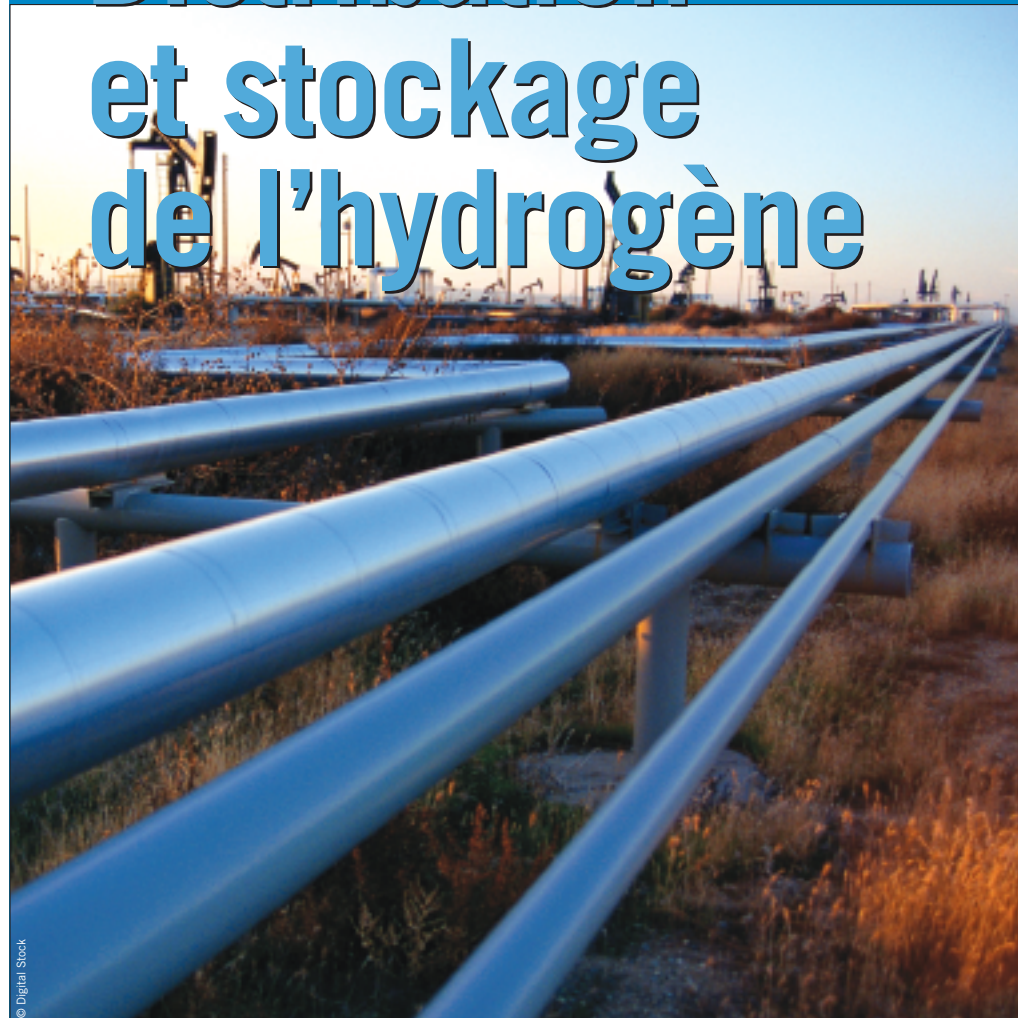
3 Les résidus solides carbonés sont brûlés pour chauffer le sable.

4 Gazéification de la biomasse bois + eau.
CO* hydrogène, méthane... (l'énergie nécessaire à la réaction est apportée par le sable chaud).

* Monoxyde de carbone

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

Distribution et stockage de l'hydrogène



© Digital Stock

Pour que l'hydrogène puisse réellement devenir le vecteur énergétique de demain, il faut qu'il soit disponible à tout moment, et en tout point du territoire. Mettre au point des modes de transport, de stockage et de distribution efficaces représente donc un enjeu crucial.

LES RÉSEAUX DE DISTRIBUTION

Dans les schémas actuels, la logique de distribution industrielle est en général la suivante : l'hydrogène est produit dans des unités centralisées, puis utilisé sur site ou transporté par pipelines. Le transport gazeux par pipelines permet de connecter les principales sources de production aux principaux points de son utilisation.

Des réseaux de distribution d'hydrogène par pipelines existent déjà dans différents pays pour approvisionner les industries chimiques et pétrochimiques (environ 1 050 km en France, en Allemagne et au Bénélux sont exploités par Air Liquide). La réalisation de ces infrastructures industrielles démontre que l'on dispose d'une bonne maîtrise de la génération et du transport d'hydrogène. Un bémol cependant : le coût du transport est environ 50 % plus cher que celui du gaz naturel et une unité de volume d'hydrogène transporte trois fois moins d'énergie qu'une unité de volume de gaz naturel. Pour distribuer l'hydrogène, des infrastructures de ravitaillement devront être développées. La

RÉSEAU DE CANALISATIONS D'AIR LIQUIDE



“Développer des technologies de stockage adaptées implique de prendre en compte les caractéristiques physico-chimiques de l'hydrogène.”



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

mise au point de stations-service ne semble pas poser de problèmes techniques particuliers. Une quarantaine de stations pilotes existent 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 couvrent tout le territoire, ce qui risque de freiner le développement de l'hydrogène dans les transports. Pour pallier cette difficulté, certains constructeurs automobiles envisagent d'utiliser des carburants qui contiennent de l'hydrogène plutôt que l'hydrogène lui-même. Dans ce cas, l'étape de reformage a lieu à bord du véhicule. L'intérêt du procédé est alors réduit puisque le reformage

produit du dioxyde de carbone, principal responsable de l'effet de serre.

LE STOCKAGE DE L'HYDROGÈNE

Concevoir des réservoirs à la fois compacts, légers, sûrs et peu coûteux est déterminant puisque c'est précisément cette possibilité de stockage qui rend l'hydrogène particulièrement attractif par rapport à l'électricité.

Stockage sous forme liquide

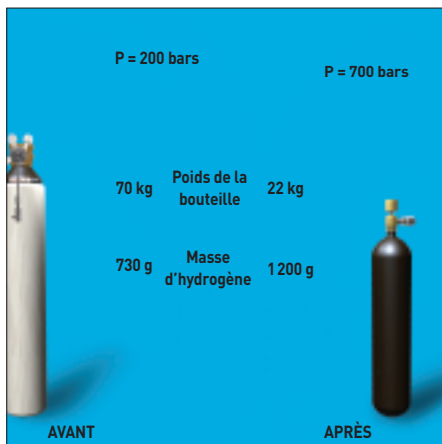
Conditionner l'hydrogène sous forme liquide est une solution *a priori* attrayante. C'est d'ailleurs sous cette forme qu'il est utilisé dans le domaine spatial. Mais l'hydrogène est, après l'hélium, le gaz le plus difficile à liquéfier. Cette solution entraîne une dépense énergétique

Sa température de liquéfaction est de -253°C .

importante et des coûts élevés qui rendent son application plus difficile pour le grand public.

Stockage gazeux sous haute pression

Le conditionnement de l'hydrogène sous forme gazeuse est une option prometteuse. Les contraintes sont toutefois nombreuses. Léger et volumineux, l'hydrogène doit être comprimé au maximum pour réduire l'encombrement des réservoirs. Des progrès ont été faits : de 200 bars, pression des bouteilles distribuées dans l'industrie, la pression est passée à 350 bars aujourd'hui, et les développements concernent maintenant des réservoirs pouvant résister à des pressions de 700 bars. Mais cette



Les bouteilles ont évolué : plus légères et plus petites, elles contiennent une masse plus grande d'hydrogène.



© CEAT, Foulon

Les matériaux de stockage sont testés : ils doivent notamment être imperméables et non fragilisés par l'hydrogène.

compression a un coût. De plus, même comprimés à 700 bars, 4,6 litres d'hydrogène sont encore nécessaires pour produire autant d'énergie qu'avec 1 litre d'essence.

Le risque de fuite d'hydrogène doit être également 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, l'hydrogène est capable de traverser de nombreux matériaux, y compris certains métaux. Il en fragilise, de plus, certains en les rendant cassants. L'étude du stockage haute pression consiste donc, pour l'essentiel, à éprouver la résistance des matériaux à l'hydrogène sous pression. Ces matériaux doivent être résistants mais relativement légers (mobilité oblige).

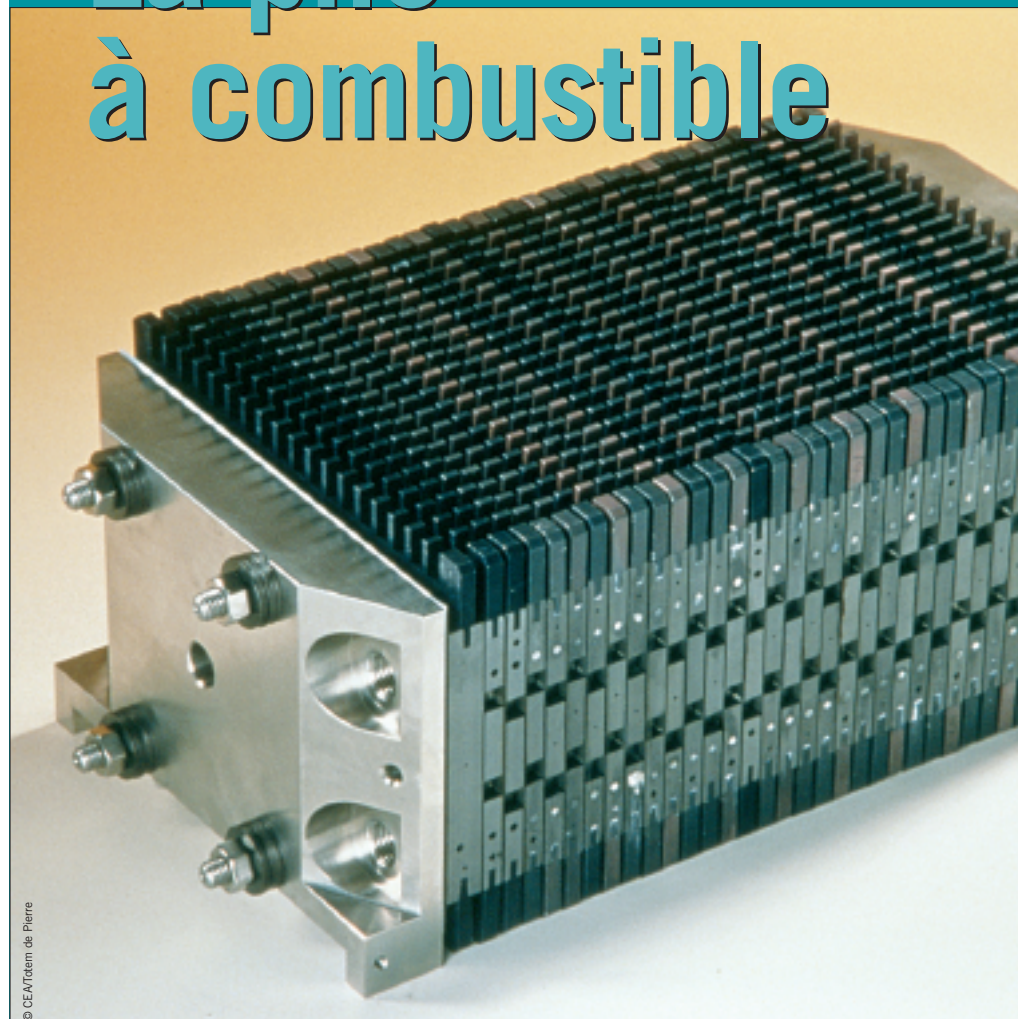
Les réservoirs métalliques, utilisés actuellement, se révèlent encore coûteux et lourds au regard de la quantité de gaz qu'ils peuvent emporter. Des réservoirs non plus métalliques mais en matériaux polymères sont en cours d'élaboration pour répondre à ces contraintes.

Stockage sous basse pression

Une alternative à l'utilisation de réservoirs sous pression gazeuse consisterait à stocker l'hydrogène dans certains matériaux carbonés ou dans certains alliages métalliques capables d'absorber l'hydrogène et de le restituer lorsque cela est nécessaire. Ce mode de stockage fait actuellement l'objet de nombreuses études.

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

La pile à combustible



© CEAT/Idem de Pierre

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 recombinant de l'hydrogène et de l'oxygène, 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).

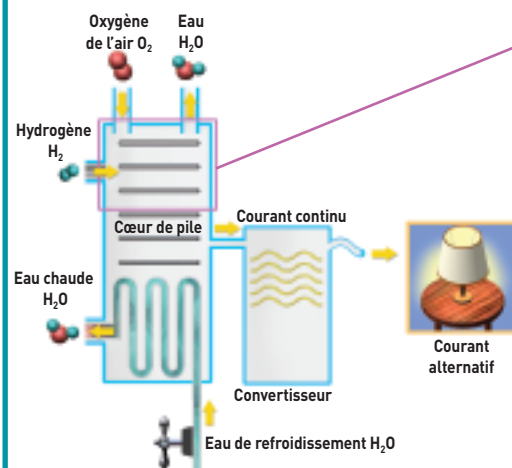


Exemple d'utilisation d'une pile à combustible : Roller Pac, un groupe électrogène de 2 kW, dans une intervention de secours.

Mais seule la Nasa exploitera, dans les années 60, cette technologie 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

PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DE LA PILE À COMBUSTIBLE

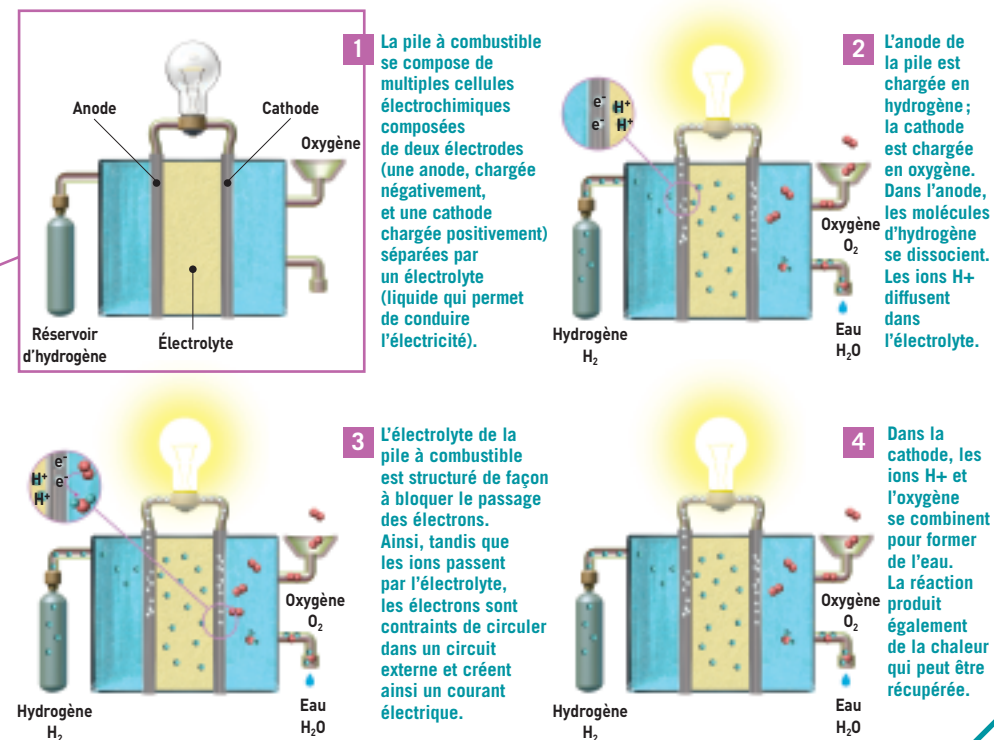
La pile à combustible fonctionne sur le mode inverse de l'électrolyse de l'eau. Tandis que l'électrolyse décompose l'eau en hydrogène et en oxygène sous l'action d'un courant électrique, la pile à combustible recombine l'hydrogène et l'oxygène en créant un courant électrique.



La micropile à combustible produit les quelques watts requis pour l'alimentation d'un téléphone mobile.

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 de produire 1 MW pour fournir de l'élec-

tricité à un immeuble collectif, en passant par la pile destinée aux applications embarquées, dans le secteur des transports, il existe désormais toute une gamme de PAC. Le principe de fonctionnement est toujours le même, mais différentes technologies sont en développement.



LES DIFFÉRENTS TYPES DE PILES À COMBUSTIBLE			
NOM	TEMPÉRATURE DE FONCTIONNEMENT	DÉVELOPPEMENTS	OBSERVATIONS
PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cell) Pile à membrane échangeuse de protons	80-120° C	La plus apte à déboucher sur un marché de masse. Nombreux prototypes. Applications transports.	Sensibilité aux impuretés nécessitant de purifier l'air ou l'oxygène, ou de développer des catalyseurs résistant aux polluants.
DMFC (Direct Methanol Fuel Cell) Pile à méthanol direct DEFC (Direct Ethanol Fuel Cell) Pile à éthanol direct	100-130° C	En cours. De nombreux progrès ont été obtenus.	Rendements actuellement plus faibles qu'avec l'hydrogène pur.
SOFC (Solid Oxid Fuel Cell) Pile à oxyde solide	750-1000° C	Technologie prometteuse nécessitant encore des développements. Rendement global (électrique et thermique) supérieur à 80%. Applications stationnaires.	Température de fonctionnement encore élevée.

LES DIFFÉRENTES FILIÈRES TECHNOLOGIQUES

Il existe plusieurs types de piles à combustible qui se différencient par leur électrolyte. Cet électrolyte définit la température de fonctionnement de la pile

Élément chargé de véhiculer les ions.

et, de fait, son application. Il y a aujourd'hui deux obstacles majeurs au développement des applications commerciales des piles: des difficultés d'ordre technologique (compacité insuffisante, usure des matériaux trop rapide, rendements énergétiques perfectibles) et les coûts de fabrication. Actuellement, les recherches visent à diminuer les coûts tout en améliorant les performances. Elles tournent principalement autour de deux familles de piles à électrolytes solides.

- La pile à membrane échangeuse de protons (PEMFC) fonctionne à 80 °C avec un électrolyte en polymère. C'est la plus prometteuse pour les transports. Les prototypes actuels pour les automobiles reviennent à 7 600 euros/kW. L'enjeu des recherches est de faire passer leur coût en dessous de 50 euros/kW.

Une variante, la pile à méthanol direct (DMFC) ou à éthanol direct (DEFC), consomme directement l'hydrogène contenu dans l'alcool. Très compacte, elle est promise à l'alimentation de la micro-électronique 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 pourrait atteindre 80 %.

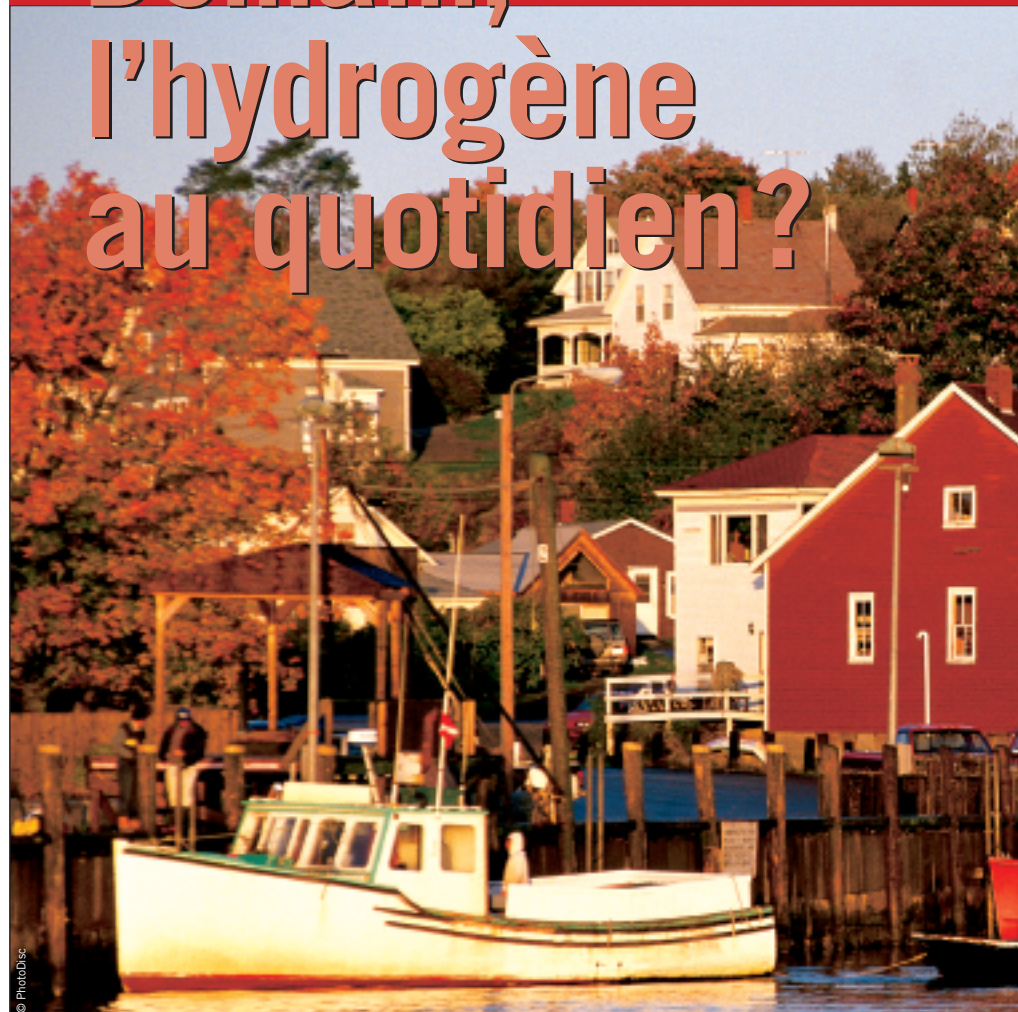


Micropile hydrogène et micropile méthanol en cours de test.

© T. Foulon/CEA

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?



© PhotoDisc

UNE MISE EN PLACE PROGRESSIVE

Piles à combustible, réservoirs de stockage, véhicules, stations d'approvisionnement : de nombreux prototypes existent déjà. L'hydrogène n'entrera cependant dans nos vies quotidiennes que très progressivement.

D'ici à 2005, les premiers appareils portables équipés d'une microPAC devraient voir le jour. Dans le domaine des transports, les constructeurs automobiles prévoient d'ici à 2008 les premières applications de l'hydrogène dans les "flottes captives" : bus et véhicules utilitaires ont en effet un point de passage ou de stationnement obligé, ce qui facilite le ravitaillement. Ces véhicules sont également moins contraignants en terme de volume de stockage. Quelques prototypes circulent déjà aujourd'hui. Les premières voitures particulières pourraient, quant à elles, commencer à pénétrer le marché entre 2010 et 2020.

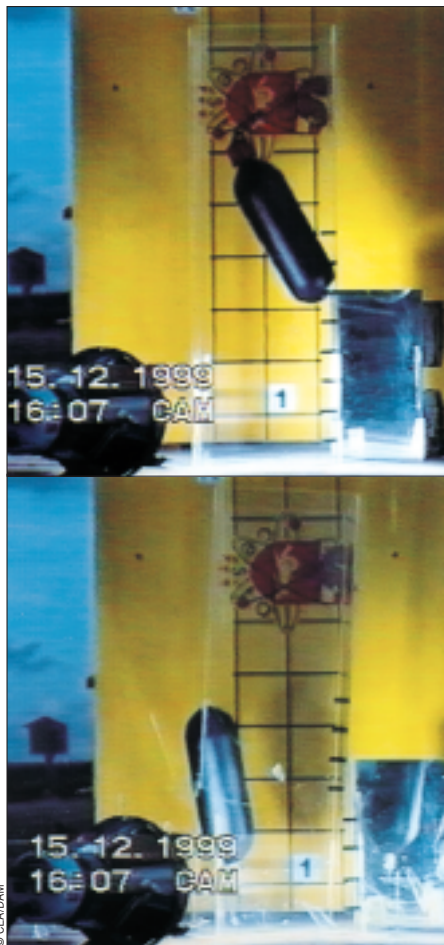
Les applications **stationnaires** (voir p. 9) pourraient être commercialisées à l'horizon 2010.

Alimentation en chaleur et en électricité d'immeubles...

raient être commercialisées à l'horizon 2010.

L'HYDROGÈNE EN TOUTE SÉCURITÉ

Bien que couramment utilisé dans l'industrie, l'hydrogène est souvent considéré comme un gaz dangereux. Cette image est essentiellement liée à l'accident du ballon dirigeable *Hindenburg* en 1937, même si nous savons aujourd'hui que la cause réelle de l'incendie n'était pas liée à l'hydrogène, mais à la nature extrêmement



© CEA/DAM

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

inflammable du vernis qui recouvrait l'enveloppe. Au début du XX^e siècle, l'hydrogène était utilisé couramment par le grand public dans le gaz de ville. Si ce mélange d'hydrogène et d'oxyde de carbone a été délaissé, c'est en raison de l'extrême toxicité de l'oxyde de carbone et non à cause de l'hydrogène. Certes, l'hydrogène doit être utilisé avec précaution, mais il n'est pas plus dangereux que le gaz naturel : les risques sont simplement différents.

Pour assurer une utilisation de l'hydrogène en toute sécurité, il faut essentiellement éviter tout risque de fuite, car l'hydrogène est inflammable et explosif, et toute situation "confinée" peut s'avérer dangereuse. Ceci suppose l'utilisation de dispositifs de sécurité adéquats (ventilateurs, détecteurs...). De nombreuses études sont

On parle de situation confinée lorsque l'hydrogène est emprisonné avec de l'air dans un volume fermé.

menées à chaque étape de la filière pour pallier ces risques. Le CEA effectue, par exemple, des tests d'éclatement de chute et de perforation sur les réservoirs haute pression qu'il met au point. Il est important de définir également des règles d'utilisation communes. La mise en place d'une économie hydrogène ne pourra se faire sans une harmonisation des normes et des réglementations au niveau européen et international. En 1990, l'*International Standard Organisation* (ISO), organisation internationale de normalisation, a ainsi créé un comité technique pour élaborer des normes dans le domaine de la production, du stockage, du transport et des diverses applications de l'hydrogène ; à titre d'exemple, le projet européen EIHP (*European Integrated Hydrogen Project*) émet des propositions de réglementation pour les véhicules à hydrogène et les infrastructures de distribution.



© Photobisc

L'exploitation de l'hydrogène pour l'alimentation en chaleur et électricité des habitations pourrait être opérationnelle à l'horizon 2010.