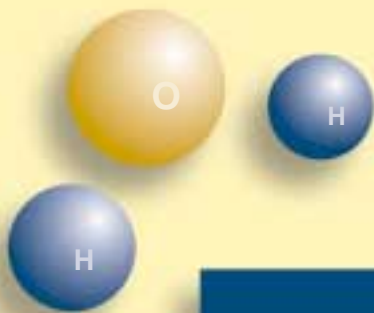
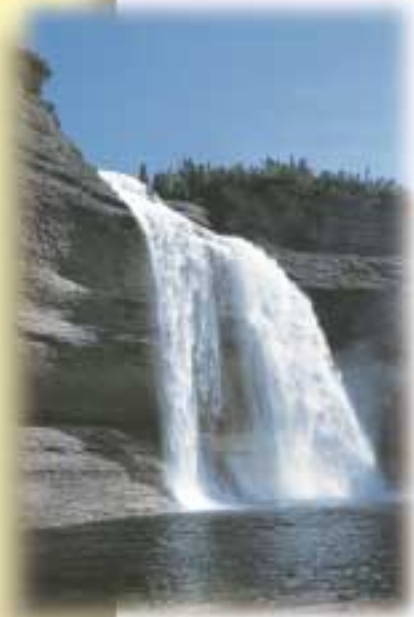


# L'hydrogène

une voie pour l'avenir



Cette brochure a été produite par la Direction des communications  
du ministère des Ressources naturelles.

Recherche et rédaction : Diane Barry, Direction des communications  
Collaboration : Benoît Drolet, Direction de la planification et de la recherche  
Coordination : Diane Barry

## Production

Conception graphique : Claire Gagnon  
Coordination : Gilles Larochelle  
Photographies : MRN, Diane Barry  
Illustrations : Claire Gagnon

## Contenu

### Sites Internet consultés

<http://www.inrs-ener.quebec.ca/>  
<http://www.uqtr.quebec.ca/irh/>  
<http://www.nrcan.gc.ca/>  
<http://www.uquebec.ca/>  
<http://www.publications-econergie.nrcan.gc.ca/>  
<http://www.quebecscience.qc.ca/>  
<http://www.pourlascience.com/>  
<http://le-village.ifrance.com/>

<http://mendeleiv.cyberscol.qc.ca/>  
<http://carb-remp.nrcan.gc.ca/>  
<http://www.nrel.gov/cleanenergy/>  
<http://www.afdc.doe.gov/altfuel/>  
<http://www.afdc.doe.gov/afv/hydrogen/>  
<http://www.ttcorp.com/>  
<http://www.clean-air.org/>

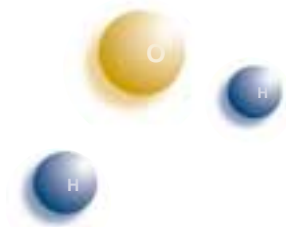
### Autres documents consultés

Sciences & Vie no 954, mars 1997  
Hydrogen, The Energy Carrier : Future Applications of Technology  
BMW's Energy Strategy-Promoting the Technical and Political Implementation  
L'autobus urbain sur la voie de l'avenir  
Hydrogen, energy for tomorrow, août 1995  
Hydrogen, the Fuel for the Future, mars 1995  
Utilisation de l'hydrogène comme carburant pour les véhicules moteurs, janvier 1983

Gouvernement du Québec  
Dépôt légal – 2<sup>e</sup> trimestre 2000  
Bibliothèque nationale du Québec  
Numéro de publication : 2000-4010  
Numéro ISBN : 2-550-36018-4

Direction de la planification et de la recherche  
5700, 4<sup>e</sup> Avenue Ouest, local A 405  
Charlesbourg (Québec), G1H 6R1

Téléphone : (418) 627-6380  
Télécopieur : (418) 643-8337



## L'hydrogène, une voie pour l'avenir

*L'hydrogène est l'élément de base le plus abondant dans l'Univers. On le trouve en très grande quantité sur Terre, dans le Soleil et les étoiles.*

Utilisé principalement pour le raffinage du pétrole, dans la fabrication de composés, tels que l'ammoniac et le peroxyde, et dans le traitement des produits alimentaires (huile hydrogénée), l'hydrogène est en voie de devenir l'une des formes d'énergie de l'avenir, notamment avec les piles à combustible.

Découvert au XVIII<sup>e</sup> siècle par le chimiste anglais Henry Cavendish, l'hydrogène doit son nom à Antoine Laurent de Lavoisier, un chimiste français. Dérivé de la langue grecque, soit *hudôr* pour eau et *gennân* pour générateur, le mot hydrogène signifie « générateur d'eau ». Cavendish fut le premier à démontrer que, lorsque l'hydrogène et l'oxygène sont combinés, ils forment de l'eau.

# Les caractéristiques

## de l'hydrogène

1 1,0079 <b>H</b> hydrogène			
3 6,941 <b>Li</b> lithium	4 9,0122 <b>Be</b> béryllium		
11 22,9898 <b>Na</b> sodium	12 24,305 <b>Mg</b> magnésium		
19 39,0983 <b>K</b> potassium	20 40,078 <b>Ca</b> calcium	21 44,9559 <b>Sc</b> scandium	22
37 85,4678 <b>Rb</b> rubidium	38 87,62 <b>Sr</b> strontium	39 88,9058 <b>Y</b> yttrium	40
55 132,9054 <b>Cs</b> césium	56 137,33 <b>Ba</b> baryum	57 138,9855 <b>La</b> lanthane	72
87 (223) <b>Fr</b> francium	88 226,0254 <b>Ra</b> radium	89 227,0278 <b>Ac</b> actinium	10

- L'hydrogène est un élément chimique simple, léger, stable, peu réactif à température ambiante.
- Lorsqu'il se combine avec l'oxygène il forme de l'eau en produisant un fort dégagement de chaleur.
- C'est un vecteur d'énergie, c'est-à-dire qu'il peut transporter de l'énergie, plutôt qu'une source d'énergie.
- Il peut être produit en quantités presque illimitées, à partir de sources d'énergie renouvelables telles que l'énergie hydraulique, l'énergie solaire et l'énergie éolienne, ainsi qu'à partir d'énergies fossiles, tel le gaz naturel.
- L'hydrogène est un gaz très volatil, c'est-à-dire qu'il est 14 fois plus léger que l'air ; il est incolore, inodore et insipide.

# Les avantages

## de l'hydrogène

- Élément stable et non corrosif.
- Combustion efficace.
- Énergie spécifique élevée (par unité de poids).
- Élément non polluant.

## L'hydrogène, d'hier à aujourd'hui

*Appareil  
expérimental  
de réfrigération  
magnétique*

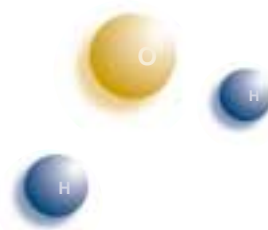


Diane Barry, MRN Source : IRH-UQTR

Tout comme le gaz naturel, le kérosène et le propane, l'hydrogène est un gaz inflammable. À ce titre, l'hydrogène a d'abord été utilisé en petites quantités mélangées avec de l'eau, pour remplir des ballons et des lampes oxyhydrogéniques afin de fournir de l'éclairage. On l'utilisait également pour le chauffage fonctionnant au « gaz de houille ». On obtenait ce gaz en combinant du charbon avec près de 50 % d'hydrogène et 25 % de méthane.

Aujourd'hui, d'autres sources d'énergie sont utilisées, et l'électricité figure parmi les principales ressources pour répondre aux besoins en éclairage. L'hydrogène présente un nouvel intérêt, particulièrement dans le domaine des transports. En effet, il permet notamment d'envisager la production d'électricité dans les piles à combustible. À l'état liquide, l'hydrogène est utilisé comme carburant dans les navettes spatiales.

Dans l'industrie chimique, il est utilisé pour le raffinage du pétrole (hydrogénation des huiles lourdes). Enfin, l'hydrogène est largement utilisé, à l'échelle industrielle, dans la fabrication de l'ammoniac, du méthanol et du peroxyde d'hydrogène, de même qu'en métallurgie, en pharmacologie, en électronique, dans la fabrication du verre et dans le traitement des produits agroalimentaires.





Saviez-vous

qu'en produisant de l'hydrogène par électrolyse, on peut récupérer environ 80 % de l'énergie initiale utilisée pour le produire ? Que ce pourcentage diminue à 65 % environ si on doit le liquéfier ?

Que, dans un moteur à combustion interne, l'efficacité de l'hydrogène, par rapport à l'essence ou au diesel, peut donner un rendement énergétique jusqu'à 25 % plus élevé ?

Que la combustion de l'hydrogène est beaucoup plus efficace que celle de l'essence, principalement parce que l'hydrogène se consume mieux en présence d'excédents d'air (0,9 pour le rapport essence/air ; 0,4 pour le rapport hydrogène/air), et qu'il permet des taux de compression plus hauts ?

## Donnez-moi de l'hydrogène

Pour produire de l'hydrogène, il est nécessaire d'avoir de l'électricité ou de la chaleur. En conséquence, diverses sources d'énergie, y compris le gaz naturel et toutes les énergies fossiles, peuvent être utilisées pour sa production. Cependant, l'utilisation d'énergie propre et renouvelable constitue la voie la plus bénéfique pour l'environnement. Ainsi, l'hydroélectricité, l'énergie éolienne, la biomasse et l'énergie solaire, ressources renouvelables et abondantes au Québec, peuvent servir à la production d'hydrogène.

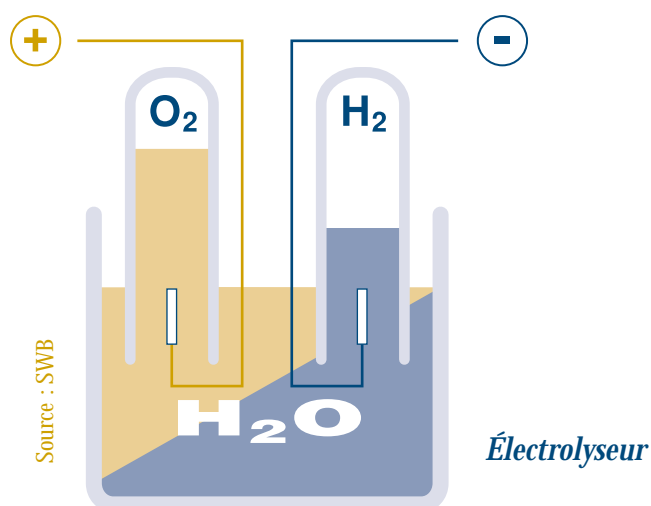
Les modes de production d'hydrogène

- **Le reformage du gaz naturel.**

Ce processus consiste à exposer le gaz naturel à de la vapeur très chaude, produisant ainsi de l'hydrogène, du monoxyde de carbone et du bioxyde de carbone.

- **L'électrolyse.**

L'énergie électrique permet de dissocier la molécule d'eau ( $H_2O$ ) en ses deux éléments constituants, soit l'hydrogène ( $H_2$ ) et l'oxygène ( $O_2$ ). L'utilisation de sources d'énergie renouvelables et propres, telles que l'hydroélectricité, l'énergie éolienne et l'énergie solaire, comme source d'électricité, présente des avantages sur le plan environnemental.





Saviez-vous  
que

si l'on compare la production d'hydrogène par électrolyse à la production d'hydrogène par reformage du gaz naturel, l'avantage est nettement du côté de l'électrolyse dont l'efficacité, par rapport au reformage, est d'environ 15 % plus élevé ?

- **La gazéification de la biomasse.**

La production d'hydrogène à partir de la biomasse repose principalement sur le procédé de gazéification thermique par lequel des composés organiques tels que le bois, les produits agricoles, les déchets urbains se décomposent principalement en hydrogène et en monoxyde de carbone.

- **La photobiologie.**

Certains microbes ou bactéries dites photosynthétiques produisent de l'hydrogène en captant de l'énergie lumineuse.

*La très grande partie de la production d'hydrogène provient du gaz naturel. Les sources d'énergie renouvelables et non polluantes sont, toutefois, de plus en plus envisagées pour la production d'hydrogène par électrolyse.*



Gaz métropolitain

## L'hydrogène et l'environnement

*Les préoccupations croissantes pour l'environnement et les changements climatiques, notamment en relation avec les engagements découlant de la Conférence de Kyoto, militent en faveur de sources d'énergie propres et renouvelables. L'hydroélectricité répond à ces exigences environnementales en ce qu'elle permet de réduire les gaz à effet de serre.*

*Les engagements pris à Kyoto favorisent également le développement de nouvelles technologies énergétiques. Les technologies de l'hydrogène figurent parmi celles qui suscitent le plus d'intérêt et qui sont appelées à connaître un essor important au cours des prochaines décennies.*



Chute Vauréal, Île d'Anticosti





Les émissions de gaz causées principalement par la combustion des carburants fossiles contribuent à augmenter le phénomène d'effet de serre. En conséquence, il est donc dans notre intérêt de développer, dès que possible, des systèmes énergétiques basés sur des ressources propres et renouvelables, sans danger pour l'atmosphère. L'utilisation de l'hydrogène pourrait contribuer à l'atteinte des objectifs de protection de l'environnement. En effet, l'hydrogène peut être obtenu à partir de l'eau et, au moment de sa combustion, ne produire que de l'eau.

Sur le plan environnemental, le mode de production le plus avantageux est celui de l'électrolyse lorsque l'électricité utilisée dans ce processus est d'origine renouvelable (énergie hydraulique, énergie solaire, énergie éolienne). La production d'hydrogène à partir de gaz naturel présente aussi des avantages environnementaux appréciables. L'hydrogène produit ainsi peut être utilisé dans des piles à combustible, lesquelles sont plus propres et plus efficaces que les moteurs à combustion interne utilisant des carburants fossiles.

*Tout comme l'électricité, l'hydrogène est un porteur d'énergie. L'absence de pollution au moment de sa combustion en fait un combustible intéressant. L'hydrogène, pour être produit, nécessite un apport d'énergie.*

## L'expertise québécoise

Une quinzaine d'entreprises, de centres de recherche et d'organismes québécois actifs dans le domaine de l'hydrogène ont acquis des connaissances, mis au point des technologies et développé un savoir-faire particulier. Parmi les réalisations québécoises, mentionnons la conception et la mise au point d'appareils permettant d'effectuer l'électrolyse, le développement de nouvelles méthodes de stockage d'hydrogène, de même que la prise en charge de l'élaboration des normes de sécurité, à l'échelle internationale, par l'intermédiaire du Bureau de normalisation du Québec.

## Le projet Euro-Québec Hydro-Hydrogène

Les travaux menés dans le cadre d'un projet de collaboration entre le Québec et l'Europe, soit le projet Euro-Québec Hydro-Hydrogène, ont porté principalement sur les applications et les utilisations de l'hydrogène. Parmi ces travaux, mentionnons :

- la démonstration d'un autobus urbain adapté à l'hythane ;
- l'élaboration et l'essai d'une turbine d'avion adaptée à l'hydrogène ;
- la conception et la mise au point de réservoirs pour le stockage d'hydrogène liquide ;
- l'étude et la comparaison du coût, à l'échelle sociale et environnementale, de l'hydrogène par rapport aux carburants traditionnels.

Ces travaux ont conduit au développement de concepts et d'équipements tels que :

- des réservoirs d'hydrogène gazeux, d'hythane et d'hydrogène liquide pour les véhicules ;
- des réservoirs pour entreposer et transporter l'hydrogène liquide ;
- des systèmes d'adaptation d'autobus urbains à l'hythane ;
- des injecteurs pour turbines adaptées à l'hydrogène.

Bien que ces équipements ne soient pas encore exploités à l'échelle industrielle et commerciale, ils font l'objet de projets visant leur mise au point par des entreprises et des centres de recherche québécois.

*Les travaux réalisés dans le cadre du projet Euro-Québec Hydro-Hydrogène ont permis de démontrer que l'hydrogène produit par l'électrolyse de l'eau présente des avantages marqués en tant que carburant propre et qu'aucun obstacle technique majeur n'empêche la mise en place d'un système énergétique basé sur l'hydrogène. Cependant, des efforts importants restent à faire en matière de développement des technologies de stockage et de réduction des coûts de production.*



Saviez-vous  
que

**les autobus à l'hythane  
affichent un rendement  
égal ou supérieur à celui  
des autobus au diesel,  
que leur fonctionnement  
est plus silencieux et que,  
à basse vitesse, leur  
puissance est accrue ?**

## L'autobus à l'hythane

Les véhicules moteurs actuellement sur le marché sont responsables de la majeure partie des émissions polluantes : 50 % des oxydes d'azote ( $\text{NO}_x$ ), 70 % des oxydes de carbone (CO et  $\text{CO}_2$ ) et 50 % des composés organiques volatils (COV).

Comme des essais effectués par la Société des transports de la communauté urbaine de Montréal l'ont démontré, l'hythane, un carburant composé d'hydrogène (20 %) et de méthane (80 %), permet de réduire de 20 % les émissions de gaz carbonique (CO et  $\text{CO}_2$ ) et de plus de 40 % les émissions d'oxydes d'azote ( $\text{NO}_x$ ). L'hythane présente donc un potentiel intéressant pour la réduction des émissions polluantes et de la pollution de l'air en milieu urbain.



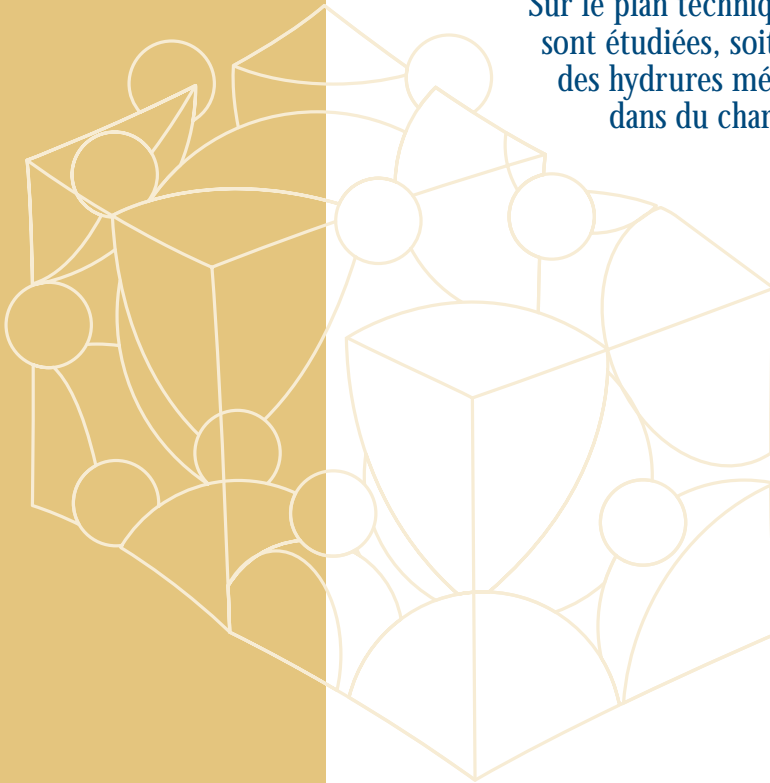
Source : IRH-UQTR

## Le stockage de l'hydrogène

Le principal obstacle lié à l'utilisation de l'hydrogène comme carburant demeure son entreposage. En effet, compte tenu de la faible densité de l'hydrogène, son entreposage sécuritaire présente des problèmes particuliers. La solution la plus simple consiste à stocker l'hydrogène sous haute pression. Toutefois, cette méthode nécessite des réservoirs lourds, encombrants et coûteux. Une autre solution envisagée est d'amener l'hydrogène sous une forme à moitié solide et liquide (slush). De cette façon, sa densité est sensiblement augmentée. Toutefois, il s'agit d'une technologie complexe et coûteuse.

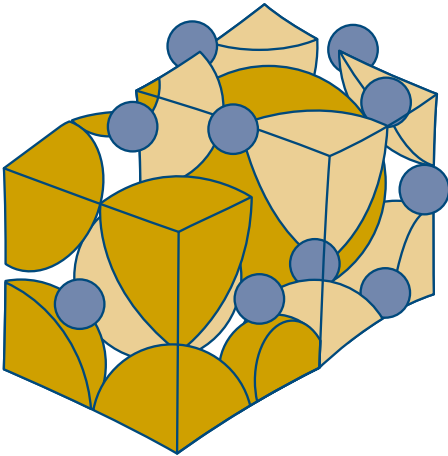
Des chercheurs québécois (Institut de recherche sur l'hydrogène de l'Université du Québec à Trois-Rivières, l'Université McGill et l'Institut de recherche d'Hydro-Québec) tentent de contourner ces difficultés en étudiant, notamment, la possibilité de stocker l'hydrogène dans des matériaux absorbants. L'avantage serait de rendre plus sécuritaire le stockage de l'hydrogène.

Sur le plan technique, deux solutions sont étudiées, soit le stockage dans des hydrures métalliques et le stockage dans du charbon activé.



*Réseau  
cristallin  
d'un hydrure  
métallique*

Source : IRH-UQTR



- Atome d'hydrogène
- Atome de magnésium
- Atome de nickel

## Le stockage dans des hydrures métalliques

Pour l'hydrogène, les hydrures métalliques (à base, par exemple, de fer ou de magnésium) présentent un bon potentiel de stockage. En effet, bien qu'ils aient une capacité de stockage relativement faible (5 % en poids), ils sont sécuritaires et capables de libérer, à pression constante, de l'hydrogène pur. Le stockage dans les hydrures fait appel à un réservoir rempli d'un alliage métallique (fer, magnésium ou autre). L'hydrogène y est injecté sous pression jusqu'à ce que les atomes de ce gaz se lient avec ceux du métal. Sous certaines conditions de température et de pression, ces derniers absorbent l'hydrogène et le retiennent comme dans une éponge.

## Le stockage dans du charbon activé

L'hydrogène peut aussi être stocké dans des réservoirs remplis de charbon activé, un matériau très poreux. Injectées sous pression, les molécules d'hydrogène se lient à la surface des micropores de ce matériau.

L'efficacité de ce procédé de stockage a déjà été démontrée dans le cas du gaz naturel. Cependant, afin d'être en mesure de se servir d'un tel procédé pour le stockage de l'hydrogène, des travaux de recherche sont en cours (Institut de recherche sur l'hydrogène de l'Université du Québec à Trois-Rivières). En effet, à température ambiante, la quantité d'hydrogène stockée serait trop faible. Aussi, pour stocker une quantité comparable à 40 % du volume d'hydrogène liquide, il est essentiel d'injecter l'hydrogène sous une haute pression atmosphérique et à basse température (-196 °C).

## Le stockage dans des nanotubes

D'autres milieux d'absorption constitués de nanotubes de carbone s'avèrent aussi intéressants pour le stockage de l'hydrogène. En effet, l'intérieur des nanotubes est constitué de pores microscopiques de tailles uniformes qui favorisent l'absorption de l'hydrogène par capillarité. L'hydrogène se fixe à la surface du carbone et remplit les micropores ; ainsi, il y reste « emmagasiné ».

Longtemps réservés aux engins spatiaux, les piles à combustible, ces générateurs chimiques d'électricité, peuvent alimenter aujourd'hui des ordinateurs, des autobus, des automobiles ou des bâtiments.

## Les piles à combustible

En 1839, le physicien anglais William Grove a démontré que la réaction chimique par laquelle l'hydrogène et l'oxygène se combinent et forment de l'eau peut produire de l'électricité. La pile à combustible qu'il a inventée a été reprise, vers 1960, par la NASA qui a commencé à utiliser ce type de pile pour alimenter, en électricité, ses véhicules spatiaux.

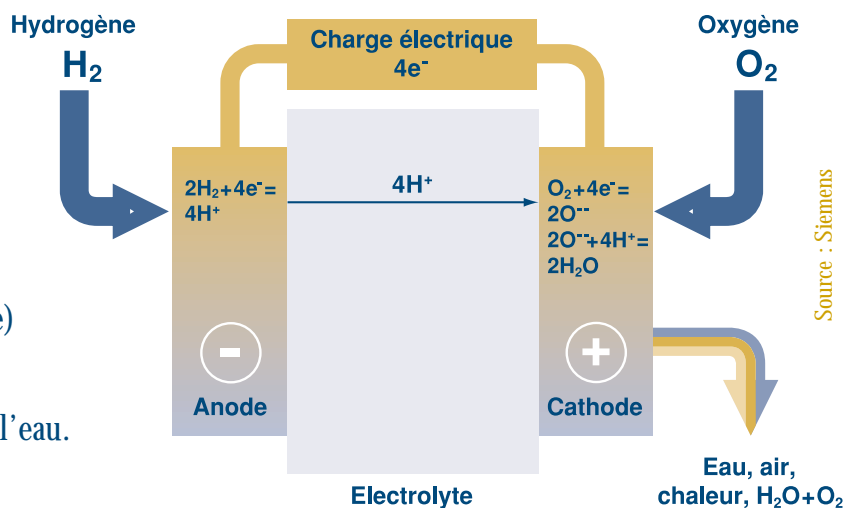
Contrairement au procédé d'électrolyse qui provoque une scission de la molécule d'eau, la pile à combustible utilise la recombinaison de l'hydrogène et de l'oxygène afin de produire de l'électricité. La pile à combustible convertit donc directement l'énergie chimique en électricité par ce processus d'oxydation en ne dégageant que de l'eau.

Près de 45 % de l'énergie chimique contenue dans l'hydrogène est convertie en électricité et la chaleur dégagée par la pile peut être utilisée à des fins de chauffage, ce qui fait de la pile à combustible l'un des systèmes énergétiques les plus efficaces.

Le fonctionnement d'une pile à combustible

La pile à combustible est constituée de deux électrodes séparées par un électrolyte, c'est-à-dire un matériau qui empêche le passage des électrons mais qui laisse cependant circuler les protons. L'hydrogène et l'oxygène circulent de part et d'autre de la cellule à travers des plaques poreuses (une anode et une cathode) reliées entre elles par un fil et séparées par l'électrolyte. Dans les cellules les plus performantes, comme celles qui sont mises au point pour les automobiles et les autobus, l'électrolyte est constitué d'une membrane polymérique.

Une membrane poreuse sépare les compartiments contenant d'une part de l'hydrogène et, d'autre part, de l'oxygène (de l'air). Au contact du platine (un catalyseur), l'hydrogène se dissocie et les électrons migrent dans le circuit électrique entre les deux électrodes, engendrant ainsi un courant électrique. Les protons (ions de l'hydrogène) passent à travers la membrane perméable et réagissent avec l'oxygène de l'air produisant de l'eau.



Diane Barry, MRN Source : IRH-UQTR



### *Cuve pour inspections par ultrasons*

Diane Barry, MRN Source : IRH-UQTR



## La sécurité

Comme bien des gaz, l'hydrogène est inflammable. Sa flamme est incolore, presque invisible et sa vitesse de propagation est très élevée, soit 2,7 mètres par seconde. Aussi, pour faire un usage sécuritaire de l'hydrogène, il est important de connaître ses caractéristiques d'inflammabilité :

- inflammabilité à des concentrations d'hydrogène dans l'air variant entre 4 % et 75 % (ce qui est très étendu par rapport à d'autres carburants) ;
- inflammabilité rapide (à partir d'une simple étincelle d'électricité statique).

Toutefois, vu sa faible densité, l'hydrogène se diffuse rapidement en s'élevant dans l'air, contrairement à d'autres carburants dont la diffusion se fait au ras du sol. Enfin, avec l'hydrogène, il y a peu de danger dans les endroits bien ventilés.

## L'action du gouvernement du Québec

Au cours des dix dernières années, le gouvernement du Québec a participé activement à des travaux de recherche-développement dans le domaine de l'hydrogène, dans le cadre du projet Euro-Québec Hydro-Hydrogène.

De plus, par le Programme d'aide au développement des technologies de l'énergie (PADTE), le ministère des Ressources naturelles du Québec appuie financièrement la réalisation de projets recherche-développement (R-D) dans le domaine de l'hydrogène. À ce jour, des groupes de chercheurs rattachés à des universités québécoises (Université McGill, Université du Québec à Trois-Rivières et Université de Sherbrooke), de même que près d'une douzaine d'entreprises, travaillent dans le domaine de la recherche sur l'hydrogène et bénéficient de l'aide gouvernementale.

