



L'ECONOMIE DE L'HYDROGÈNE

Une étude générale

PROGRAMME DES NATIONS UNIES POUR L'ENVIRONNEMENT



Copyright © Programme des Nations Unies pour l'environnement, 2006

A condition d'en mentionner la source, la présente publication peut être reproduite intégralement ou en partie sous quelque forme que ce soit à des fins pédagogiques ou non lucratives sans autorisation spéciale du détenteur du copyright. Le Programme des Nations Unies pour l'environnement souhaiterait recevoir un exemplaire de toute publication produite à partir des informations contenues dans le présent document.

L'usage de la présente publication pour la vente ou toute autre initiative commerciale quelle qu'elle soit est interdite sans l'autorisation préalable écrite du Programme des Nations Unies pour l'environnement.

Avertissement

Les termes utilisés et la présentation du matériel contenu dans la présente publication ne sont en aucune façon l'expression d'une opinion quelconque par le Programme des Nations Unies pour l'environnement à propos de la situation légale d'un pays, d'un territoire, d'une ville ou de son administration ou de la délimitation de ses frontières ou de ses limites. De plus, les opinions exprimées ne représentent pas nécessairement la décision ou la politique officielle du Programme des Nations Unies pour l'environnement, de même que la mention de marques ou de méthodes commerciales ne constitue une recommandation.

ISBN: 92-807-2685-4

Table des matières

Remerciements	3
Introduction	4
Économie de l'hydrogène et développement durable	6
Qu'est-ce que l'hydrogène ?	6
Implications écologiques de l'hydrogène	7
Un système énergétique planétaire à l'hydrogène	10
Défis techniques et financiers	12
Production, distribution et stockage de l'hydrogène	12
Piles à combustible à usage mobile et stationnaire	15
Capture et stockage du carbone	19
La transition vers l'économie de l'hydrogène	22
Investissement en infrastructures pour hydrogène	22
Soutien gouvernemental	25
Projections à long terme de l'utilisation de l'hydrogène	28
L'hydrogène et le monde en développement	30
Pertinence de l'hydrogène pour les économies en développement	30
Implications pour la politique énergétique nationale	31
Rôle des organisations internationales et non gouvernementales	33
Messages clés	35
Annexe A : acteurs clés de la recherche et développement sur l'hydrogène	37
Programmes nationaux et régionaux	37
Secteur privé	42
Coopération internationale	43
Annexe B : références et sources d'informations	44

Remerciements

Le présent rapport a été commandé par la Division Technologie, Industrie et Économie du Programme des Nations Unies pour l'environnement. Mark Radka et Daniel Puig se sont chargés de la gestion du projet, avec l'assistance scientifique de Jorge Rogat. Trevor Morgan, de Menecon Consulting, en est le principal auteur.

Ce rapport a bénéficié des commentaires et suggestions de Gert Jan Kramer de Shell Hydrogen, Hans Larsen de Risø National Laboratory (Danemark), Jianxin Ma de l'université de Tongji (Chine), Stefan Metz de Linde AG, Wolfgang Scheunemann de Dokeo GmbH (Allemagne), Hanns-Joachim Neef (Allemagne) et Thorsteinn I. Sigfusson (Islande) (co-présidents du *Comité de mise en œuvre et de liaison* du Partenariat international pour l'économie de l'hydrogène) et Giorgio Simbolotti de l'Agence internationale de l'énergie. Nous leur adressons notre profonde gratitude pour leur aide.

Introduction

Il règne au sein de la sphère politique, des organisations écologiques, des analystes de l'énergie et des grands industriels un sentiment croissant selon lequel l'hydrogène représente le carburant de l'avenir et qu'il révolutionnera la façon dont nous produisons et consommons l'énergie. À long terme, il est clair que notre dépendance à une énergie fossile limitée n'est pas tenable, tant écologiquement qu'économiquement. L'envolée des prix du pétrole au cours des dernières années a attiré l'attention sur les risques de la dépendance envers le pétrole et le gaz au plan de la sécurité énergétique. Elle a en outre suscité la prise de conscience que le monde commence à épuiser ses réserves de carburant bon marché, en hâtant ainsi l'impératif d'une mutation vers des technologies énergétiques plus sûres et plus propres. Parmi l'éventail de technologies de cet ordre susceptibles d'être préconisées à grande échelle dans un avenir prévisible, l'hydrogène est largement considéré comme la plus prometteuse. Le remplacement des combustibles fossiles par l'hydrogène dans les consommations d'énergie finale pourrait se traduire par des atouts écologiques majeurs, sous réserve que soient surmontés les défis techniques, écologiques et financiers relatifs au mode de production, d'acheminement, de stockage et d'utilisation de l'hydrogène.

Le PNUE suit avec grand intérêt l'évolution de la technologie de l'énergie hydrogène. En effet, celle-ci offre la perspective de constituer le socle d'un avenir énergétique durable, à savoir un avenir où les répercussions écologiques de la production et de la consommation énergétiques se voient considérablement réduites, voire éliminées. Effectivement, à moins de présenter un intérêt écologique majeur, l'économie de l'hydrogène ne deviendra probablement jamais réalité. Il existe cependant certains malentendus fort répandus sur le rôle que l'hydrogène serait susceptible de jouer au sein du système énergétique mondial, sur la vitesse à laquelle il pourrait être commercialisé à grande échelle et sur son incidence sur l'environnement. Le PNUE estime donc important de tenir informés les pays, notamment les pays en développement, du potentiel, du coût et de l'intérêt réels de l'hydrogène et de balayer les idées reçues.

Dans le droit fil de sa mission visant à promouvoir et faciliter l'adoption de technologies écologiques, le PNUE a décidé d'élaborer ce document d'information sur l'économie de l'hydrogène. En des termes non techniques, il expose les principaux enjeux liés à la transition vers un système énergétique mondial fondé sur l'hydrogène. Il se veut une évaluation réfléchie de l'état actuel de l'évolution technologique, des défis techniques et financiers qu'il faudra surmonter et des perspectives de déploiement commercial. Il se penche également sur ce que l'émergence de l'hydrogène en tant que technologie énergétique viable signifierait en termes d'orientations politiques, notamment dans les économies en développement.

La première partie de ce rapport décrit brièvement comment l'économie de l'hydrogène fonctionnerait et ce que cela pourrait signifier pour l'environnement. La partie suivante examine les défis financiers et techniques qu'il conviendra de surmonter pour que l'hydrogène devienne commercialement viable à grande échelle. La troisième partie aborde les obstacles potentiels au développement d'un système à hydrogène ainsi que la nécessité du soutien du gouvernement, et présente les projections à long terme de l'utilisation de l'hydrogène. Ensuite, le rapport considère la pertinence de l'hydrogène pour les économies en développement et son implication sur le plan de la politique menée à l'échelon national, ainsi que le rôle des organisations internationales et non gouvernementales. Enfin, la conclusion résume les messages clés figurant dans ce rapport.

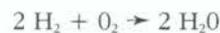
L'annexe A décrit les activités des principaux acteurs de la recherche et développement de l'énergie hydrogène. En annexe B figurent les références à certaines publications sur l'hydrogène, de même que l'adresse de sites web intéressants pour les lecteurs désireux d'en savoir davantage sur les évolutions et programmes ayant trait à l'hydrogène.

Économie de l'hydrogène et développement durable

Ces dernières années, en réponse à une inquiétude de plus en plus marquée à l'égard de l'impact écologique de la consommation d'énergie et à une vive préoccupation sur la sécurité des réserves de combustibles fossiles, la fourniture de services énergétiques à base d'hydrogène suscite un intérêt croissant. L'hydrogène, comme vecteur énergétique, peut en principe remplacer toutes les formes d'énergies utilisées aujourd'hui et fournir des services énergétiques à tous les secteurs de l'économie. L'attrait fondamental de l'hydrogène tient à ses avantages écologiques potentiels par rapport aux combustibles fossiles. Sur le lieu d'utilisation, l'hydrogène peut être brûlé de manière à ne dégager aucune émission toxique. Produit sans émettre de dioxyde de carbone ni aucun autre gaz à effet de serre dérégulant le climat, l'hydrogène pourrait donc constituer le fondement d'un système énergétique réellement durable : l'économie de l'hydrogène.

Qu'est-ce que l'hydrogène ?

L'hydrogène est l'élément le plus simple, le plus léger et le plus abondant de l'univers dont il constitue 90 % de la matière. Uniquement composé d'un électron et d'un proton, il s'agit donc du premier élément du tableau périodique. À l'état normal, c'est-à-dire gazeux, l'hydrogène est inodore, insipide, incolore et non toxique. L'hydrogène brûle aisément avec l'oxygène en dégageant des quantités considérables d'énergie sous forme de chaleur et en ne produisant que de l'eau comme rejet :



Quand l'hydrogène brûle dans l'air majoritairement composé d'azote, certains oxydes d'azote, facteurs de smog et de pluie acide, se forment. Hautement inflammable, l'hydrogène possède une large plage d'inflammabilité. Il brûle lorsqu'il représente de 4 à 74 % du volume d'air. Il a une teneur énergétique élevée, presque le triple de l'essence, par exemple. Par contraste, l'hydrogène présente une faible densité énergétique volumique à température et pression atmosphérique standards. Un seul gramme de gaz hydrogène à température ambiante occupe environ 11 litres d'espace. Le stockage du gaz sous pression ou à une température inférieure à -253°C , seuil où il se liquéfie, augmente sa densité volumique.

L'hydrogène est un vecteur énergétique et non pas une source (encadré 1). N'existant pas à l'état naturel sur terre, il doit être fabriqué en utilisant comme matière première un composé riche en hydrogène. Aujourd'hui, l'hydrogène est principalement produit par reformage à la vapeur du gaz naturel, mais peut aussi être extrait d'autres hydrocarbures par reformage ou oxydation partielle. L'un des travers majeurs du traitement d'hydrocarbures est l'émission de dioxyde de carbone et de polluants aéroportés. La plupart des autres procédés de production en usage ou en cours d'élaboration impliquent l'électrolyse de l'eau par l'électricité. Cette méthode ne dégage aucune émission, mais est généralement plus onéreuse que le reformage d'hydrocarbures ou l'oxydation car elle exige davantage d'énergie et l'électricité est, dans la plupart des cas, plus chère que les combustibles fossiles. Actuellement, la production commerciale d'hydrogène à travers le monde s'élève à environ 40 millions de tonnes, soit environ 1 % des besoins énergétiques primaires de la planète. Cette production est essentiellement employée comme matière première dans les industries pétrochimiques, alimentaires, électroniques et métallurgiques.

Encadré 1 : sources et vecteurs d'énergie

Les sources d'énergie primaire telles que le charbon, le pétrole et le gaz naturel stockent diverses formes d'énergie cinétique ou potentielle. Elles existent à l'état naturel. On peut soit les brûler directement pour fournir un service énergétique, chauffer des bâtiments par exemple, soit les transformer en sources d'énergie secondaire pour leur consommation finale. La transformation énergétique permet de transporter ou d'acheminer l'énergie sous une forme plus commode ou mieux exploitable. L'électricité est la source d'énergie secondaire la plus commune. L'hydrogène est également une source secondaire, car il doit être produit à l'aide d'une source riche en hydrogène. Il peut être converti en énergie (chaleur) soit par combustion, soit par réaction électrochimique afin de générer de la chaleur et de l'électricité. Les sources secondaires sont également appelées vecteurs énergétiques.

L'hydrogène a le potentiel de fournir des services énergétiques à tous les secteurs de l'économie : transports, bâtiment et industrie. Il peut compléter ou remplacer l'électricité par réseau – l'autre vecteur énergétique principal – dans les consommations d'énergie finale. L'hydrogène peut proposer des options de stockage pour les technologies électriques renouvelables intermittentes, le solaire et l'éolien par exemple. De surcroît, utilisé comme alimentation d'un appareil appelé pile à combustible, il est reconvertible en énergie électrique de manière efficace dans des applications stationnaires ou mobiles. Ainsi, les piles à combustible alimentées par hydrogène pourraient un jour remplacer les carburants pétroliers conventionnels dans les voitures et camions. L'hydrogène est en outre une technologie attrayante pour les collectivités reculées qu'il est économiquement impossible d'alimenter en électricité via un réseau. Productible à partir de sources d'énergie variées – fossile, nucléaire ou renouvelable – l'hydrogène peut réduire la dépendance des importations et améliorer la sécurité énergétique.

Implications écologiques de l'hydrogène

L'attrait fondamental de l'hydrogène, principal moteur des activités de recherche et développement actuelles, tient à ses avantages écologiques par rapport aux combustibles fossiles. L'hydrogène ne saurait toutefois être plus propre que les technologies mises en œuvre pour le produire et l'utiliser. Le

Le remplacement des combustibles fossiles par l'hydrogène en matière de fourniture de services énergétiques pourrait présenter un intérêt écologique majeur, à condition d'utiliser cet hydrogène dans des piles à combustible et de réduire les rejets de gaz carbonique et gaz nocifs au cours de son processus de production.

remplacement des combustibles fossiles par l'hydrogène dans la fourniture de services énergétiques pourrait présenter un intérêt écologique majeur, à condition d'utiliser cet hydrogène dans des piles à combustible non polluantes et de réduire ou éliminer les rejets de dioxyde de carbone et gaz nocifs au cours de son processus de production. Sur le lieu d'utilisation, la combustion de l'hydrogène en présence d'oxygène dans une pile à combustible ne dégage aucune émission toxique, mais uniquement de l'énergie électrique et de l'eau. La production d'hydrogène peut être exempte d'émissions si l'énergie employée pour sa production est d'origine nucléaire ou renouvelable ou si elle est issue de combustibles fossiles et que le dioxyde de carbone rejeté est capturé au point de production et stocké définitivement.

Le transport routier constitue une source importante et croissante à la fois de polluants atmosphériques et de gaz à effet de serre impliqués dans le dérèglement climatique. Il existe des preuves manifestes de l'incidence néfaste pour la santé humaine de l'exposition aux polluants émis par les voitures et camions. En conséquence, la qualité de l'air ambiant est devenue un enjeu politique de premier plan dans la quasi-totalité des pays. Dans nombre de grandes villes et agglomérations du monde en développement, la pollution de l'air atteint une ampleur sans précédent. Grâce aux améliorations apportées à la qualité des carburants, aux économies de carburant et à l'installation d'appareils de contrôle des émissions sur les véhicules, la plupart des pays industrialisés ont accompli des progrès notables dans la réduction de la pollution engendrée par les voitures et camions. Toutefois, la hausse du trafic routier a en partie contrecarré l'amélioration des performances en matière d'émissions.

En raison de la pollution croissante issue du trafic routier, les véhicules font l'objet d'initiatives destinées à développer les piles à combustible. Le remplacement des moteurs à combustion interne fonctionnant à l'essence ou au diesel par des piles à combustible fonctionnant à l'hydrogène éliminerait, en principe, la pollution provoquée par les véhicules routiers. Les piles à combustible peuvent en outre servir à alimenter des processus industriels et des bâtiments et remplacer ainsi l'utilisation directe des produits pétroliers, du gaz naturel et du charbon.

L'hydrogène pourrait par ailleurs contribuer à réduire ou éliminer les émissions de dioxyde de carbone et autres gaz à effet de serre. Pour en arriver là, il faudrait que le procédé de fabrication de l'hydrogène soit exempt de carbone ou, en tout cas, plus propre que les systèmes énergétiques actuels à base de combustibles fossiles. Il serait possible d'y parvenir de trois manières : par électrolyse au moyen d'électricité exclusivement issue du nucléaire ou de sources d'énergie renouvelables, par le reformage à la vapeur de combustibles fossiles combiné à de nouvelles technologies de capture et stockage du carbone et par des techniques thermochimiques ou biologiques fondées sur une biomasse renouvelable.

En dépit des avantages écologiques potentiels, locaux et planétaires que présente le passage à l'hydrogène, il subsiste un certain nombre d'incertitudes sur les autres conséquences écologiques d'une mutation à grande échelle vers

une économie de l'hydrogène. Celles-ci concernent principalement les effets potentiels du rejet d'importantes quantités d'hydrogène dans l'atmosphère. L'usage généralisé de l'hydrogène rendrait ces rejets inévitables, leurs effets demeurant toutefois très incertains car les scientifiques n'ont toujours qu'une compréhension limitée du cycle de l'hydrogène. Toute accumulation de concentrations d'hydrogène dans l'atmosphère pourrait avoir plusieurs répercussions dont la plus grave concernerait la concentration accrue de vapeur d'eau dans la couche supérieure de l'atmosphère et, indirectement, la destruction de la couche d'ozone. La hausse des rejets d'hydrogène risquerait de surcroît d'amoinir la capacité oxydante de l'atmosphère et, par conséquent, d'accroître les polluants aéroportés et les gaz à effet de serre tels que le méthane, les hydrochlorofluorocarbures (HCFC) et les hydrofluorocarbones (HFC). La poursuite des recherches s'impose afin de parvenir à une meilleure compréhension des sources et puits d'hydrogène.

La sécurité est un enjeu crucial. Contrairement à l'idée reçue, l'hydrogène est en fait moins inflammable que les produits pétroliers légers, l'essence par exemple, et la plupart des autres combustibles fossiles (encadré 2). Néanmoins, la nécessité de le transporter et de le stocker sous haute pression ou à température extrêmement basse entraîne d'autres dangers. Il est amplement établi qu'avec une manipulation et des contrôles adéquats, l'hydrogène peut être aussi sûr que les carburants en usage de nos jours. En effet, l'hydrogène est depuis longtemps employé en toute sécurité dans l'industrie. Cependant, pour qu'il se fasse accepter largement dans d'autres applications, il sera de plus en plus important d'édicter et instaurer des règles, réglementations, normes et codes internationaux régissant la construction, la maintenance et l'exploitation sécurisées des infrastructures et équipements à hydrogène, d'un bout à l'autre de la chaîne logistique. L'uniformisation des exigences sécuritaires et leur stricte application seront essentielles pour asseoir la confiance des consommateurs.

Encadré 2 : l'hydrogène déchargé de la responsabilité de la catastrophe du Hindenburg

Les images télévisées de la spectaculaire destruction du dirigeable Hindenburg affectent la perception de l'hydrogène par le grand public et l'acceptation de ce gaz comme vecteur énergétique sûr. Le Hindenburg s'est brusquement embrasé sous les yeux d'une foule de journalistes et de caméras lors de son atterrissage au New Jersey (États-Unis) le 6 mai 1937. La catastrophe a été imputée à l'inflammabilité de l'hydrogène qui alimentait l'aéronef et a mis effectivement un terme aux voyages en dirigeable. Or, une étude menée en 1997 par un ingénieur retraité de la National Aeronautics and Space Administration (NASA), Addison Bain, conclut que l'hydrogène n'a joué aucun rôle dans le déclenchement de l'incendie du Hindenburg. Selon cette étude, le vernis appliqué sur l'enveloppe du dirigeable renfermait un composant semblable au combustible des fusées et a été la cause première de l'embrasement. Alors que le Hindenburg atterrissait, une décharge électrique a mis le feu à son enveloppe et les flammes ont dévoré le dirigeable sans tarder. Sur les 37 victimes, 35 sont décédées en sautant ou en tombant à terre. Seules deux d'entre elles ont succombé à des brûlures provoquées par le revêtement enflammé et par le combustible diesel embarqué. L'hydrogène a brûlé rapidement vers le haut et à l'écart des passagers.

Un système énergétique planétaire à l'hydrogène

Le passage à un système énergétique à l'hydrogène constituerait l'ultime étape sur la voie de la rupture avec l'énergie fossile à base de carbone. Le système énergétique mondial s'est progressivement écarté du carbone tandis qu'il passait du charbon au pétrole, puis au gaz naturel. Les technologies de production, stockage, transport et conversion de l'hydrogène en énergie exploitable dans des applications finales, les piles à combustible notamment, existent déjà. Des technologies de capture du dioxyde de carbone et des autres gaz émis au cours du processus de production de l'hydrogène à partir de combustibles fossiles ont, elles aussi, été dévoilées. La plupart des grands constructeurs automobiles prévoient de lancer la production commerciale de voitures à pile à combustible d'ici quelques années, tandis que de petites piles à combustible destinées à alimenter en électricité les collectivités reculées font déjà leur apparition sur le marché. La plupart des grandes compagnies pétrolières ont des programmes actifs de recherche sur l'hydrogène ainsi que sur la capture et le stockage du carbone. Dès à présent, il est donc possible d'imaginer à quoi ressemblerait l'économie de l'hydrogène (encadré 3).

Encadré 3 : une vision futuriste de l'économie de l'hydrogène

À quoi ressemblerait une économie de l'hydrogène ? Faisons un bond dans l'avenir, dans un siècle ou peut-être bien moins. Le monde a accompli la transition vers l'économie de l'hydrogène. Un système efficace et compétitif de production, stockage et transport de l'hydrogène a été bâti. L'hydrogène est désormais une énergie propre, sûre et durable qui fait l'objet d'un consensus. Les émissions n'atteignent plus qu'une fraction de leur niveau ultérieur malgré l'ampleur de la population mondiale et de l'économie. Les villes et agglomérations fourmillent de véhicules à hydrogène ultra efficaces qui acheminent passagers et marchandises, ne rejettent que de la vapeur d'eau et se déplacent en produisant un bourdonnement des plus discrets. Nombre de ces véhicules se réapprovisionnent auprès de stations publiques où l'hydrogène provient de canalisations reliées aux sites de production centralisés. D'autres remplissent leur réservoir d'hydrogène chez eux ou sur leur lieu de travail à l'aide de petits reformeurs de gaz naturel ou de systèmes électrolytiques fonctionnant aux énergies renouvelables dont certains utilisent des dispositifs photovoltaïques.

Dans ce monde futur, il est possible d'opter pour l'électricité fournie par le réseau ou pour une pile à combustible spéciale fournissant de l'électricité et de l'énergie thermique pour le chauffage et la climatisation qui permet aux hommes de subvenir à leurs propres besoins énergétiques. Cette pile à combustible est alimentée avec l'hydrogène produit par un petit reformeur au moyen du gaz naturel fourni par les canalisations du réseau local de distribution. L'électricité est produite dans des centrales électriques à partir de charbon gazéifié ou de gaz naturel. Le carbone rejeté est capturé puis acheminé par conduite jusqu'à un site de stockage ou converti en produits solides utiles et sûrs. Une partie de l'hydrogène produit est brûlé dans des turbines à gaz à haute performance afin de fournir de l'électricité, une partie étant acheminée à la clientèle via des canalisations afin d'alimenter les véhicules et les centrales de production distribuée. Les sources d'énergie renouvelables contribuent à la production de l'électricité comme à celle de l'hydrogène. L'hydrogène sert à stocker l'énergie intermittente générée par des turbines à vent et des systèmes photovoltaïques.

Source: Adapté de Commonwealth Government of Australia (2003).

Avant que l'économie de l'hydrogène ne devienne une réalité, il faudra des avancées majeures en matière de technologie et de coûts. Le coût de la fourniture de l'énergie hydrogène à l'aide des technologies actuelles, dont l'élaboration s'est échelonnée sur plusieurs décennies, demeure très élevé par

rapport aux technologies énergétiques conventionnelles. Il faut de plus résoudre certains problèmes techniques importants. Les principaux domaines où il convient de réaliser des progrès sont : les piles à combustible, la production d'hydrogène à partir d'énergies renouvelables, les infrastructures de distribution et stockage conformes aux normes écologiques et sécuritaires ainsi que la capture et le stockage du carbone, faute de quoi l'hydrogène risque de ne jamais être une solution énergétique viable. Pour y parvenir, il faudra considérablement intensifier les activités de recherche et développement.

Avant que l'économie de l'hydrogène ne puisse devenir réalité, il faudra des avancées majeures en matière de technologie et de coûts.

Inévitablement, le rythme du progrès technologique et de ses retombées sur la réduction des coûts de l'hydrogène est extrêmement incertain et difficile à prédire. En effet, il n'est nullement certain que l'hydrogène devienne *jamais* compétitif. Il se pourrait que l'évolution rapide des technologies de capture et stockage du carbone nous permettent de continuer à utiliser les combustibles fossiles pour produire de l'électricité de manière écologiquement acceptable et à un coût raisonnable. Les ressources de la Terre en pétrole, gaz naturel et charbon sont assurément assez importantes pour satisfaire nos besoins énergétiques pendant de nombreuses décennies encore. Il est envisageable que des batteries électriques optimisées sur les voitures et camions ou l'amélioration des performances d'émissions des technologies en usage de nos jours s'avèrent la solution privilégiée aux problèmes de pollution urbaine. Il est aussi possible que les sources d'énergie renouvelable ou le nucléaire se révèlent plus économiques face à la menace de réchauffement planétaire.

En revanche, si l'hydrogène s'affirme effectivement comme vecteur énergétique compétitif, il n'échangera pas du jour au lendemain les systèmes existants à cause du lent remplacement des investissements considérables en équipement qui forme le système énergétique mondial. De surcroît, le déploiement à grande échelle des technologies de capture et stockage du carbone, vraisemblablement clé de l'économie de l'hydrogène tant que les combustibles fossiles demeureront la principale source d'énergie primaire du monde, restera une entreprise pharaonique. La transition vers une économie de l'hydrogène sera par conséquent progressive, éventuellement échelonnée sur plusieurs décennies. L'édification d'une infrastructure entièrement nouvelle pour la distribution de l'hydrogène sera sans nul doute coûteuse ainsi que risquée et constituera donc un obstacle majeur au passage à l'hydrogène. Il faudra de plus convaincre les consommateurs que l'hydrogène est économique, pratique et sûr. Outre la poursuite des gros investissements en recherche, développement et démonstration, de fortes incitations administratives seront certainement nécessaires pour accélérer le processus de transition.

Défis techniques et financiers

Pour que l'hydrogène soit en mesure de concurrencer les technologies énergétiques existantes et, au bout du compte, de les remplacer, de formidables défis techniques et financiers doivent être surmontés. Les avancées les plus importantes à accomplir concernent le transport et le stockage du combustible ainsi que les piles à combustible des véhicules. De plus, les technologies de capture du dioxyde de carbone émis lors de la production d'hydrogène à partir de combustibles fossiles et de son stockage en sous-sol doivent faire leurs preuves de manière concluante et à grande échelle. La compétitivité de l'hydrogène par rapport aux technologies actuelles basées sur les énergies fossiles et renouvelables nécessite également de sérieuses réductions des coûts, en particulier dans la fabrication des piles à combustible. Cependant, les récentes avancées technologiques et l'essor des investissements publics et privés en recherche et développement et démonstration semblent indiquer que les percées techniques et la maîtrise des coûts indispensables sont susceptibles d'aboutir en une génération.

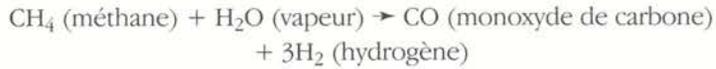
Le reformage à la vapeur des combustibles fossiles, technologie commercialement éprouvée, est de loin le moyen le moins onéreux de fabriquer de l'hydrogène, et risque de le rester à l'avenir.

Production, distribution et stockage de l'hydrogène

Sur le chemin qui mène à l'économie de l'hydrogène, la production efficace et propre de l'hydrogène constitue l'obstacle majeur. Vecteur d'énergie, l'hydrogène doit être fabriqué à partir d'une source d'énergie primaire. De nombreuses méthodes industrielles de production d'hydrogène sont aujourd'hui disponibles, mais toutes sont plus onéreuses que si la même quantité d'énergie était produite à partir de formes d'énergie conventionnelles (le coût étant plusieurs fois supérieur à celui des combustibles fossiles). Les systèmes de distribution et de stockage nécessaires à la fourniture d'hydrogène à grande échelle sont également bien plus coûteux en raison de la faible densité énergétique volumique du combustible. D'importantes avancées technologiques sont requises pour que les coûts de production, distribution et stockage diminuent de manière suffisante et permettent à l'hydrogène de concurrencer les combustibles actuels.

Aujourd'hui, la quasi-totalité de la production d'hydrogène dans le monde se fait à partir du **reformatage à la vapeur de combustibles fossiles** utilisant un catalyseur au nickel. Actuellement, cette technologie commercialement éprouvée est de loin la plus abordable pour fabriquer de l'hydrogène à grande

échelle. Dans la plupart des cas, le gaz naturel (méthane) constitue la matière première. Le méthane réagit d'abord avec la vapeur pour produire du monoxyde de carbone et de l'hydrogène. Le monoxyde de carbone, passé sur un catalyseur d'oxyde de fer ou d'oxyde de cobalt chaud, réagit ensuite avec la vapeur pour produire du dioxyde de carbone et des quantités supplémentaires d'hydrogène :



Le gaz naturel est en général la matière première la moins onéreuse pour produire de l'hydrogène par reformage à la vapeur. La production d'hydrogène à partir de gaz naturel coûte pourtant encore le double ou le triple de la production d'essence à partir de pétrole brut, sans compter le coût de la capture et du stockage du dioxyde de carbone émis au cours du processus. Divers pays mènent des recherches destinées à améliorer l'efficacité du reformage à la vapeur du gaz et des autres combustibles fossiles et à diminuer les coûts de production.

L'oxydation partielle du méthane (gaz naturel) est également employée pour produire de l'hydrogène. Ce procédé implique la réaction du méthane avec de l'oxygène pour produire de l'hydrogène et du monoxyde de carbone qui réagit ensuite avec de l'eau pour produire davantage d'hydrogène et de dioxyde de carbone. Le rendement global du reformage à la vapeur étant généralement supérieur à celui de cette conversion, il devrait continuer à dominer la production commerciale à l'avenir.

La gazéification du charbon, la plus ancienne technique de fabrication d'hydrogène, est toujours employée dans certaines parties du monde. Elle servait à produire le « gaz de ville » qui alimentait les métropoles d'Europe, d'Australie et d'ailleurs avant que le gaz naturel ne soit disponible. Le charbon est chauffé jusqu'à ce qu'il passe à l'état gazeux, puis est mélangé à la vapeur en présence d'un catalyseur afin de produire un mélange d'hydrogène (environ 60 %), de monoxyde de carbone, de dioxyde de carbone et d'oxydes de soufre et d'azote. Ce gaz de synthèse peut ensuite être reformé à la vapeur pour en extraire l'hydrogène ou simplement brûlé pour générer de l'électricité. La gazéification du charbon pour la production électrique peut être plus efficace thermiquement et moins polluante que les centrales thermiques conventionnelles au charbon. En matière de gazéification du charbon, la recherche se concentre sur le traitement des émissions d'oxydes de soufre et d'azote - polluants majeurs - et de dioxyde de carbone, avec et sans combustion du gaz de synthèse dans la centrale.

L'hydrogène peut également être produit à partir de la *biomasse*, notamment les résidus des récoltes, le bois et le fumier, au moyen de techniques thermochimiques de pyrolyse et de gazéification. Ces procédés produisent un gaz de synthèse riche en carbone qui peut être reformé en hydrogène de la même manière que le gaz naturel ou le gaz de synthèse à base de charbon. L'avantage de la biomasse sur les combustibles fossiles est qu'elle ne produit aucune émission

nette de dioxyde de carbone puisque le carbone rejeté dans l'atmosphère a précédemment été absorbé par les plantes via la photosynthèse. Néanmoins, à l'exception des lieux reculés où l'approvisionnement en biomasse est abondant et bon marché, les coûts de production d'hydrogène à partir de la biomasse sont en général bien supérieurs à ceux des combustibles fossiles. Les méthodes purement biologiques, impliquant des techniques de fermentation, digestion anaérobie et processus métaboliques, visant à produire de l'hydrogène à partir de la biomasse sont également à l'étude, mais, pour l'heure, elles sont loin d'être compétitives par rapport aux techniques conventionnelles fondées sur les combustibles fossiles.

La production d'hydrogène par *électrolyse de l'eau* est à ce jour minime car elle requiert de grandes quantités d'électricité, dont le coût est élevé. Cette technique n'est normalement employée que pour produire de l'hydrogène d'une pureté très élevée et indispensable à certains procédés industriels ou à des produits tels que les alcalins chlorés, dont l'hydrogène est un sous-produit. L'électrolyse pourrait cependant servir à produire de petites quantités d'hydrogène à proximité du point d'utilisation, par exemple à des stations de réapprovisionnement. Pour être économique, il faudrait que l'électricité soit bon marché. Les avantages écologiques de l'énergie hydrogène tirée de l'électrolyse dépendent de la façon dont l'électricité est produite. Si elle provenait du nucléaire ou de sources d'énergie renouvelables (vent, solaire, biomasse), l'électrolyse produirait de l'hydrogène exempt de carbone. Il faudrait néanmoins de fortes baisses du coût de l'électricité issue du renouvelable et du nucléaire pour permettre à l'hydrogène produit par électrolyse de concurrencer les sources d'énergie conventionnelles à grande échelle.

Il faudrait de fortes baisses du coût de l'électricité issue du renouvelable et du nucléaire pour permettre à l'hydrogène produit par électrolyse de concurrencer les sources d'énergie conventionnelles à grande échelle.

On estime qu'il existe un potentiel pour réduire les coûts de production de l'hydrogène. En 2005, le *Department of Energy* des États-Unis a fixé son nouvel objectif de coût de production à 2 - 3 dollars par gallon d'essence équivalent (en prix 2005) d'ici à 2015, quel que soit le mode de production de l'hydrogène. Pour y parvenir, il faudrait diviser par deux les coûts actuels. Le reformage à la vapeur du gaz naturel ou d'autres combustibles fossiles risque de rester le moyen le plus économique de produire de l'hydrogène dans un avenir prévisible, hormis là où l'électricité est disponible à très faible coût.

Quel que soit le mode de production de l'hydrogène, la généralisation de son usage nécessitera de vastes infrastructures pour l'acheminer, le distribuer, le stocker et alimenter des véhicules ou pour usage stationnaire. En raison de sa faible densité énergétique volumique, l'hydrogène doit être comprimé et stocké sous forme de gaz dans un récipient pressurisé ou, par souci pratique, réfrigéré et stocké dans un réservoir cryogénique d'hydrogène liquide. De nos jours, ces techniques sont toutes deux éprouvées et utilisées commercialement, mais elles consomment des quantités considérables d'énergie et les réservoirs coûtent cher à fabriquer et exploiter. Les possibilités de stockage efficace et sécurisé de l'hydrogène à l'état solide sont l'objet de recherches à l'heure actuelle.

Transport et distribution sont confrontés à des problèmes similaires. L'hydrogène comprimé peut être acheminé par pipelines, mais cette technique, intrinsèquement très consommatrice d'énergie, n'est économique que sur de courtes distances. Quelques petits systèmes de

pipelines d'hydrogène fonctionnent actuellement, essentiellement aux États-Unis et en Europe, mais aucun ne dépasse 200 kilomètres de long. Sur de plus longues distances, il revient moins cher de transporter l'hydrogène par la route, par voie ferrée ou en péniche dans des réservoirs cryogéniques. Il est ensuite vaporisé sur le lieu d'utilisation. Le succès de la recherche et du développement portant sur la baisse des coûts de transport et sur les méthodes de stockage aura une incidence à la fois sur la viabilité de l'hydrogène comme vecteur d'énergie ainsi que sur le choix d'une production soit centralisée soit décentralisée (encadré 4).

Encadré 4 : distinction entre production d'hydrogène centralisée et décentralisée

On peut produire l'hydrogène de deux manières : à grande échelle sur des sites centralisés pour l'approvisionnement massif ou dans de petites installations disséminées utilisant des sources d'énergie locales. Le choix du mode de production a des implications importantes sur les besoins en infrastructures et en combustibles. La production centralisée permettrait des économies d'échelle et favoriserait certaines matières premières ou technologies, notamment le reformage à la vapeur et la gazéification du charbon. Le principal inconvénient réside dans la nécessité de bâtir les infrastructures capables de transporter et de distribuer l'hydrogène, éventuellement sur de longues distances. Il pourrait être envisagé de convertir les gazoducs existants à l'hydrogène sous réserve de modification éventuelle ou de remplacement des compresseurs et valves. Une alternative consisterait à mélanger de petits volumes d'hydrogène (15 % maximum) à du gaz naturel, ce qui éviterait d'avoir à modifier le réseau de distribution du gaz. Toutefois, la séparation des deux gaz au point de livraison entraînerait des coûts supplémentaires.

La production décentralisée, impliquant de plus petites usines situées à proximité des centres de demande, pourrait réduire les coûts de livraison, mais les coûts de production unitaires seraient très vraisemblablement plus élevés, hormis peut-être là où des matières premières bon marché sont disponibles. L'un des atouts de la production décentralisée tient au fait que les usines nécessiteraient des investissements réduits et que la production pourrait graduellement augmenter au rythme de la demande au cours des premières phases du développement du marché. Autre avantage, si le gaz naturel est la matière première privilégiée, le système actuel de distribution du gaz naturel pourrait servir à alimenter les usines d'hydrogène. L'inconvénient majeur est que la capture du carbone serait probablement bien plus onéreuse que dans les usines centralisées. L'électrolyse de l'eau pourrait se prêter davantage à la production décentralisée que centralisée, en fonction de la disponibilité locale d'électricité bon marché.

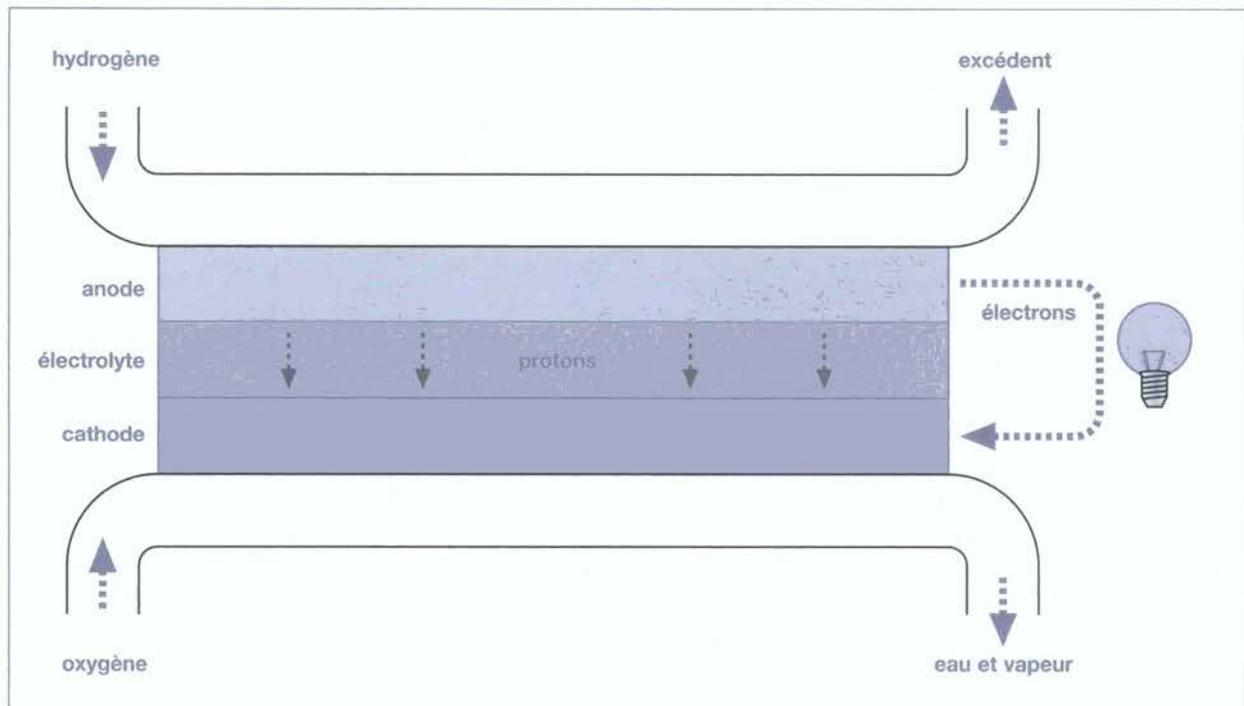
En pratique, le choix entre production centralisée et localisée dépendra des évolutions technologiques et des coûts. La production centralisée pourrait se révéler rentable à long terme, mais la production localisée pourrait continuer à jouer un rôle important dans certaines situations.

Piles à combustible à usage mobile et stationnaire

La pile à combustible, inventée par l'Anglais William Grove en 1839, a une longue histoire. Le terme *pile à combustible* a été forgé en 1889 par Ludwig Mond et Charles Langer qui ont essayé de construire le premier prototype à l'aide d'air et de gaz de houille. Les piles à combustible ont été employées dans les programmes spatiaux américains et soviétiques des années 1960 et 1970. Bien que l'hydrogène puisse être brûlé de manière conventionnelle dans des chaudières, turbines et moteurs à combustion interne, les piles à combustible semblent être la technologie optimale pour exploiter l'hydrogène grâce à leur rendement élevé.

Une pile à combustible est un appareil qui utilise un combustible riche en hydrogène et de l'oxygène pour produire de l'énergie électrique par réaction électrochimique. La pile comporte deux électrodes, une anode (négative) et une cathode (positive) entre lesquelles est placé un électrolyte. L'hydrogène alimente l'anode, tandis que l'oxygène alimente la cathode. L'électrolyte provoque la séparation du proton et de l'électron de chaque atome d'hydrogène qui empruntent chacun un chemin différent jusqu'à la cathode. L'électron passe par un circuit externe en créant une charge électrique. Le proton traverse directement l'électrolyte jusqu'à la cathode où il se réunit à l'électron et réagit avec l'oxygène pour produire de l'eau et de la chaleur (figure 1).

Figure 1 : configuration de la pile à combustible



Étant donné qu'il n'y a aucune combustion, les piles à combustible ne dégagent aucune émission autre que de la vapeur d'eau – tout du moins tant que l'hydrogène est pur. Dépourvues de pièces mobiles, les piles à combustible sont silencieuses, fiables et peuvent en outre être de petite taille. Ces qualités font des piles à combustible une technologie extrêmement prometteuse, notamment pour les véhicules automobiles. Elles peuvent également servir à des applications stationnaires afin de fournir de l'électricité ou du chauffage à des bâtiments.

Divers prototypes de voitures, bus et camions à pile à combustible ont été ou sont à l'essai à travers le monde : les modèles les plus récents fonctionnent bien et sont prisés des usagers. La plupart exploite la technologie à échange de proton ou membrane électrolyte polymérique (MEP). Les piles à combustible MEP fonctionnent à des températures relativement faibles, environ 80°C, qui permettent un temps de démarrage bref et une moindre usure des composants.

Elles bénéficient d'un rapport puissance/poids supérieur aux autres types de pile à combustible. En revanche, elles exigent un catalyseur en métal noble, d'où un surcoût. Parmi les autres technologies en cours de développement figurent la pile à oxyde solide (SOFC) qui utilise comme électrolyte un composé céramique non poreux et fonctionne à une température élevée, et la pile à combustible alcaline qui fonctionne à des températures faibles et moyennes, dont l'électrolyte est une solution d'hydroxyde de potassium et dont les catalyseurs à l'anode et à la cathode sont des métaux non précieux.

Plusieurs grands constructeurs automobiles travaillent sur des prototypes de voitures à pile à combustible dont certains sont capables de parcourir au moins 500 kilomètres sans rechargement. En juin 2005, American Honda Motor Company est devenu le premier constructeur automobile à louer un véhicule à pile à combustible à un particulier. Daimler Chrysler compte un parc d'une centaine de petits véhicules à pile à combustible en service dans plusieurs pays et projette de lancer la production commerciale en 2012. BMW prévoit un rythme de production de plusieurs centaines d'exemplaires de sa nouvelle voiture à hydrogène d'ici 2010, avec des ventes axées sur les gérants de parcs automobiles et les particuliers en Europe et aux États-Unis. L'hydrogène alimente à la fois un moteur à combustion interne pour la force motrice et une pile à combustible distincte pour la puissance électrique. Ford, General Motors et Toyota ont eux aussi d'importants programmes de développement de la pile à combustible. La plupart des modèles actuellement en cours de mise au point sont alimentés directement avec de l'hydrogène, sans reformage d'essence ou de méthanol dans le véhicule. Cette dernière approche était pourtant à l'origine la priorité du développement des véhicules à pile à combustible car les constructeurs automobiles estimaient qu'il serait plus facile de tirer parti de l'infrastructure existante de distribution de carburant. Les problèmes d'ordre technique et écologique ont conduit la plupart d'entre eux à abandonner le reformage embarqué.

Les piles à combustible stationnaires pour la production sur site de chaleur et d'électricité commencent elles aussi à être commercialisées. Dans un premier temps tout du moins, leur principale utilisation devrait concerner la production électrique auxiliaire et décentralisée. Par la suite, de plus petites unités pourraient subvenir aux besoins domestiques individuels en chauffage et en électricité. Les appareils SOFC actuellement à l'étude reforment le gaz naturel en interne en générant des flux séparés, c'est-à-dire un flux d'hydrogène alimentant la pile à combustible et un flux de dioxyde de carbone capturable. Leur rendement électrique approche 56 %, leur rendement thermique global 88 % (Larsen et al, 2004).

L'inconvénient fondamental des piles à combustible, qu'elles soient utilisées dans les véhicules, les bâtiments ou pour la production électrique, est leur coût. Après des décennies de recherche et développement, un véhicule à pile à combustible à hydrogène est toujours plus onéreux qu'un modèle équivalent à essence ou diesel en raison du prix de la pile elle-même. Le coût de production actuel d'une berline équipée d'un système à pile à combustible est évalué à un million de dollars, même si, pour des motifs commerciaux, les constructeurs automobiles et les fabricants de piles à combustible se montrent réticents à

révéler le chiffre réel. Le coût des bus à pile à combustible approche deux millions de dollars. Pour l'heure, les piles à combustible les plus compétitives reviennent jusqu'à cinquante fois plus cher au kW de puissance motrice qu'un moteur à essence standard à combustion interne, bien que le rendement énergétique soit le double.

Il convient également de se pencher sur les défis techniques. Il faut améliorer la longévité et la fiabilité des piles à combustible. Actuellement, elles sont sujettes à des pannes et présentent une longévité relativement courte, notamment celles qui fonctionnent à températures élevées. Plus important encore, il est nécessaire de concevoir un système pratique de stockage de l'hydrogène à bord des véhicules. Il s'agit peut-être du plus grand défi auquel sont confrontés les concepteurs de véhicules à pile à combustible, conséquence de la très faible densité énergétique de l'hydrogène à température et pression atmosphériques. Pour transporter suffisamment de combustible pour parcourir 400 kilomètres, il faudrait comprimer l'hydrogène à des pressions extrêmement élevées pour le loger dans un réservoir à carburant standard. À ce jour, il est possible de le comprimer à 700 bars. Même à cette pression toutefois, le réservoir doit être 4,6 fois plus grand qu'un réservoir à essence normal pour contenir assez de combustible pour couvrir la même distance. Les recherches doivent se poursuivre afin de découvrir des matériaux abordables et suffisamment robustes pour résister à la fois à la pression et au choc en cas d'accident, mais néanmoins assez légers pour être transportés dans une voiture normale. Les stockages liquides pour les petits véhicules posent des problèmes pratiques en raison des grandes quantités d'énergie nécessaires pour liquéfier l'hydrogène et le maintenir à une température de -253° C. Une méthode alternative de stockage actuellement à l'étude consiste à stocker le gaz sous la forme solide d'hydrures métalliques, alliages créés par traitement chimique d'où l'hydrogène pourrait être émis au fil des besoins. La lourdeur d'un système de ce type nuit toutefois au rendement énergétique du véhicule.

Au cours de la dernière décennie, la réalisation de progrès considérables dans la technologie des piles à combustible laisse espérer que les performances et les coûts de ces dernières seront un jour à même de rivaliser avec ceux des véhicules conventionnels (encadré 5). Cela réclamera toutefois encore plus de recherche et développement. Il ne fait aucun doute que l'essor de la production commerciale des piles à combustible en abaissera le coût unitaire. De fait, les constructeurs automobiles sont persuadés qu'ils réduiront fortement les coûts en quelques années à peine. Toyota entend diminuer de 50 000 dollars le coût des voitures à pile à combustible d'ici 2015. General Motors compte avoir une voiture en production commerciale intégrale d'ici 2010, avec une pile à combustible d'un prix maximal de 5 000 dollars. Le programme de piles à combustible du *Department of Energy* des États-Unis a pour objectif de réduire le coût des piles à combustible stationnaires par dix, soit environ 400 dollars au kW, voire moins. Ce niveau serait proche du coût actuel d'une centrale électrique à turbine à gaz à cycle combiné.

Encadré 5 : options concurrentes dans le secteur des transports

L'emploi de l'hydrogène comme combustible de transport n'est que l'une des multiples options de renforcement de la sécurité énergétique et de la réduction des émissions de CO₂ et gaz nocifs. En pratique, l'hydrogène pourrait exister parallèlement à d'autres combustibles, le tout formant un système nettement plus diversifié qu'aujourd'hui. Les options les plus prometteuses sont les suivantes :

- *Les biocombustibles* : les États-Unis et l'Union Européenne mènent d'ambitieux projets destinés à promouvoir le bioéthanol essentiellement à base de maïs et le biodiesel à base de colza. Bien que les coûts aient nettement baissé ces dernières années, ils demeurent très supérieurs à ceux des combustibles pétroliers malgré la hausse des cours.
- *Les véhicules tout électriques* : l'efficacité des véhicules équipés d'une batterie rechargeable sur le réseau électrique peut dépasser celle des véhicules à pile à combustible à hydrogène. Leur autonomie et leur délai de chargement restent néanmoins des obstacles majeurs à leur essor sur le marché.
- *Des moteurs à combustion interne plus performants* : ceux-ci réduiraient les émissions des véhicules fonctionnant aux combustibles pétroliers. Les technologies hybrides, qui combinent une batterie électrique rechargée par un moteur à combustion interne embarqué, semblent offrir à court terme le meilleur potentiel de gain d'efficacité.

Capture et stockage du carbone

Les perspectives d'une économie de l'hydrogène devenant réalité dans un avenir prévisible sont tributaires des avancées des technologies de capture et stockage du carbone (CSC) et de leur intégration à la production d'hydrogène fondée sur les combustibles fossiles. Il s'agit d'une condition nécessaire, mais pas suffisante. La réussite du déploiement du CSC ouvrirait également la voie à la production écologiquement acceptable d'électricité au moyen de combustibles fossiles ; l'hydrogène continuerait à devoir concurrencer l'électricité dans les consommations d'énergie finale, dont le transport.

La procédure de CSC liée à la production d'hydrogène compte trois étapes :

- La capture du CO₂ des effluents gazeux émis au cours du processus de production (capture précombustion).
- Le transport par canalisations ou citernes du CO₂ capturé.
- Le stockage souterrain du CO₂ dans des aquifères salins profonds, des gisements pétroliers ou gaziers épuisés ou des veines de charbon inexploitable.

La capture et le transport du CO₂ s'effectuent depuis des décennies, généralement toutefois à petite échelle et sans que le stockage ne soit l'objectif ultime. Ces technologies doivent être améliorées pour être largement déployées à grande échelle en association avec la production d'hydrogène et pour en réduire les coûts. Actuellement, la plupart des activités de recherche et développement concernant la capture se concentrent sur la capture post-combustion après incinération de combustibles fossiles dans les centrales électriques. Pour en démontrer la viabilité et en abaisser le coût (encadré 6), le stockage du carbone doit lui aussi faire l'objet de recherches plus approfondies.

Encadré 6 : projets actuels de démonstration de capture et stockage du carbone (CSC)

Divers projets de démonstration de CSC ont vu le jour ces dernières années. Dans la plupart des projets de capture, les technologies existantes sont appliquées dans des centrales électriques. Quelques centrales pilotes de faible envergure reposant sur de nouvelles technologies de capture sont en service à travers le monde. À ce jour, un seul projet de démonstration portant sur une centrale électrique à l'échelle de la mégatonne a été présenté : le projet *FutureGen*, aux États-Unis. Il s'agit d'une centrale thermique sophistiquée au charbon destinée à la production d'électricité et d'hydrogène. Sa construction devrait débuter en 2007. D'autres projets de démonstration sont prévus au Canada, en Europe et en Australie.

Il existe une centaine de projets de stockage géologique, amorcés ou à l'étude. Les deux plus importants se trouvent en Norvège et au Canada. Le premier est le champ pétrolier et gazier marin de Sleipner où le CO₂ est stocké dans des aquifères salins profonds. Environ un million de tonnes de gaz y sont stockées chaque année depuis 1996. À ce jour, aucune fuite n'a été détectée. Le second implique l'utilisation de CO₂ pour optimiser l'extraction du pétrole, puis son stockage souterrain sur le champ pétrolier de Weyburn, au Canada. Environ deux millions de tonnes par an y sont stockées depuis 2001. Le résultat de ces deux projets suggère que le gaz peut être stocké définitivement sans fuite ni autre problème majeur. D'autres projets pilotes laissent entrevoir que la récupération assistée au CO₂ du méthane enfoui dans les veines de charbon et la récupération assistée du gaz peuvent aussi être des méthodes de stockage viables.

Les technologies actuelles de capture du carbone sont capables de réduire d'environ 85 % les émissions des usines d'hydrogène à reformage à la vapeur, compte tenu des émissions supplémentaires issues de l'énergie consommée dans le processus de capture (IPCC, 2005). Pour chaque tonne d'hydrogène produite aujourd'hui, 9 tonnes de dioxyde de carbone sont rejetées dans l'atmosphère si la matière première est le gaz naturel et environ 19 tonnes s'il s'agit de charbon. Il est possible aujourd'hui de ramener ces émissions entre 1,5 et 3 tonnes (IEA, 2004b). De plus fortes réductions pourraient être envisagées à l'avenir en améliorant l'efficacité à la fois du processus de production d'hydrogène et de la technologie de capture. Toutefois, le coût par tonne de dioxyde de carbone capturée augmentant nettement à chaque palier d'amélioration du taux de capture, il n'est guère probable qu'un taux de capture de 100 % soit un jour économique.

Les aquifères salins profonds, les gisements pétroliers ou gaziers épuisés ou les veines de charbon inexploitablement représentent les options les plus prometteuses pour le stockage souterrain du CO₂. La capacité des aquifères salins, option offrant le plus fort potentiel, pourrait être suffisante pour emmagasiner des décennies d'émissions mondiales de CO₂. Une autre option consiste à stocker le gaz au fond des océans, ces perspectives étant néanmoins aléatoires en raison de leurs répercussions écologiques incertaines. La transformation du CO₂ en solide pour stockage souterrain est toujours en phase conceptuelle. Chacune de ces trois options de stockage doit faire ses preuves à grande échelle. L'une des préoccupations majeures réside dans le risque que le CO₂ puisse s'échapper de nouveau dans l'atmosphère.

Le coût futur du CSC dépendra des technologies retenues, de leur mode d'application, de l'ampleur de la réduction des coûts issue de la recherche et développement, de l'engouement du marché et des prix des combustibles. La capture du CO₂ des centrales qui co-génèrent de l'électricité et de l'hydrogène pourrait être plus économique que la production autonome d'électricité ou

d'hydrogène avec capture du CO₂. Le coût total du CSC peut se décomposer en capture, transport et stockage :

- Les estimations actuelles des systèmes de capture à grande échelle sont de l'ordre de 25 à 50 dollars la tonne de CO₂ (IEA, 2004b). On mise sur une baisse considérable de ces coûts à mesure de l'évolution de la technologie et de son déploiement à grande échelle, jusqu'à environ 10 à 25 dollars pour les centrales au charbon et 25 à 30 dollars pour les centrales à gaz au cours des 25 prochaines années.
- Avec le transport du CO₂ par canalisations, les coûts dépendent des volumes acheminés et des distances concernées. Pour un système à gros volume, les coûts s'échelonnent actuellement de 1 à 5 dollars par tonne de CO₂ pour 100 km.
- Les coûts de stockage dépendent du type de site, de son emplacement et de la méthode d'injection. À environ 1 à 2 dollars par tonne de CO₂, ils sont faibles en comparaison des coûts de capture et de transport. Cependant, dans certaines parties du monde, les sites de stockage sont éloignés des endroits où seraient construites les usines d'hydrogène, d'où un surcoût.

À l'heure actuelle, le coût total du CSC s'échelonne généralement de 50 à 100 dollars par tonne de CO₂. Cela équivaut à environ 15 à 30 centimes de dollar par gallon d'essence, 20 à 40 dollars par baril de brut ou 2 à 4 centimes de dollars par kWh, niveaux à peu près égaux au coût actuel de la production électrique au gaz. Par comparaison, le prix moyen d'un permis d'émission d'une tonne de CO₂ au sein du système européen d'échange de quotas d'émissions s'élevait à environ 28 dollars en septembre 2005. Les coûts de CSC pourraient chuter radicalement à l'avenir, peut-être de moitié dans les 25 prochaines années, en fonction du financement de la recherche et développement et du succès des projets de démonstration. Dans ce cas, le CSC deviendrait compétitif en Europe, même sans aucune hausse de la valeur du carbone.

Compte tenu de la limite des réserves en combustibles fossiles, le CSC ne saurait assurer un avenir énergétique durable. Néanmoins, intégré à la production d'hydrogène et/ou d'électricité, il pourrait constituer le socle d'un système énergétique plus durable pendant une période transitoire s'étalant au minimum sur plusieurs décennies. Les ressources en combustibles fossiles de la planète sont loin d'être épuisées. Les réserves avérées en pétrole équivalent à 40 années de production actuelle, celles de gaz naturel à 67 années et celles de charbon à 164 années (BP, 2005). Nul doute que l'exploration ainsi que l'amélioration des technologies de production optimisant les taux de récupération augmenteront ces réserves. À très long terme, les ressources fossiles étant finalement épuisées, l'humanité n'aura d'autre choix que de se tourner vers les technologies des énergies renouvelables, si elles n'ont pas déjà concurrencé les combustibles fossiles associés à la capture et au stockage du carbone.

La transition vers l'économie de l'hydrogène

La transition vers une économie de l'hydrogène nécessiterait des trillions de dollars d'investissements dans de nouvelles infrastructures afin de produire, transporter, stocker et distribuer l'hydrogène aux usagers et de fabriquer des piles à combustible. La nécessité d'installer des systèmes de capture et stockage du carbone entraînera par ailleurs un surcoût. Un soutien indéfectible des gouvernements envers la recherche et développement, de même que de fortes incitations à même de stimuler les investissements seront essentiels. Au vu de la durée de l'amortissement du capital investi pour produire ou pour utiliser l'énergie et les investissements considérables requis pour édifier les infrastructures nécessaires, une transition vers le système énergétique de l'hydrogène pourrait prendre plusieurs décennies.

Investissement en infrastructures pour hydrogène

L'introduction de l'hydrogène à grande échelle exigerait une transformation radicale du système mondial d'approvisionnement énergétique. Il faudrait bâtir une vaste infrastructure de production, transport, stockage et distribution de l'hydrogène ainsi que de fabrication des piles à combustible. De plus, il faudrait que les consommateurs investissent dans des véhicules à pile à combustible à hydrogène et dans les équipements annexes. La construction d'installations de capture et de stockage souterrain du carbone émis au cours du processus de production entraînerait un surcoût, même si elle sera nécessaire, indépendamment du choix du vecteur énergétique, tant que les combustibles fossiles demeureront la source d'énergie primaire. De nouvelles infrastructures pour hydrogène et connexes seraient nécessaires non seulement pour remplacer les installations existantes, mais également pour répondre à la hausse mondiale des besoins énergétiques. Ceci représente à la fois un défi et une opportunité pour introduire de nouvelles infrastructures d'énergie hydrogène.

La construction d'un nombre d'usines d'hydrogène centralisées suffisant pour fournir le combustible nécessaire à la totalité des voitures, camions et bus en service dans le monde aujourd'hui exigerait la somme aburissante de 8 trillions de dollars d'investissements au coût actuel.

Le coût total de la construction de l'infrastructure hydrogène dépendrait de l'évolution des marchés de l'énergie, du rythme des réductions du coût unitaire et de la proportion dans laquelle l'hydrogène remplacerait les systèmes énergétiques existants. Ces facteurs sont tous très incertains. Même si l'hydrogène ne devait remplacer que les carburants automobiles conventionnels, le coût final en investissements à l'échelon mondial d'un bout à l'autre de la chaîne d'approvisionnement en carburants, sans compter ce qui aurait été investi de toute façon, se chiffrerait assurément en trillions de dollars, même selon les

hypothèses les plus optimistes. Les véhicules à pile à combustible représenteraient probablement une grande part de ce coût. Si la totalité des 800 millions de véhicules actuellement en circulation à travers le monde était finalement remplacée par des modèles à pile à combustible, le coût de production supplémentaire s'élèverait à lui seul à deux trillions de dollars, en partant de l'hypothèse que chaque véhicule à pile à combustion coûte en moyenne 2 500 dollars de plus qu'un modèle conventionnel. Le coût de la construction des canalisations destinées à alimenter les stations de ravitaillement en hydrogène et les usines d'hydrogène serait lui aussi très élevé. Par exemple, au coût actuel, la construction d'un nombre d'usines d'hydrogène centralisées suffisant pour fournir le combustible nécessaire à la totalité des voitures, camions et bus en service dans le monde aujourd'hui exigerait la somme ahurissante de huit trillions de dollars d'investissements, sans compter le coût de la capture du carbone. Cette somme équivaut quasiment à la moitié de l'investissement total cumulé dans l'ensemble du secteur énergétique que l'Agence internationale de l'énergie estime nécessaire à l'échelon planétaire au cours du prochain quart de siècle (IEA, 2005a).

Le coût est le principal obstacle à l'investissement en hydrogène. Aucune entreprise privée n'investira dans une initiative commerciale portant sur l'hydrogène à moins d'être convaincu qu'il pourra concurrencer les combustibles existants et engendrer des bénéfices. L'hydrogène est encore loin d'être compétitif dans la plupart de ses applications, mais cela pourrait changer avec des percées technologiques et des incitations ou mesures gouvernementales. Dans ce cas, les opportunités de développement lucratif des installations d'hydrogène s'accroîtraient au fil du temps. Initialement, l'investissement pourrait se limiter à quelques lieux reculés où les coûts de distribution du carburant et de l'infrastructure électrique sont relativement élevés, à des régions où la sensibilité du grand public à la durabilité écologique est particulièrement forte et à des pays où les gouvernements proposent des incitations motivantes. À mesure de l'expansion du marché, la production en série de matériel d'approvisionnement et de piles à combustible entraînera des économies d'échelle, favorisera le processus d'apprentissage et accentuera la baisse des coûts.

L'hydrogène pourrait devenir compétitif grâce aux progrès technologiques et aux incitations ou mesures des pouvoirs publics.

Le coût n'est toutefois pas la seule entrave à l'investissement. Comme pour toute technologie radicalement nouvelle, l'hydrogène pourrait se retrouver confronté à l'énigme classique de l'œuf et de la poule : l'absence d'un marché dissuade l'investissement, ce qui empêche le marché de se développer. En d'autres termes, pourquoi concevoir des voitures à hydrogène alors qu'il n'existe aucun réseau de distribution et pourquoi concevoir un réseau de distribution alors qu'il n'existe aucune voiture à hydrogène ? L'utilisation de l'hydrogène ne connaîtra d'essor qu'une fois atteint le seuil minimum pour réaliser des économies d'échelle. Le marché doit être suffisamment important pour démontrer aux usagers et fournisseurs de combustibles potentiels que l'hydrogène constitue une alternative sûre, fiable et économique aux combustibles conventionnels. Plus il y aura de véhicules à pile à combustible sur les routes, plus les autres propriétaires de véhicules seront confiants à l'idée de changer de carburant. Il faudrait en outre développer rapidement le réseau de ravitaillement en hydrogène. Auprès des propriétaires de véhicules, un manque de stations

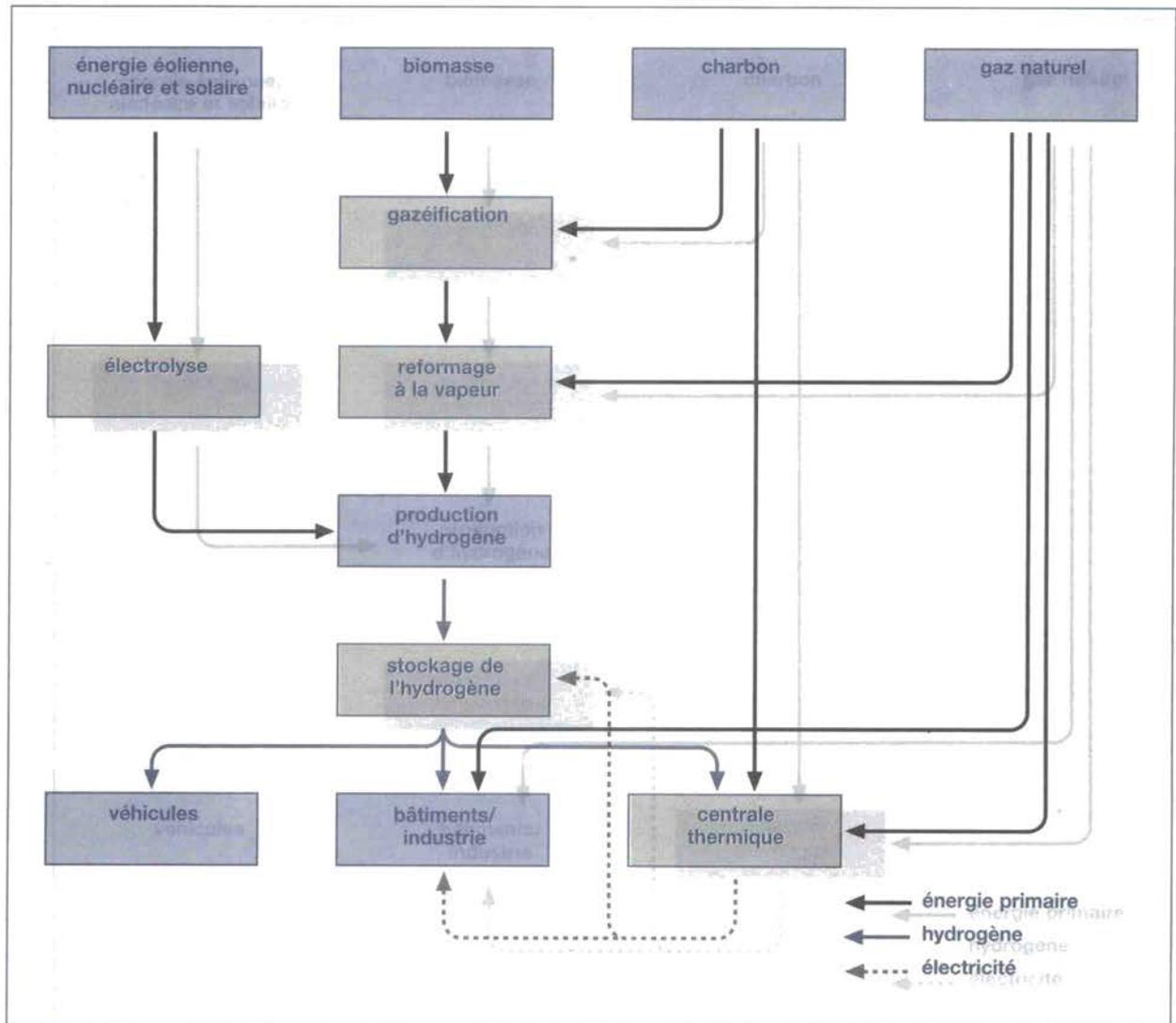
constituerait un frein considérable à l'adhésion au passage à l'hydrogène, même en cas d'incitation financière en ce sens.

De surcroît, l'ampleur de l'investissement dans un projet d'hydrogène assortie des risques techniques et financiers inhérents, pourrait également décourager les sociétés privées. Pour contourner ce problème, l'intervention gouvernementale sous forme d'incitations financières et de mesures réglementaires à même de faire pencher la balance en faveur de l'hydrogène sera certainement indispensable, notamment là où l'argumentaire économique en faveur de l'hydrogène est marginal (voir ci-dessous). Un fort engagement à long terme de la part du gouvernement envers le développement d'une infrastructure hydrogène sera crucial pour assurer aux fournisseurs de combustible, équipementiers et consommateurs la confiance en la perspective de réaliser un rendement raisonnable sur les investissements exigés par le changement de combustible.

Au cours des premières étapes de la transition – ou, plus exactement, de la série de transitions – vers l'hydrogène, ce combustible compléterait à la fois les systèmes énergétiques existants et les concurrencerait (figure 2). Les interconnexions susceptibles d'émerger pourraient rendre le système énergétique plus souple, plus diversifié et plus sûr. Le gaz naturel et le charbon deviendraient probablement les matières premières principales de la production d'hydrogène, tout en demeurant d'importantes matières premières des centrales électriques. Le gaz continuerait également de jouer un rôle dans la satisfaction des besoins énergétiques des applications stationnaires dans l'industrie et les bâtiments, voire dans le secteur des transports (sous forme de gaz naturel comprimé). Il pourrait par ailleurs s'avérer économique de mélanger de l'hydrogène à du gaz naturel en vue de sa distribution via le réseau de gazoducs existant.

L'hydrogène serait en concurrence avec l'électricité et le gaz ainsi que le pétrole dans toutes les utilisations d'énergie, mais pourrait aussi compléter l'électricité en procurant un moyen de la stocker. Il s'agirait d'une solution particulièrement attrayante pour remédier aux fluctuations imprévisibles de la production des sources intermittentes, telles que l'éolien, ainsi que pour gérer les variations diurnes ou saisonnières de la demande. Les installations de stockage d'hydrogène locales réduiraient le besoin d'investissements onéreux en capacité de transmission reliant les centrales électriques aux sites où le service électrique est nécessaire. Elles renforceraient la sécurité de l'approvisionnement énergétique en assurant la relève dans l'éventualité de la défaillance d'une centrale ou du réseau de transmission.

Figure 2 : interconnexions entre l'hydrogène et le reste du système énergétique



Source: Menecon Consulting.

Soutien gouvernemental

Pour amorcer la transition vers l'économie de l'hydrogène, une action décisive du gouvernement s'imposera très vraisemblablement sur deux fronts :

- Recherche, développement et démonstration des technologies de l'hydrogène. Cet effort pourrait être vital à l'accomplissement des progrès technologiques indispensables.
- Incitations propres à encourager l'investissement en infrastructure hydrogène et l'adoption de ce combustible une fois les technologies jugées économiques.

L'hydrogène étant encore loin de devenir compétitif, en la matière, la priorité de l'action gouvernementale porte pour l'heure sur la recherche et développement. La recherche sur l'utilisation de l'hydrogène à des fins énergétiques remonte à

Si la recherche sur l'utilisation de l'hydrogène à des fins énergétiques remonte à plusieurs décennies, son financement a connu un bond spectaculaire ces dernières années.

plusieurs décennies. Toutefois, l'envergure du financement public (et privé) destiné aux activités de recherche, développement et démonstration sur l'hydrogène et les piles à combustible a connu un bond spectaculaire ces dernières années. Cela reflète des avancées technologiques significatives qui assoient davantage encore la probabilité que ce combustible devienne une solution d'énergie viable dans un avenir proche ; cela reflète également une urgence croissante de la part des décideurs à identifier des solutions énergie durables tenant compte des préoccupations écologiques et de sécurité énergétique. Nombre de gouvernements s'attendent désormais à ce que le passage à l'économie de l'hydrogène commence dans les deux prochaines décennies et s'emploient à accélérer le processus, généralement par le biais de programmes de coopération internationale ou entre les secteurs public et privé.

L'Agence internationale de l'énergie estime que les dépenses publiques mondiales actuelles en recherche et développement sur l'hydrogène s'élèvent à environ un milliard de dollars par an (IEA, 2004a). Ce budget, qui peut sembler impressionnant, est en fait modeste par rapport aux sommes que les gouvernements consacrent à d'autres formes de recherche et développement en énergie. Dans les pays membres de l'Organisation pour la coopération et le développement économiques (OCDE), l'hydrogène ne représente qu'environ 15 % du total des budgets recherche et développement en énergie. On estime que les dépenses de recherche et développement en hydrogène dépassent celles des combustibles fossiles et des énergies renouvelables, mais demeurent bien inférieures à celles du nucléaire. En 2001, année la plus récente pour laquelle on dispose de données exhaustives, les pays de l'OCDE ont consacré 3,8 milliards de dollars à l'énergie nucléaire, 700 millions aux combustibles fossiles et 760 millions aux énergies renouvelables (IEA, 2004d). Le total des dépenses de l'OCDE en recherche et développement cette année-là a atteint 8,9 milliards de dollars. Il se peut que les données officielles sous-estiment l'importance de recherche et développement sur l'hydrogène, car certaines activités concernant l'hydrogène sont couvertes par les programmes technologiques sur les combustibles fossiles, l'énergie nucléaire et les utilisations finales.

Les programmes les plus importants sur l'hydrogène se trouvent sans conteste aux États-Unis, au Japon et dans l'Union Européenne (tableau 1). À eux seuls, ces pays représentent environ deux tiers du total des dépenses publiques en recherche et développement sur l'hydrogène. L'administration américaine a considérablement accru le financement, avec le lancement fin 2003 d'un programme quinquennal sur l'hydrogène de 1,7 milliards de dollars. Ceci inclut 1,2 milliard pour le *Hydrogen Fuel Initiative* et 0,5 milliard pour le programme *FreedomCAR*, initiative commune entre le *Department of Energy* des États-Unis, General Motors, Ford et Daimler Chrysler visant à mettre au point un véhicule à pile à combustible commercialement viable. Le Japon, premier pays ayant initié un programme de recherche et développement à grande échelle sur la pile à combustible à hydrogène, a alloué 35 milliards de yens (320 millions de dollars) à ses activités de recherche sur l'hydrogène pour l'exercice 2005. Le financement total de l'Union Européenne, hors budgets nationaux, devrait atteindre 2,8 milliards d'euros sur la décennie finissant en 2011, dont la moitié à charge du secteur privé. Sur ce montant, les projets concernant la production représenteront 1,3 milliards et les projets basés sur les utilisations finales,

1,5 milliards. Les autres pays industrialisés représentent la quasi-totalité du reste, toutefois certaines économies en développement comme la Chine, le Brésil et l'Inde, ont lancé leur propre programme. Le détail des programmes nationaux et internationaux ainsi que des activités du secteur privé, figure dans l'annexe A.

Tableau 1 : dépenses publiques en recherche et développement sur l'hydrogène et autres technologies de production d'énergie dans les plus riches pays de l'OCDE en 2003 (en millions de dollars)

	Hydrogène	Comb. fossiles	Énergies renouv.	Nucléaire	Autres	Total
Canada*	24	47	30	47	92	240
Japon	270	indisp.	indisp.	indisp.	indisp.	indisp.
Allemagne*	34	14	74	154	25	301
France**	45	33	27	359	0	463
Italie	34	15	61	107	124	341
Royaume-Uni	3	5	20	indisp.	indisp.	indisp.
États-Unis*	97	416	243	371	1 623	2 750

* Dépenses fédérales uniquement. ** Données de 2002.

Source : Agence internationale de l'énergie (2004d).

Malgré les récentes hausses des dépenses publiques en recherche et développement sur l'hydrogène, elles demeurent éclipsées par celles des sociétés et organismes privés, notamment les fournisseurs des services d'énergie, les constructeurs automobiles, l'industrie chimique, les prestataires électriques et les fabricants de piles à combustible. On ne connaît pas exactement le montant total des dépenses en recherche et développement sur l'hydrogène dans le secteur privé, mais il est évalué entre 3 et 4 milliards de dollars par an. Ceci nous donne une indication de l'optimisme de ce secteur sur les perspectives de l'hydrogène. Cependant, une large part de ces dépenses ne verrait certainement pas le jour sans engagements équivalents de la part du secteur public. Nombre d'instituts de recherche privés œuvrent en partenariat avec des programmes à financement public. Un engagement gouvernemental soutenu et suivi envers la recherche et développement demeurera un facteur déterminant du succès des efforts à long terme visant à mener l'énergie hydrogène vers son utilisation commerciale.

Il faudra sans doute des aides gouvernementales pour stimuler l'essor du marché de l'hydrogène à mesure que cette technologie se rapprochera du seuil de compétitivité. Ces incitations pourraient se justifier par les retombées sociales, économiques et écologiques à long terme que susciterait le passage à l'hydrogène. Elles pourraient prendre la forme de taxes sur les énergies conventionnelles, d'autres soutiens économiques ou de mesures réglementaires visant à accélérer l'adoption de l'hydrogène. Elles pourraient être assorties de pénalités sous forme de taxes sur le carbone ou de plafonds d'émissions, ce qui favoriserait très probablement l'hydrogène. Ces subventions seraient

Même si des technologies hydrogène compétitives venaient à émerger dans les vingt prochaines années, il faudrait probablement le reste du siècle pour achever la transition vers une économie de l'hydrogène.

normalement supprimées lorsque la technologie serait assurée et les économies d'échelle atteintes. Il y a de nombreux précédents d'actions gouvernementales destinées à déclencher une évolution des modes de consommation énergétique par le biais d'instruments du marché. Par exemple, les gouvernements d'Europe continentale ont opté pour les taxes préférentielles afin d'encourager le développement du réseau de transmission et de distribution du gaz naturel.

Les gouvernements devront en outre coopérer avec les fournisseurs de combustibles, équipementiers, constructeurs automobiles et instances de normalisation pour édicter des normes et codes adéquats en matière de conception, construction, essais et de commercialisation du matériel lié à l'hydrogène. Ils seront essentiels pour assurer la sécurité et abaisser les coûts. L'harmonisation internationale des normes encouragerait le commerce et éviterait le développement parallèle d'équipements incompatibles et les blocages technologiques dus à des normes différentes, gage d'allègement supplémentaire des coûts. Il incombera également aux gouvernements de contribuer à promouvoir la sensibilisation du grand public aux atouts de l'hydrogène ainsi que la formation et l'éducation du personnel de l'industrie.

Projections à long terme de l'utilisation de l'hydrogène

Il est extrêmement difficile de prédire à quel moment la transition vers l'adoption de l'hydrogène comme vecteur énergétique est susceptible de commencer et combien de temps elle pourrait prendre, car elle est foncièrement tributaire de percées technologiques dans divers domaines. Il est donc impossible de savoir quand celles-ci auront lieu et dans quelle mesure elles diminueront les coûts et optimiseront la compétitivité de l'hydrogène par rapport aux formes d'énergie conventionnelles. En conséquence, toutes les projections à long terme concernant l'utilisation de l'hydrogène reposent sur des hypothèses de coûts d'approvisionnement.

Quel que soit le succès des efforts actuels de recherche et développement en vue d'abaisser les coûts et d'accroître les performances, le processus de transition vers une économie de l'hydrogène serait sans nul doute progressif, probablement étalé sur plusieurs décennies. La planification, la construction, l'exploitation et le déclassement des infrastructures des systèmes énergétiques s'échelonnent à très long terme. Si les voitures et les camions ont généralement une durée de vie de dix ou vingt ans, les centrales électriques, raffineries de pétrole et canalisations sont conçues pour durer des décennies. Leur retrait anticipé serait extrêmement onéreux. De plus, la diffusion généralisée de la technologie de capture et stockage du carbone sera une entreprise titanesque. La mobilisation de tous les investissements nécessaires à la refonte complète du système énergétique existant en l'espace d'une décennie ou deux ne serait tout simplement pas souhaitable, même si nous étions disposés à payer le coût faramineux d'un abandon progressif anticipé des infrastructures des systèmes énergétiques existantes. Ainsi, même si des technologies compétitives à hydrogène venaient à émerger dans les vingt prochaines années, il faudrait probablement le reste du siècle pour achever la transition vers l'économie de l'hydrogène, phase où seuls l'hydrogène et l'électricité seront utilisés pour fournir de l'énergie.

Les principales sources de projections énergétiques mondiales à long terme, dont le *International Energy Outlook 2005* de la *Energy Information Administration* des États-Unis et le rapport *World Energy Outlook 2005* de l'Agence Internationale de l'Énergie, prévoient que l'hydrogène ne jouera qu'un rôle marginal dans la couverture des besoins énergétiques finaux au cours des 20 ou 25 années à venir. Néanmoins, ces rapports reconnaissent que des percées technologiques majeures pourraient aboutir à une pénétration du marché plus précoce et plus rapide. Les plans à plus long terme élaborés par l'IEA décrivent un futur légèrement plus optimiste : selon un scénario qui suppose une pénalité de 50 dollars par tonne de dioxyde de carbone, la consommation d'hydrogène, essentiellement pour le transport, atteint presque 300 millions de tonnes d'équivalent pétrole, soit suffisamment pour mouvoir plus d'un quart des voitures de tourisme du monde. Les piles à combustible jouent aussi un rôle significatif dans l'industrie, la production électrique et les secteurs résidentiels et commerciaux.

Toutes les projections sur la consommation d'hydrogène sont bien sûr extrêmement sensibles aux hypothèses sur le rythme auquel les coûts unitaires des différents composants du système énergétique hydrogène décroissent au fil du temps. Les courbes d'apprentissage technologique observées par le passé pour diverses technologies variant considérablement, il est difficile d'avancer des hypothèses sur l'amélioration des coûts des technologies de l'hydrogène. La quantité de ressources dévolue à la recherche et développement sera capitale, de même que l'engagement des fournisseurs d'énergie et des constructeurs automobiles envers la production commerciale à grande échelle. Les incitations et réglementations gouvernementales, notamment les pénalités sur le carbone destinées à encourager l'investissement en infrastructure hydrogène joueront également un rôle prépondérant.

L'hydrogène et le monde en développement

Les économies en développement ont au moins autant à gagner d'une mutation vers l'économie de l'hydrogène que les économies industrialisées, car elles souffrent davantage de la pollution urbaine et tendent à être plus gourmandes en énergie. Pourtant, la transition commencera probablement plus tard dans la plupart des nations en développement, car elles sont moins à même de participer à la recherche et développement et de financer les aides nécessaires au lancement du processus. Le monde riche doit donc être prêt à soutenir les économies en développement dès que l'hydrogène deviendra une solution énergétique viable, dans l'intérêt général. Les organisations internationales et non gouvernementales ont un rôle important à jouer afin d'aider les pays à créer un cadre basé sur le marché au sein duquel l'hydrogène et les autres technologies énergétiques émergentes pourraient rivaliser avec les systèmes énergétiques conventionnels.

Les économies en développement ont autant à gagner, voire davantage, d'un passage à l'économie de l'hydrogène que les économies industrialisées.

Pertinence de l'hydrogène pour les économies en développement

Bien que la plupart des activités de recherche et développement actuelles sur l'hydrogène se déroulent dans les pays industrialisés, les économies en développement ont autant à gagner, voire davantage, d'un passage à l'économie de l'hydrogène. Leurs villes et agglomérations souffrent davantage de la pollution causée par la circulation automobile, les centrales thermiques au charbon et les chaudières industrielles. Nombre d'économies en développement, plus gourmandes en énergie, sont plus vulnérables aux fluctuations des cours internationaux de l'énergie. Les pays les plus pauvres dépourvus de ressources notables en combustibles fossiles pourraient peut-être exploiter leur biomasse et autres potentiels d'énergie renouvelable pour produire de l'hydrogène. Le monde entier sortirait gagnant de l'essor de l'hydrogène dans les économies en développement si cela se traduit par une réduction des émissions de gaz à effet de serre et une moindre pollution régionale et si cette mutation stimule le développement économique.

Comme les pays en développement sont moins à même de supporter le coût d'une participation à la recherche et développement, il est probable que le passage à l'hydrogène y démarrera plus tard que dans les pays industrialisés. Cependant, un engagement précoce des économies en développement dans le

processus de mise au point et commercialisation des technologies à l'hydrogène pourrait accélérer le passage à l'hydrogène dans ces pays. Ceci permettrait aux pays les plus pauvres, qui aujourd'hui ne sont dotés que de réseaux de distribution énergétique limités, d'esquiver les technologies conventionnelles à combustible fossile. On estime que les économies en développement dans leur ensemble seront responsables de la plus forte hausse de la consommation énergétique mondiale dans les décennies à venir. Cette augmentation concernera principalement le pétrole, le gaz naturel et le charbon, sauf avancées technologiques ou revirements radicaux des politiques énergétiques permettant aux énergies renouvelables ou au nucléaire de jouer un rôle bien plus important qu'il ne le semble aujourd'hui probable. Plus tôt ces pays entameront la transition vers l'hydrogène, moins leur consommation énergétique sera liée aux systèmes d'énergies fossiles et plus vite ils parviendront à la durabilité énergétique.

Plus tôt les économies en développement entameront la transition vers l'hydrogène, moins leur consommation énergétique sera liée aux systèmes d'énergies fossiles.

La priorité des efforts dans les économies en développement portera très probablement sur le transport et, éventuellement, sur les utilisations stationnaires dans les environnements ruraux reculés où le coût de la connexion des collectivités au réseau électrique est le plus élevé. Les retombées écologiques locales du passage des carburants automobiles conventionnels à l'hydrogène dans les pays en développement seraient généralement bien supérieures à celles des pays industrialisés où la technologie de contrôle de la qualité du carburant et des émissions est déjà nettement plus sophistiquée, la pollution de l'air posant par conséquent un problème moindre. Dans la plupart des villes des pays en développement, la circulation constitue la première source de pollution de l'air, problème qui, dans de nombreux cas, a atteint des proportions catastrophiques. Des projets de démonstration de véhicules à pile à combustible et de systèmes de ravitaillement sont déjà en chantier dans certaines régions en développement. Le projet commun *Full-cell bus programme* du Fonds pour l'Environnement Mondial et du Programme des Nations Unies pour le Développement, par exemple, inclut des démonstrations commerciales à Pékin, au Caire, à Mexico, New Delhi, Sao Paulo et Shanghai. La Chine a également instauré son propre projet de démonstration de bus à pile à combustible, dans l'optique de mettre 200 bus en service commercial à temps pour les Jeux Olympiques 2008 de Pékin.

Dans les pays où les ressources en combustibles fossiles sont rares, les ressources en biomasse, énergie solaire et éolienne pourraient fournir la base de la production d'hydrogène. Ceci pallierait le besoin de capturer et stocker le dioxyde de carbone. La biomasse en particulier pourrait être une option à faible coût pour certains pays. La nature modulaire des piles à combustible en fait une approche séduisante pour alimenter en électricité les collectivités isolées et non reliées au réseau. L'hydrogène pourrait offrir un moyen de stocker l'énergie électrique générée par des systèmes intermittents basés sur l'énergie solaire ou éolienne.

Implications pour la politique énergétique nationale

Que devraient faire dès aujourd'hui les gouvernements des économies en développement pour anticiper la transition vers une économie de l'hydrogène ? Pour les pays les plus vastes et les plus riches, une implication active dans la recherche et développement sur l'hydrogène, surtout par le biais de

programmes internationaux, pourrait faciliter l'introduction des nouvelles technologies à hydrogène à mesure qu'elles deviennent compétitives. Le Brésil, la Chine et l'Inde ont lancé leurs propres programmes sur l'hydrogène et comptent parmi les membres du Partenariat international pour l'économie de l'hydrogène (voir détail dans l'annexe A). Toutefois, à l'exception de la Chine, les ressources qu'ils seront en mesure de consacrer à ces activités demeureront inéluctablement modestes comparées à celles des grands pays industrialisés. Pour les économies en développement les plus pauvres, un solide engagement en recherche et développement est tout simplement au-delà de leurs moyens. La plupart des économies en développement seront probablement des acheteurs plutôt que des concepteurs de technologies de pointe.

À mesure que les technologies à hydrogène se rapprocheront du stade de commercialisation, les décideurs devront accorder davantage d'attention aux décisions immédiates sur les investissements en infrastructures des systèmes énergétiques conventionnels d'envergure, car elles affecteront la transition vers l'hydrogène. Au fil de l'enrichissement des économies en développement, elles édifieront des milliers de centrales électriques, de même que des raffineries et des réseaux de canalisations. Ces installations seront destinées à durer de nombreuses décennies. Les remplacer avant la fin de leur cycle de vie s'avèrerait très onéreux. Le risque existe qu'une décision prise aujourd'hui afin de mener à bien un projet énergétique conventionnel entrave à une date ultérieure l'introduction de technologies à hydrogène en figeant le système énergétique autour des combustibles fossiles. Il y a inévitablement compromis entre les avantages de la fourniture de services énergétiques modernes aujourd'hui et le développement d'un système énergétique durable à plus long terme. Il est urgent de mettre ces services à disposition des deux milliards d'habitants qui n'en bénéficient pas encore dans le monde en développement. Attendre que des solutions énergétiques propres et abordables voient le jour ne constitue une option acceptable ni concrètement, ni moralement.

Le meilleur moyen de s'assurer que l'investissement énergétique soit mené de la manière économiquement la plus efficace consiste à veiller à ce que l'énergie soit adéquatement facturée et taxée.

Le meilleur moyen de s'assurer que l'investissement énergétique soit mené de la manière économiquement la plus efficace consiste à établir un cadre basé sur les principes du marché libre. L'objectif doit viser à instaurer des échanges compétitifs et des mécanismes efficaces de régulation des monopoles naturels et à veiller à ce que le prix de l'énergie soit convenablement fixé. Dans les marchés bien régulés et fonctionnant correctement, la concurrence garantit que l'intégralité des coûts de la fourniture de l'énergie soit répercutée sur le prix payé par le consommateur. En pratique, c'est souvent loin d'être le cas. Dans nombre d'économies en développement, l'énergie est fortement subventionnée, ce qui aboutit à un gaspillage et une consommation excessive et augmente les effets négatifs de la consommation d'énergie sur l'environnement. Les subventions peuvent en outre prélever un lourd tribut sur les finances gouvernementales et miner l'investissement privé et public dans le secteur énergétique en nuisant ainsi à l'expansion des réseaux de distribution et au développement de technologies énergétiques écologiquement plus adaptées.

Parvenir à une énergie au juste prix ne s'arrête pas là. Dans la plupart des pays, industrialisés ou en développement, les coûts écologiques et sanitaires des émissions toxiques émanant de la combustion des énergies fossiles se reflètent

rarement sur les prix de ces combustibles, notamment pour le charbon. Il n'existe pour cela aucune méthode parfaite, mais l'approche judicieuse consiste néanmoins à taxer la consommation de chaque forme d'énergie en fonction de la quantité de dioxyde de carbone et de gaz nocifs qu'elle émet. Au minimum, les combustibles les plus polluants devraient être taxés davantage. De cette manière, les coûts écologiques externes se répercuteraient sur les prix à la consommation de l'énergie, le pollueur payant proportionnellement aux dégâts qu'il engendre. Les pouvoirs publics ont également la possibilité d'imposer des plafonds d'émission à chaque centrale électrique ou site industriel et autoriser leurs propriétaires à échanger des quotas d'émission, approche adoptée par l'Union Européenne pour réduire les rejets de dioxyde de carbone. Ces deux approches prévoient une prime pour que les producteurs d'électricité et les consommateurs finaux réduisent leur consommation de combustibles polluants tels que le charbon dans les centrales conventionnelles et pour qu'ils investissent dans des technologies propres, dont le CSC, l'énergie renouvelable et l'hydrogène.

Les perspectives d'introduction commerciale de l'hydrogène dans les économies en développement seraient beaucoup plus claires si les gouvernements menaient des réformes de cet ordre en matière de marché, tarification et imposition. On peut également prévoir des actions plus ciblées afin d'inciter l'essor de l'hydrogène, en particulier dans le secteur du transport et dans les collectivités rurales dépourvues d'accès à l'énergie moderne. Les plans ruraux de développement énergétique pourraient être modifiés afin de promouvoir la construction de connexions physiques entre hydrogène, technologies renouvelables et systèmes hors réseau afin de fournir de l'électricité et autres formes d'énergie commerciale aux zones rurales non encore desservies par les réseaux de distribution existants. Ceci pourrait se justifier par les obstacles du marché au déploiement de l'hydrogène et par ses vertus sociales, écologiques et économiques à long terme.

Rôle des organisations internationales et non gouvernementales

Il faudra que le monde riche aide les pays pauvres à passer à l'énergie propre. Les chefs d'État du G8 réunis lors du sommet de Gleneagles en juillet 2005 ont souligné qu'il était dans leur intérêt de coopérer avec les économies en développement afin de parvenir à une réduction substantielle des émissions de gaz à effet de serre et de stimuler l'investissement privé dans des technologies énergétiques plus durables, dont l'hydrogène, et leur transfert dans ces pays. Les pays riches doivent être prêts à aider les pays pauvres à réduire l'intensité en carbone de leurs systèmes énergétiques. Cette démarche ne doit pas être perçue comme une aide charitable, mais plutôt comme le volet d'une stratégie économiquement pertinente de réponse à la menace du réchauffement planétaire.

Les organisations internationales et non gouvernementales, dont le PNUE, ont un rôle important à jouer dans ce processus. Il n'est du ressort d'aucune organisation de tenter de désigner les lauréates parmi les diverses technologies énergétiques susceptibles de voir le jour dans les prochaines années. L'objectif doit plutôt consister à aider les économies en développement à instaurer un cadre pour ses politiques énergétiques qui encourage des marchés efficaces et

compétitifs ainsi qu'à faciliter l'introduction rapide de l'hydrogène dès qu'il se montrera compétitif. Il faudra pour ce faire que l'énergie soit tarifée et taxée de façon à refléter intégralement le bilan des coûts et atouts écologiques des différentes technologies. Il ne faut pas sous-estimer l'ampleur du défi : les réformes tarifaires et du marché de l'énergie sont des sujets épineux dans de nombreuses économies en développement. L'aide au développement, les institutions de prêt multilatérales et les agences de crédit à l'export devront jouer un rôle central dans l'assistance technique afin d'aider les économies en développement et leur fournir les capitaux nécessaires à la concrétisation des projets liés à l'hydrogène.

Le PNUE remplira sa mission en encourageant et en facilitant l'adoption de l'hydrogène et d'autres technologies naissantes là où elles sont économiques et présentent des vertus écologiques évidentes, notamment dans les pays en développement. Cela nécessitera l'information des parties prenantes et, en particulier, des décideurs et des fonds nationaux et internationaux d'aide au développement, sur les implications écologiques de l'hydrogène. À cet effet, le PNUE s'efforcera de diffuser des informations et des conseils sur le développement de l'hydrogène et des piles à combustible. Par la suite, le PNUE sera à pied d'œuvre pour aider les pays à préparer l'introduction de l'hydrogène à l'échelle commerciale.

Messages clés

L'hydrogène offre la promesse d'un avenir énergétique planétaire réellement durable. Vecteur énergétique propre qu'il est possible de produire à partir de n'importe quelle source d'énergie primaire, l'hydrogène employé dans des piles à combustible hautement efficaces pourrait s'avérer être la réponse à nos préoccupations croissantes en matière de sécurité énergétique, de pollution urbaine et de dérèglement climatique. Cette récompense justifie incontestablement l'attention et les ressources actuellement dévolues à l'hydrogène, même si les perspectives de commercialisation généralisée dans un avenir prévisible sont incertaines.

Il faudra multiplier les actions de recherche et développement pour surmonter les formidables obstacles techniques et financiers qui se dressent actuellement sur la route de l'hydrogène. Pour que l'hydrogène devienne compétitif par rapport aux systèmes énergétiques existants, d'importantes réductions des coûts unitaires, notamment sur le transport et le stockage en grandes quantités ainsi que sur les piles à combustible sont indispensables. Trouver une solution concrète au problème du stockage de l'hydrogène à bord des véhicules constitue un enjeu déterminant. Les gouvernements, fournisseurs des services d'énergie, constructeurs automobiles et équipementiers, qui à eux seuls investissent des milliards de dollars en recherche et développement et démonstration sur l'approvisionnement en hydrogène et sur les piles à combustible, sont persuadés que ces défis sont surmontables. Des percées technologiques inattendues issues d'avancées en sciences fondamentales, dont l'impact sur l'approvisionnement et les piles à combustible à hydrogène pourrait s'avérer révolutionnaire, ne sauraient être exclues.

Si ces percées technologiques et financières devaient s'accomplir dans un avenir proche, le passage à un système énergétique hydrogène prendrait néanmoins plusieurs décennies. Le lent remplacement des investissements considérables en équipements qui forme le système énergétique mondial et les capacités farmineuses qu'il faudrait mettre en place pour remplacer les systèmes existants et pour satisfaire la demande croissante, signifient que les combustibles fossiles demeureront très probablement le pivot du système énergétique mondial au moins jusqu'au milieu du siècle.

Il semble probable qu'au cours des étapes initiales d'une transition vers l'économie de l'hydrogène quelle qu'elle soit, ce combustible serait en grande partie produit à partir de combustibles fossiles au moyen des systèmes énergétiques existants. Le gaz naturel, en particulier, pourrait former une passerelle entre l'économie du combustible fossile et la future économie de l'hydrogène. Intégré à la capture et au stockage du carbone, l'hydrogène pourrait

être produit à partir du gaz ou du charbon avec des émissions minimales de gaz à effet de serre. À plus long terme, et à mesure que s'épuiseront les ressources en combustibles fossiles, il faudra que les sources d'énergie renouvelables ou le nucléaire prennent de plus en plus la relève comme sources d'énergie primaire pour la production d'hydrogène et d'électricité.

Les économies en développement ont au moins autant à gagner d'une mutation vers l'économie de l'hydrogène que les économies industrialisées, car elles souffrent généralement d'une pollution urbaine accrue et tendent à être plus gourmandes en énergie. Il se peut toutefois que ce processus commence plus tard dans la plupart des économies en développement, car elles sont moins à même de participer à la recherche et développement sur l'hydrogène. Elles pourraient accélérer l'introduction commerciale de l'hydrogène en établissant un cadre basé sur les principes du marché libre veillant à ce que l'énergie soit tarifée et taxée adéquatement. En tout état de cause, les pays riches doivent être prêts à soutenir les économies en développement dans leur passage à des axes énergétiques plus durables. Les organisations internationales et non gouvernementales ont un rôle important à jouer afin d'aider les pays à créer un environnement politique au sein duquel l'hydrogène et les autres technologies énergétiques émergentes pourront pénétrer le marché dès qu'ils constitueront une solution énergétique viable.

Annexe A : acteurs clés de la recherche et développement sur l'hydrogène

Programmes nationaux et régionaux

La plupart des pays de l'OCDE et un nombre croissant d'économies en développement mènent des programmes actifs de recherche et développement sur l'hydrogène et la pile à combustible. Le total du financement public à l'échelon planétaire s'élève désormais à environ un milliard de dollars par an. Les piles à combustible absorbent environ la moitié de ce budget. Le reste est majoritairement consacré à la production ainsi qu'au transport et au stockage. De petites sommes sont investies dans des technologies d'utilisation finale non fondées sur les piles à combustible, telles que les turbines à gaz et les moteurs à combustion interne. Les dépenses totales ont fortement augmenté ces dernières années et les plus fortes hausses des financements concernent les États-Unis et l'Union Européenne. Presque tous les autres pays qui ont entrepris de la recherche et développement sur l'hydrogène ont également intensifié leurs activités.

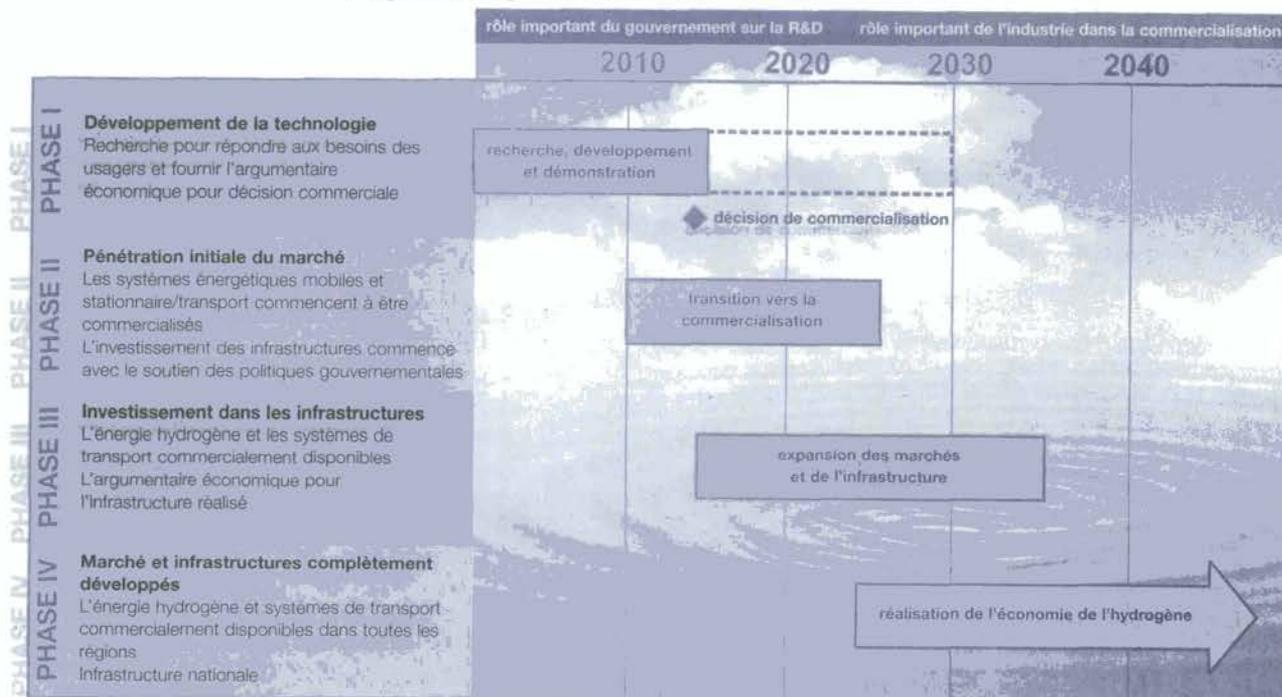
Certains pays s'appuient sur des programmes de recherche et développement intégrés qui couvrent toutes les facettes de l'alimentation et de l'utilisation finale de l'hydrogène. D'autres, en revanche, se concentrent sur des aspects précis. Dans chaque cas, l'équilibre du financement entre différents domaines de recherche reflète un mélange de priorités politiques nationales, des ressources dont dispose le pays, et de traditions et points forts en matière de recherche. À titre d'exemple, le programme COAL21 de l'Australie, pays doté d'immenses réserves de charbon, couvre la production d'hydrogène à partir du charbon, intégrée à la CSC. L'Allemagne met l'accent sur les piles à combustible pour véhicules, reflet de sa grande expérience dans le domaine de la construction automobile.

États-Unis

Le gouvernement des États-Unis mène la plupart de ses activités de recherche et développement sur l'hydrogène et la pile à combustible dans le cadre du programme *Hydrogen, Fuel Cells and Infrastructure Technologies Program*, dirigé par le *Department of Energy*. La stratégie du gouvernement consiste à concentrer le financement sur la recherche appliquée à haut risque des technologies en phases initiales de développement et à tirer parti du financement privé par le biais de partenariats. L'administration a considérablement accru les financements, avec le lancement fin 2003 d'un programme quinquennal de développement de l'hydrogène de 1,2 milliards de dollars, baptisé *Hydrogen Fuel Initiative*. 500 millions de dollars ont par ailleurs été affectés au programme *FreedomCAR and Fuel Program*, co-initiative entre les secteurs privé et public visant à mettre au point un véhicule à pile à combustible (voir ci-dessous).

Le *Department of Energy* a identifié quatre phases lors de la transition vers l'économie de l'hydrogène (figure 3). En phase 1, le gouvernement et les organismes privés mènent la recherche et développement, mettent en œuvre des projets de démonstration technologiques, se chargent de l'éducation du grand public et élaborent des codes et normes. En 2015, l'administration déterminera si les technologies à hydrogène peuvent être commercialisées à court terme et s'il convient de poursuivre la recherche et développement. La deuxième phase, c'est-à-dire la pénétration initiale du marché, est censée débuter dès 2010. Le gouvernement subventionnera les modifications de l'infrastructure existante afin de soutenir les applications stationnaires et le transport. Si la décision sur la commercialisation est positive, le gouvernement fédéral passera à la phase 2 et lancera la phase 3 qui concernera la construction d'infrastructures de fabrication de piles à combustible et de distribution d'hydrogène à grande échelle. Les subventions devraient demeurer en place pour maintenir la dynamique sur sa lancée. Le début de la quatrième et dernière phase, la réalisation de l'économie de l'hydrogène, est pressenti pour 2025.

Figure 3 : transition vers l'économie de l'hydrogène envisagée par le programme hydrogène des États-Unis



Source : www.hydrogen.gov/president.html

Japon

Le Japon a été le premier pays à engager un programme de recherche et développement à grande échelle sur la pile à combustible à hydrogène, programme décennal de 18 milliards de yens (165 millions de dollars) qui s'est achevé en 2002. Le projet *New Hydrogen Project* (NEP), amorcé en 2003, se concentre sur la commercialisation. Le financement a été relevé chaque année

depuis le début du projet et atteint 35 milliards de yens (320 millions de dollars) lors de l'exercice 2005. Le gouvernement japonais est convaincu qu'avec un appui financier solide et continu, les piles à combustible à hydrogène peuvent devenir compétitives dans les deux décennies à venir.

Le NEP fixe des objectifs ambitieux pour l'introduction des véhicules à pile à combustible, des stations de réapprovisionnement ainsi que pour augmenter la capacité des piles à combustible stationnaires d'ici 2010 et 2020 (tableau 2). La mise en œuvre doit se dérouler en trois étapes. L'étape initiale, qui a duré jusqu'en 2005, s'est concentrée sur le développement technologique continu, les démonstrations de pile à combustible et l'élaboration de codes et normes. L'étape introductive, qui durera jusqu'en 2010, s'attachera à accélérer les ventes de véhicules parallèlement à la construction d'infrastructure de ravitaillement. L'étape de diffusion, prévue de 2011 à 2020, intensifiera l'édification d'infrastructures entamée lors de la deuxième étape.

Table 2: objectifs de commercialisation de l'hydrogène au Japon		
	2010	2020
Véhicules à pile à combustible en circulation	50 000	5 000 000
Stations de ravitaillement en hydrogène	-	4 000
Systèmes de cogénération stationnaires à pile à combustible (MW)	2 200	10 000

Source : Agence internationale de l'énergie (2004a).

Union Européenne

La majeure partie du financement de l'Union Européenne pour les activités liées à l'hydrogène est allouée en vertu du sixième programme-cadre sur les énergies renouvelables qui s'étale de 2002 à 2006. 100 millions d'euros (120 millions de dollars) de fonds de l'Union Européenne, assortis d'un montant équivalent en investissements privés, ont été affectés aux projets de recherche et développement et de démonstration sur l'hydrogène et les piles à combustible à l'issue du premier appel d'offres en 2003. On prévoit de nouveaux appels d'offres en recherche et développement, pour une valeur de 300 millions d'euros en investissements publics et privés, dont 150 millions d'euros de financement de l'Union Européenne. On s'attend à ce que le financement public et privé atteigne un total de 2,8 milliards d'euros sur la décennie finissant en 2011. Sur ce montant, les projets de production représenteront 1,3 milliard d'euros et les projets d'utilisation finale dans les collectivités 1,5 milliards d'euros. Certains autres programmes de l'Union Européenne comportent également des actions en faveur de l'hydrogène.

Tous les projets sur l'hydrogène financés par l'Union Européenne sont destinés à soutenir l'initiative à grande échelle *Quick Start* qui entend attirer l'investissement privé dans les projets d'infrastructure en partenariat avec des institutions publiques et la Banque européenne d'investissement. L'objectif final

consiste à accélérer la commercialisation des technologies liées à l'hydrogène au cours des prochaines décennies. Les projets de production visent à promouvoir la recherche de pointe afin de bâtir une usine prototype capable de produire de l'hydrogène et de l'électricité à échelle industrielle et de séparer et stocker en toute sécurité le CO₂ généré par le processus. Les projets sur l'utilisation finale ont pour vocation d'explorer la faisabilité économique et technique de la gestion de collectivités exploitant l'hydrogène et dénommées *villages de l'hydrogène*. Il faudra pour cela établir une infrastructure de production et de distribution d'hydrogène centralisée et décentralisée, des systèmes à hydrogène/électricité autonomes et reliés au réseau, un nombre substantiel de véhicules alimentés à l'hydrogène et une infrastructure de ravitaillement. Des recherches seront également menées sur différentes méthodes de production fondées sur les sources d'énergie renouvelables, notamment l'éolien et la biomasse, le but étant de démontrer des technologies de pointe.

Autres programmes

Il existe des programmes d'envergure sur l'hydrogène dans divers autres pays de l'OCDE, dont l'Allemagne, l'Australie, le Canada, la Corée, la France et l'Italie. Pour la plupart, ces projets sont menés en collaboration avec des organismes privés :

- L'Allemagne est l'un des chefs de file mondiaux du développement de l'hydrogène et des piles à combustible. Ces dernières sont devenues l'objet principal de recherche et développement et démonstrations publiques ainsi que privées, reflétant pour l'essentiel le savoir-faire traditionnel de ce pays dans la construction automobile. Divers projets de démonstration sont en chantier, dont deux stations de réapprovisionnement en hydrogène à l'aéroport de Munich alimentant trois bus et un parc de BMW à l'hydrogène, ainsi que l'initiative *Clean Energy Partnership* de Berlin qui concerne l'installation d'une station de réapprovisionnement pour trente voitures à pile à combustible. En fait, presque trois-quarts des piles à combustible en démonstration en Europe se trouvent en Allemagne. Au total, l'industrie de la pile à combustible y emploie environ 3000 personnes. L'ensemble des dépenses publiques en activités liées à l'hydrogène est estimé à 34 millions d'euros (41 millions de dollars) par an.
- Le programme Australien sur l'hydrogène vise à réduire l'intensité en dioxyde de carbone de l'alimentation et de la consommation énergétiques afin de permettre la poursuite de l'exploitation de ses vastes réserves de combustibles fossiles. L'une des priorités de la recherche et développement porte sur la production d'hydrogène par gazéification du charbon dans le cadre du programme COAL21.
- La recherche et développement Canadienne sur l'hydrogène est axée sur la production à partir d'énergies renouvelables et sur les piles à combustible. Parmi ses succès notables figurent l'élaboration de la pile à combustible MEP de Ballard, qui a débouché sur le premier prototype mondial de bus à pile à combustible en 1993, et l'électrolyseur à eau alcaline d'Hydrogenics. Le financement public excède 30 millions de dollars canadiens (25 millions de dollars) par an, le cumul des dépenses depuis le début des années 1980 dépassant 200 millions de dollars canadiens.

- Le gouvernement Coréen n'a commencé à financer la recherche et développement sur l'hydrogène qu'en 1998, mais s'affirme aujourd'hui comme acteur de premier plan. En 2004 il a lancé un nouveau programme doté d'un budget de 586 millions de dollars jusqu'en 2011. Ce programme cible pour 2012 l'élaboration de systèmes de production d'hydrogène par électrolyse basé sur les énergies renouvelables, la commercialisation d'une pile à combustible stationnaire de 370 MW et l'introduction de 10 000 véhicules à pile à combustible. Le gouvernement alloue en outre d'importantes subventions aux investissements en hydrogène et piles à combustible.
- En France, les activités dans le domaine de l'hydrogène couvrent le procédé MEP et les piles à combustible à oxyde solide ; les technologies de production basées sur la gazéification du charbon avec capture du carbone, sur l'énergie solaire et nucléaire à haute température, et sur le petit reformage de la biomasse et des combustibles fossiles ; ainsi que les dispositifs de stockage. Les dépenses publiques annuelles, contributions de l'Union Européenne comprises, sont estimées à un total de 40 millions d'euros (48 millions de dollars).
- En Italie, le financement public s'est élevé en moyenne à environ 30 millions d'euros par an depuis le début de la décennie, dont 60 % environ alloués à la production d'hydrogène et le reste aux piles à combustible. Plusieurs projets de démonstration sont en cours. L'une des réalisations notables est la construction d'une usine de production d'hydrogène via électrolyse intégrée à des systèmes photovoltaïques. Autre initiative, le projet Biocca vise à tester une infrastructure hydrogène urbaine à Milan et en Lombardie.

En dehors de l'OCDE, les pays phares de la recherche et développement en hydrogène sont la Chine, l'Inde, la Russie et le Brésil. Les initiatives Chinoises en matière de recherche et développement sur l'hydrogène et les démonstrations sont essentiellement motivées par une grave pollution dans de nombreuses villes de ce pays ainsi que par les inquiétudes sur la sécurité énergétique. Le financement public annuel est évalué à quelques dizaines de millions de dollars, des sommes encore plus élevées étant investies par des organismes privés. Un projet de démonstration de bus à pile à combustible pékinois se propose de mettre 200 bus en service commercial à temps pour les Jeux Olympiques 2008. Les premiers bus à hydrogène sont déjà entrés en service dans cette ville dans le cadre du projet Programme des Nations Unies pour le Développement / Fonds pour l'Environnement Mondial. Le gouvernement de Shanghai envisage par ailleurs d'introduire 1000 véhicules à pile à combustible d'ici 2010.

L'Inde a budgétisé 2,5 milliards de roupies (58 millions de dollars) en vue de financer des projets sur l'hydrogène et les piles à combustible dans des laboratoires universitaires ou publics entre 2005 et 2007. Un projet pilote à l'étude consiste à mélanger de petites quantités d'hydrogène au carburant diesel à l'usage d'une cinquantaine de bus de New Delhi. À l'échelon national, il existe des projets d'introduction d'ici la fin de la décennie d'un millier de véhicules à hydrogène, dont 800 voitures à trois roues et 200 bus. Les constructeurs automobiles devraient contribuer à hauteur d'au moins 5 milliards de roupies

(116 millions d'euros) à la mise au point et à la démonstration de véhicules à pile à combustible au cours des 5 prochaines années.

La Russie a une longue histoire de production et recherche et développement dans le domaine de l'hydrogène. Un programme national de développement de l'hydrogène, financé par le budget fédéral et des investisseurs privés et destiné à développer un marché pour les véhicules à hydrogène, est en pourparlers. Les activités liées à l'hydrogène ont été intensifiées en 2003 grâce à l'accord entre l'Académie des sciences de Russie et la société *Norilsk Nickel Company* portant sur un programme de développement de piles à combustible. Le total du co-financement atteindra 120 millions de dollars, dont 30 millions ont été alloués en 2005.

Le Brésil a dressé un plan de route sur l'hydrogène qui a pour ambition de commercialiser des piles à combustible pour les transports et les systèmes énergétiques hors réseau. La priorité de la recherche et développement brésilienne sur l'hydrogène concerne la production par électrolyse de l'eau ; le reformage du gaz naturel et le reformage ou la gazéification de l'éthanol et des biocombustibles ; les technologies de stockage, dont les hydrures métalliques ; et les piles à combustible.

Secteur privé

On estime que les dépenses du secteur privé en recherche et développement et démonstration sur l'hydrogène, les piles à combustible et les technologies apparentées sont largement supérieures aux budgets publics. Aucune évaluation précise de ces budgets n'est cependant disponible. L'Agence internationale de l'énergie estime que les dépenses du secteur privé atteignent actuellement entre 3 et 4 milliards de dollars par an, soit le quadruple environ du montant alloué par les instances publiques. Les principaux acteurs sont les compagnies pétrolières et gazières, les constructeurs automobiles, les prestataires d'électricité et de gaz ainsi que les entreprises de construction de centrales électriques. Les fabricants de piles à combustible et d'équipements liés à l'hydrogène destinés aux organismes du secteur privé et public financent de plus en plus leur propre recherche et développement.

L'un des plus grands projets impliquant des sociétés privées est le partenariat *FreedomCAR and Fuel Partnership*, co-initiative mise en place à l'origine en 2002 par le *Department of Energy* des États-Unis avec General Motors, Ford et Daimler Chrysler en vue de concevoir des véhicules à énergie non pétrolière. Il s'est étoffé en 2003 de cinq compagnies du secteur : BP America, ChevronTexaco Corporation, ConocoPhillips, Exxon Mobil Corporation et Shell Hydrogen (US). Les piles à combustible à hydrogène sont un élément central du projet. Le financement public se monte à 500 millions de dollars.

Le gouvernement américain sollicite également des financement privés pour le projet *FutureGen*, initiative visant à bâtir la première centrale thermique et de production d'hydrogène au monde exempte d'émissions et intégrée avec le CSC. Le *Department of Energy* négocie un accord de coopération avec un consortium mené par les industries des centrales thermiques et au charbon ainsi que

l'industrie du charbonnage. Ce consortium sera chargé de concevoir, construire et exploiter la centrale et de superviser, mesurer et vérifier la capture du dioxyde de carbone. Il devrait contribuer à hauteur de 250 millions de dollars environ au coût du projet, estimé à 950 millions (en dollars de l'année 2004).

Autre exemple de co-initiative privée et publique, le partenariat *California Fuel Cell Partnership* réunit des constructeurs automobiles, des fournisseurs de services d'énergie, des concepteurs de piles à combustible et des administrations. Il vise à mettre au point et tester des véhicules à pile à combustible en conditions réelles de conduite quotidienne et à promouvoir le développement d'une infrastructure de ravitaillement.

Coopération internationale

En matière de recherche et développement, les efforts gouvernementaux et privés sont complétés par trois co-initiatives internationales majeures, toutes amorcées en 2003 :

- Le Partenariat international pour l'économie de l'hydrogène (PIEH) a été établi comme mécanisme de collaboration internationale sur tous les aspects de la recherche et développement et de la commercialisation ayant trait à l'hydrogène et la pile à combustible. Il sert de forum axé sur l'avancée des politiques et l'élaboration de codes et normes techniques communs aptes à accélérer le passage à l'économie de l'hydrogène tout en minimisant son coût. De surcroît, il s'emploie à éduquer et informer tant les protagonistes que le grand public sur les vertus et défis de l'instauration de l'économie de l'hydrogène. Parmi les membres du PIEH figurent 12 pays de l'OCDE, la Commission Européenne et quatre pays non membres de l'OCDE : le Brésil, la Chine, l'Inde et la Russie.
- La Plateforme européenne des technologies de l'hydrogène et des piles à combustible, mise en place par la Commission Européenne, rassemble toutes les activités de recherche et développement publiques et privées financées par l'Union Européenne qui entrent dans les programmes-cadres de la Commission. Elle contribue à promouvoir la sensibilisation aux perspectives de débouchés des technologies de l'hydrogène et de la pile à combustible, à élaborer des scénarios énergétiques et à favoriser la coopération entre protagonistes internes et externes à l'Union Européenne.
- Le Groupe de coordination sur l'hydrogène de l'Agence internationale de l'énergie s'attache à optimiser la coordination des programmes et politiques de recherche et développement publics des pays membres. Il s'appuie sur les accords de mise en œuvre existants conclus par l'Agence internationale de l'énergie en matière de collaboration technologique, notamment sur l'hydrogène, les piles à combustible sophistiquées, les gaz à effet de serre, la bioénergie, les carburants moteur de nouvelle génération et le charbon propre.

Les chevauchements existants entre les membres de ces groupes, d'une part, et leurs activités, d'autre part, favorisent un certain degré d'apports croisés et de transfert des connaissances.



Annexe B : références et sources d'informations

Rapports et livres

- BP (2005), *Statistical Review of World Energy*, BP, Londres.
- Commonwealth Government of Australia (2003), *National Hydrogen Study*, Canberra.
- Energy Information Administration (2005), *International Energy Outlook*, US Department of Energy, Washington, D.C.
- European Commission (2003), *Hydrogen Energy and Fuel Cells: A Vision of our Future*, DG TREN, Brussels.
- Hoffman, P (2001), *Tomorrow's Energy: Hydrogen, Fuel Cells, and the Prospects for a Cleaner Planet*, MIT Press, Massachusetts.
- International Energy Agency (IEA) (2004a), *Hydrogen and Fuel Cells: Reviews of National R&D Programmes*, IEA/OECD, Paris.
- _ (2004b), *Prospects for Carbon Capture and Storage*, IEA/OECD, Paris.
 - _ (2005a), *World Energy Outlook 2005*, IEA/OECD, Paris.
 - _ (2005b), *Energy Policies of IEA Countries*, IEA/OECD, Paris.
 - _ (2005c), *Prospects for Hydrogen and Fuel Cells*, IEA/OECD, Paris.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2005), *Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage: Summary for Policymakers and Technical Summary*, IPCC, Geneva.
- Larsen H., Feidenhans'l R. et Petersen L. (2004), *Risø Energy Report 3: Hydrogen and Its Competitors*, Risø National Laboratory, Roskilde.
- National Research Council and National Academy of Engineering (2004), *The Hydrogen Economy: Opportunities, Costs, Barriers and R&D Needs*, National Academies Press, Washington, D.C.
- Rifkin, J (2002), *The Hydrogen Economy: The Creation of the World-Wide Energy Web and the Redistribution of Power on Earth*, J.P. Tarcher Publishers, Los Angeles.

Sites web

- European Hydrogen and Fuel Cell Technology Platform : www.hfpeurope.org/
- International Association for Hydrogen Energy : www.iahe.org
- IEA Hydrogen Implementing Agreements : www.ieahia.org
- International Partnership for the Hydrogen Economy : www.iphe.net
- United Nations Industrial Development Organization – International Centre for Hydrogen Energy Technologies : www.unido-ichet.org
- US Department of Energy Hydrogen Program : www.hydrogen.energy.gov
- US Government Hydrogen R&D portal : www.hydrogen.gov
- United States Council for Automotive Research : www.uscar.org

A propos de la division Technologie, Industrie et Economie du PNUE

La division Technologie, Industrie and Economie du PNUE aide les autorités nationales et locales et les décideurs de l'industrie à élaborer et mettre en œuvre des politiques et des pratiques axées sur le développement durable.

La division s'attache à promouvoir :

- > des modes de consommation et de production durables,
- > l'utilisation efficace des énergies renouvelables,
- > la gestion adéquate des produits chimiques,
- > l'intégration des coûts environnementaux dans les politiques de développement.

De Paris, la direction coordonne les activités menées par:

- > **Le Centre international d'éco-technologie** - IETC (Osaka, Shiga), qui met en œuvre des programmes de gestion intégrés des déchets, de l'eau et des catastrophes, en Asie principalement.
- > **Le service Production et Consommation** (Paris), qui encourage des modes de consommation et de production durables afin de contribuer au développement de la société par le marché.
- > **Le service Substances chimiques** (Genève), qui catalyse les efforts mondiaux destinés à assurer une gestion des produits chimiques respectueuse de l'environnement et à améliorer la sécurité relative à ces produits dans le monde.
- > **Le service Energie** (Paris), qui favorise des politiques de développement durable en matière énergétique et de transport et encourage les investissements dans les énergies renouvelables et l'efficacité énergétique.
- > **Le service Action Ozone** (Paris), qui, dans le cadre du Protocole de Montréal, soutient les programmes d'élimination progressive des substances appauvrissant la couche d'ozone dans les pays en développement et les pays en transition.
- > **Le service Economie et Commerce** (Genève), qui aide les pays à intégrer les considérations d'ordre environnemental dans les politiques économiques et commerciales et mobilise le secteur financier pour intégrer le développement durable dans ses stratégies.

Les activités de la Division sont axées sur la sensibilisation, les transferts d'information et de connaissances, le renforcement des capacités, l'appui à la coopération technologique, les partenariats et la mise en œuvre des conventions et accords internationaux.

L'hydrogène offre la promesse d'un avenir énergétique planétaire réellement durable. Vecteur énergétique propre qu'il est possible de produire à partir de n'importe quelle source d'énergie primaire, l'hydrogène employé dans des piles à combustible hautement efficaces pourrait s'avérer être la réponse à nos préoccupations croissantes en matière de sécurité énergétique, de pollution urbaine et de dérèglement climatique. Cette récompense justifie incontestablement l'attention et les ressources actuellement dévolues à l'hydrogène, même si les perspectives de commercialisation généralisée dans un avenir prévisible sont incertaines.

www.unep.org

United Nations Environment Programme
P.O. Box 30552 Nairobi, Kenya
Tel.: ++254-(0)20-762 1234
Fax: ++254-(0)20-762 3927
E-mail: unppub@unep.org



Pour en savoir plus:

PNUE DTIE

Service Energie

39-43, Quai André Citroën
75739 Paris Cedex 15, France

Tél.: +33 1 44 37 14 50

Fax: +33 1 44 37 14 74

Courriel: unep.tie@unep.fr

www.unep.fr/energy/

DTI/0793/PA