

CAP SUR L'HYDROGÈNE

04
05RETOUR À LA SOURCE
UNIVERSELLE

03

INTRODUCTION

06 - 07

NOTRE AMI
L'HYDROGÈNE11
12CONSTRUIRE
DES RÉSEAUX
DE DISTRIBUTION

08 - 10

CAP SUR
L'HYDROGÈNE

13

L'HYDROGÈNE
FAIT RÉSEAU

14 - 17

PANORAMA DU MARCHÉ
DE LA MOBILITÉ HYDROGÈNE19
20VERS UNE
SOURCE
INÉPUISABLE
ET PROPRE

18

TROIS QUESTIONS
À JULES VERNE

21 - 22

CHANGER
D'ÉCHELLE

23

L'HYDROGÈNE
EN LIGNE

24 - 25

L'ÉCOSYSTÈME
HYDROGÈNE

26

GRAND ENTRETIEN
THOMAS PESQUET

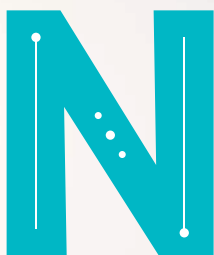
Comité éditorial

Pierre-Etienne Franc
Dominique Lecocq
Alexandra Lebrethon

WE DEMAIN ÉDITIONS

Éditeur : Jean-Dominique Siegel. Partenariat : Mairé Sue. Rédacteur en chef : Gilles Luneau.
Directrice artistique : Alison Guyard. Secrétariat de rédaction : Claire Gollot. Iconographie : Sylvain Galy.
Maquette et préresse : Élodie Doré.
www.wedemain.fr

Imprimé sur papier PEFC par Valpaco, 3 Rue du Pont des Halles 94150 Rungis.



é dans les étoiles, l'hydrogène est constitutif de notre planète. Abondant, incolore, inodore, non corrosif, il a l'avantage d'être trois fois plus énergétique en kilogramme que l'essence. Grâce à la simplicité de son atome – composé d'un proton et d'un électron –, il est le plus léger de tous les éléments chimiques. On ne trouve pas l'hydrogène naturellement seul, il est toujours associé à d'autres molécules, la plus répandue étant la molécule d'eau. Et l'eau couvre 70 % de la surface terrestre. Depuis sa domestication, en 1806, par le Suisse Isaac de Rivaz, dans le premier moteur à hydrogène, en passant par l'aventure spatiale dont il est indissociable, l'hydrogène est familier des réussites industrielles. On le retrouve dans la métallurgie, la chimie, la pétrochimie et la pharmacie, mais jusqu'il y a peu, il demeurait absent des transports. Boudé par la mécanique, le moteur à hydrogène est réapparu sporadiquement, à chaque fois comme une évidence réinventée mais s'évanouissant sous le verdict d'une calculatrice : trop cher. Pourquoi faire tourner un moteur à l'hydrogène qu'il faudrait extraire du gaz naturel quand on peut rouler directement au GNV ou se contenter de pétrole peu cher ? Quant à l'extraire de l'eau, c'est encore plus coûteux car l'électrolyse consomme beaucoup d'électricité.

La donne a changé avec les énergies renouvelables (EnR). Elles peuvent produire à foison, mais pas toujours à volonté. Leur intermittence donne toute sa place à l'hydrogène : en effet, l'électricité a la singularité de devoir être consommée simultanément à sa production. Quand il n'y a pas de consommation, l'électricité produite par une éolienne ou un panneau solaire est de l'énergie perdue : la question de son coût n'est alors plus de mise. Autant se servir de cette électricité dite « fatale » pour électrolyser de l'eau. Comme l'hydrogène se stocke facilement, il permet de conserver de l'électricité sous forme gazeuse ou liquide, il suffit de compresser l'hydrogène ou de le refroidir. Le moment venu, l'hydrogène peut restituer l'électricité en faisant tourner une turbine ou une pile à combustible. Deux technologies matures, maîtrisées. Il y a là un moyen supplémentaire de répondre aux enjeux climatiques tout en allégeant la facture des importations pétrolières.

Alors qu'attend-on pour substituer l'hydrogène aux carburants fossiles ? En vérité, il n'y a rien à attendre ! Le temps des prototypes et de l'expérimentation est largement révolu ! La mobilité hydrogène fait ses preuves tous les jours. Le stockage de l'électricité aussi. Il faut maintenant changer d'échelle, industrialiser les solutions, construire les marchés d'une économie verdie à l'hydrogène, en faire la pédagogie auprès de la société civile. Le citoyen va ainsi découvrir que les solutions hydrogène ne peuvent être réduites à leurs seules vertus technologiques et environnementales. Elles sont les signes et symboles d'une société en mutation vers des modes de vie résilients. On ne change pas seulement de carburant, on change de façon d'être. Le fond de l'air gagne en pureté et l'horizon de l'humanité est soudain beaucoup plus clair.

Abondante, propre, inépuisable

RETOUR À LA SOURCE UNIVERSELLE

LA PILE À COMBUSTIBLE S'INTALLE DISCRÈTEMENT
DANS NOS VIES : ALIMENTÉE EN HYDROGÈNE, ELLE PRODUIT
DE L'ÉLECTRICITÉ... EN FAISANT DE L'EAU.

On connaît depuis le XIX^e siècle le pouvoir calorifique de l'hydrogène : la combustion d'un kilo d'hydrogène libère près de trois fois plus d'énergie qu'un kilo d'essence. Dès cette époque, l'hydrogène a été utilisé pour éclairer et chauffer les villes, avant d'être détrôné par le pétrole et le gaz naturel. Par contre, comme il est très peu dense, il occupe – à masse égale – un plus grand volume : il faut 4,6 litres de dihydrogène comprimé à 700 bars pour produire autant d'énergie qu'avec 1 litre d'essence. On trouve l'hydrogène en abondance presque partout, notamment dans la molécule d'eau (composée de deux atomes d'hydrogène et un atome d'oxygène) et les chaînes carbonées, mais il est rarement seul. Il faut donc l'extraire sous la forme gazeuse de deux atomes associés (dihydrogène). On a longtemps extrait l'hydrogène de la houille, puis du gaz naturel. On connaît aujourd'hui l'impact négatif de ces techniques sur la production de gaz à effet de serre responsables du réchauffement climatique. Pour y pallier, on a recours à la production d'hydrogène par électrolyse ou à la technologie de captage et valorisation du CO₂ émis lors de la production d'hydrogène à partir de gaz naturel (CCUS – Carbon capture utilization and storage). Ensuite, ce gaz hydrogène peut alimenter une pile à combustible (PAC). Elle est l'invention d'un savant anglais, William Robert Grove, qui



Sir William Robert Grove (1811-1896)

démontra, en 1839, qu'en recombinaison du dihydrogène et du dioxygène on produit simultanément de l'électricité, de la chaleur et de l'eau. Cette synthèse de l'eau résume le principe de la PAC.

Une pile est composée d'une borne positive – la cathode – et d'une borne négative – l'anode – entre lesquelles on fait circuler des électrons et des ions. La cathode et l'anode sont séparées par un électrolyte solide ou liquide. Dans une pile à combustible, le dihydrogène arrive à l'anode et le dioxygène à la cathode. L'oxygène attire les atomes d'hydrogène mais pour le rejoindre ils doivent se diviser en électrons et en ions car l'électrolyte bloque les électrons et les oblige à passer par un circuit où ils génèrent du courant électrique.

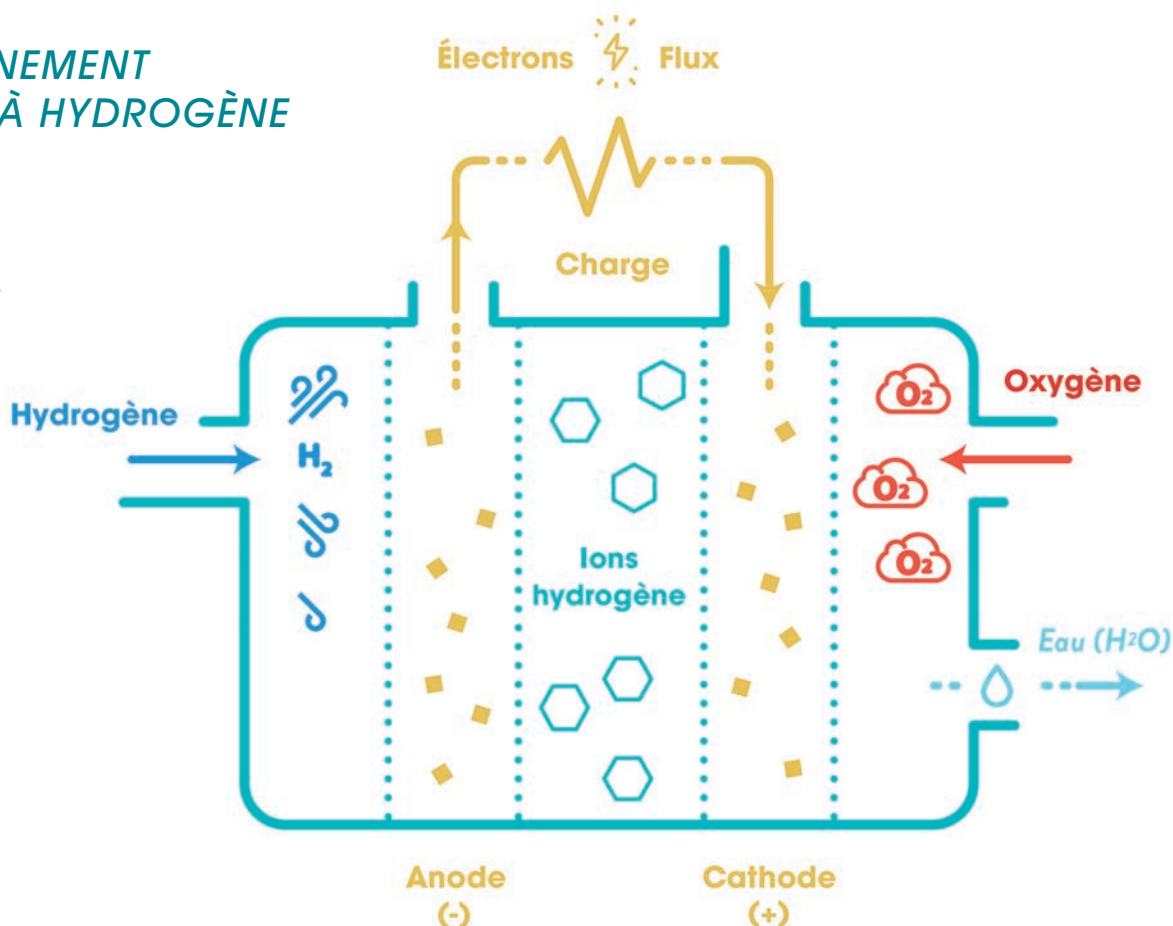
Simultanément, les ions d'hydrogène traversent l'électrolyte pour rejoindre l'oxygène avec lequel ils forment de l'eau. L'ensemble de cette réaction chimique produit de la chaleur qui peut aussi être récupérée ce qui donne un rendement énergétique total de l'ordre de 60 % (un moteur thermique classique, type automobile à essence, a un rendement de 35 %).

HYDROGÈNE BAS CARBONE

L'hydrogène est un vecteur d'énergie secondaire, il faut l'isoler des molécules auxquelles il est associé pour pouvoir extraire son énergie propre. Dans cette opération, la source d'hydrogène pèse dans l'empreinte carbone des procédés qui l'utilisent. Le gaz naturel (essentiellement du méthane) sert encore aujourd'hui à produire massivement le dihydrogène destiné à l'industrie et plus particulièrement pour la désulfuration des hydrocarbures : en 2017, les volumes d'hydrogène fournis par Air Liquide aux raffineries du monde entier ont permis d'éviter le rejet d'environ 1,5 million de tonnes d'oxydes de soufre dans l'atmosphère, ce qui représente plus de dix fois la totalité des émissions d'un pays comme la France. L'hydrogène est aussi utilisé dans la métallurgie, la chimie, la pharmacie, l'électronique, l'agroalimentaire. En France, l'industrie consomme

FONCTIONNEMENT D'UNE PILE À HYDROGÈNE

Un atome d'hydrogène est notamment composé de ions positifs et d'électrons négatifs. Insufflé à la cathode, l'oxygène (O_2) attire les atomes d'hydrogène (H_2) introduits à l'anode. Pour rejoindre l'oxygène les atomes d'hydrogène doivent traverser un électrolyte ou une membrane qui bloque leurs électrons. Ces électrons sont obligés de passer par un autre circuit ce qui produit de l'électricité. Par contre, les ions (H^+) traversent l'électrolyte pour rejoindre les atomes d'oxygène avec lesquels ils se combinent pour former de l'eau (H_2O). Ce processus produit de la chaleur qui à son tour peut servir d'énergie. La recherche se concentre sur le perfectionnement des membranes.



900 000 tonnes de dihydrogène par an. Chiffre porté à 50 millions de tonnes au niveau mondial.

La fabrication d'hydrogène à partir de méthane laisse un gaz résiduel composé de dioxyde de carbone (CO_2) et d'hydrogène. Pour résoudre l'émission de CO_2 liée à cette manière de produire de l'hydrogène, Air Liquide a mis au point un procédé

unique au monde, la technologie Cryocap, mise en service en 2015 dans la plus grande unité de production d'hydrogène d'Air Liquide en France, à Port-Jérôme-sur-Seine.

La technologie Cryocap permet de récupérer et d'isoler le CO_2 émis lors de la production d'hydrogène – elle le stocke sous forme liquide, cela répond aux besoins d'approvisionnement continu

nécessaire à différentes applications industrielles (carbonatation de boissons, surgélation, besoins agricoles...). L'installation CryocapTM H_2 de Port-Jérôme-sur-Seine a une capacité annuelle de captage de 100 000 tonnes de CO_2 . Air Liquide s'engage d'ici 2020 à ce qu'au moins 50 % de l'hydrogène nécessaire à ces applications soit bas carbone.

COMPARAISON DU POUVOIR CALORIFIQUE DE DIFFÉRENTS COMBUSTIBLES

Le pouvoir calorifique est l'énergie thermique libérée par la combustion d'une matière. Il est exprimé en mégajoules par kilo de combustible (MJ/kg) ou en kilowattheure par kilo (kWh/kg).

Le tableau ci-dessous compare le pouvoir calorifique supérieur de combustibles couramment utilisés pour le chauffage, le transport ou la production d'électricité.

	MJ/kg	kWh/kg
Charbon	20	8
Essence	47	9
Gasoil	44	10
Gaz naturel	50	10
Hydrogène	142	39

RENDEMENT DES DIFFÉRENTES MOTORISATIONS

Le rendement d'un moteur est le rapport entre la quantité d'énergie mis en œuvre pour le faire fonctionner et la quantité d'énergie mécanique qui en résulte.

alimenté
EN GASOIL
37 %

alimenté par une pile
À COMBUSTIBLE
60 %

alimenté
EN ESSENCE
35 %

alimenté
PAR BATTERIE
80 %



NOTRE AMI L'HYDROGÈNE

TOMBÉ DU CIEL

•

FACE AUX DÉFIS DE LA MUTATION ÉNERGÉTIQUE DE LA SOCIÉTÉ, L'HYDROGÈNE OFFRE UN POTENTIEL POUR L'INTÉGRATION DES ÉNERGIES RENOUVELABLES DANS LE MIX ÉNERGÉTIQUE ET DE DÉCARBONATION DES USAGES FINAUX DES ÉNERGIES FOSSILES.

Le changement climatique nous contraint à changer nos sources et modes d'utilisation d'énergies. Le monde va vers un mix énergétique principalement composé de sources renouvelables.

L'HYDROGÈNE, L'IRREMPLAÇABLE AMI DES ENR

Parmi les énergies renouvelables (EnR), l'intermittence des énergies solaire et éolienne pose un problème de stabilité des réseaux de distribution d'électricité. Il se résout techniquement par la production d'hydrogène, via l'électrolyse de l'eau, avec la surproduction électrique des périodes venteuses ou solaires. Ce stockage gazeux de l'énergie permet de la restituer au réseau électrique selon les besoins et d'intégrer facilement les EnR aux réseaux

existants. La production d'hydrogène associée aux EnR permet aussi d'assurer l'autonomie énergétique de régions insulaires ou isolées.

Demain, si l'énergie renouvelable confirme sa capacité à être compétitive, il sera possible de la récupérer, de la stocker et de la transporter d'un continent à un autre sous forme d'hydrogène liquide ou associé à d'autres molécules.

DÉCARBONER L'ÉCONOMIE

L'hydrogène vert produit par les EnR est aussi un moyen de décarboner nombre d'activités économiques et humaines encore dépendantes des énergies fossiles :

- Décarboner le transport avec l'usage de piles à combustible dans la

mobilité individuelle (autos et deux-roues), la propulsion des trains et trams sur les réseaux non électrifiés, des camions, des cargos, des ferries, des avions, des bus et des taxis.

- Décarboner le chauffage des bâtiments en recourant à la cogénération électricité-chaleur (pile à combustible, turbines à l'hydrogène).

- Décarboner la consommation énergétique de l'industrie : utilisation d'hydrogène vert produit avec les EnR, pour la chimie, pour la production d'électricité stationnaire.

- Servir de matière première décarbonée dans de nombreux procédés chimiques et industriels : fabrication de l'ammoniac, de méthanol, d'amines.

- Agir comme source d'énergie « tampon » pour augmenter la résilience d'un réseau électrique. Aujourd'hui, au niveau mondial, une part de l'énergie est stockée sous forme fossile (environ 15 % de la demande), demain il faudrait qu'elle le soit sous forme d'hydrogène.

**L'HYDROGÈNE VERT
EST INDISPENSABLE
POUR DÉCARBONER
NOMBRE D'ACTIVITÉS**

HALTE AUX IDÉES REÇUES !

EXPLOSIF !



L'hydrogène serait un dangereux explosif, à preuve : l'incendie du dirigeable Hindenburg, la bombe H, l'explosion à bord d'Apollo 13. Faux !

LA CATASTROPHE DE L'HINDENBURG, 1937

C'est son enveloppe mêlant coton et aluminium qui s'est enflammée à cause d'une décharge électrique provoquée par la trop grande charge électrostatique de ce revêtement hautement inflammable, charge transmise au cadre métallique. Toutes les personnes qui sont restées à bord de la navette furent saines et sauvées.

LA BOMBE À HYDROGÈNE, 1952

La bombe thermonucléaire – ou « bombe à hydrogène » – repose sur le principe de la fusion de noyaux d'atomes de deutérium et de tritium, des isotopes de l'hydrogène, à savoir des atomes qui partagent certaines caractéristiques* avec l'hydrogène. Le deutérium et le tritium sont très rares sur Terre et doivent être produits, concentrés et conditionnés de manière très spécifique pour une mise en oeuvre dans une bombe thermonucléaire. Pour les utilisations militaires, des conditions extrêmement

spécifiques, induites par l'homme, sont nécessaires pour initier la fusion du deutérium et du tritium qui entraîne une réaction en chaîne. L'hydrogène pour les utilisations industrielles et de mobilité ne partage pas les caractéristiques isotopiques ou réactives de l'hydrogène liées aux réactions thermonucléaires.

**même nombre de protons mais nombre différent de neutrons.*

APOLLO 13, 1970

L'explosion de deux réservoirs d'oxygène a mis en péril la vie des trois astronautes de la mission lunaire américaine Apollo 13. L'explosion n'était liée ni au combustible hydrogène ni aux piles à combustible, mais à un court-circuit dans les câbles des ventilateurs d'un réservoir d'oxygène.

La molécule de dihydrogène étant de petite taille, le risque de fuite d'un réservoir est plus élevé qu'avec un carburant traditionnel (la molécule traverse plus aisément les parois d'un réservoir), mais l'hydrogène étant très volatil, il se disperse plus rapidement dans l'air que les vapeurs de gaz naturel ou d'essence, ce qui diminue le risque d'explosion.

PEU EFFICIENT !



Cet argument repose sur la comparaison des rendements des

motorisations électrique à hydrogène, via l'électrolyse d'électricité renouvelable (rendement du puits à la roue de 35 % environ), et électrique à batterie (rendement de 50-60 %). Cela est vrai si l'ensemble de la chaîne est basée sur de l'électricité renouvelable, mais faux dans le mix énergétique actuel où l'électricité utilisée dans les batteries est produite par centrale à gaz, et l'hydrogène est extrait du gaz naturel avec captage et stockage du CO₂ (procédé appelé CCUS voir p. 4). Les rendements sont dans ce cas équivalents (40 % environ de chaque côté). Par ailleurs, cette analyse ne tient pas compte des bénéfices complémentaires apportés par H₂, notamment en termes de stockage des énergies renouvelables, et d'usage pour l'industrie et les consommateurs.

CONSUMMATEUR DE MÉTAUX RARES !



Aujourd'hui, une pile à combustible utilise plus de platine qu'un pot d'échappement catalytique mais avec des capacités de recyclage que ne possèdent pas les pots. Selon les travaux de recherche publiés récemment, l'avenir est au remplacement du platine par du graphène (cristaux de graphite) beaucoup moins coûteux, voire par des enzymes bactériennes.

CAP SUR L'HYDROGÈNE

LES ENTREPRISES PIONNIÈRES PRENNENT LE « VIRAGE HYDROGÈNE »

RESPONSABLE DE 23 % DES ÉMISSIONS MONDIALES DE GAZ À EFFET DE SERRE,
LE TRANSPORT S'IMPOSE COMME UN DOSSIER MAJEUR
DE LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE. L'HYDROGÈNE APPARAÎT
DE PLUS EN PLUS COMME UNE SOLUTION D'ÉVIDENCE.

Automobile, train, bateau, avion, il s'agit d'arrêter le plus rapidement possible la propulsion à base d'hydrocarbures si l'on veut contenir le réchauffement climatique en dessous de + 2 °C d'augmentation moyenne mondiale. Ce virage énergétique majeur est amorcé dans tous les domaines de la mobilité et de la production d'énergie où l'hydrogène est une solution simple, propre et efficace mais où seule la production de masse permettra d'en abaisser les coûts.

À L'USINE

Le chariot élévateur à l'hydrogène fait des merveilles dans la manutention industrielle dans les entrepôts logistiques du monde entier. Outre son autonomie énergétique, il se recharge rapidement et ne pollue pas l'air ambiant. Aux États-Unis, près de 20 000 chariots élévateurs sont déployés dans les entreprises, dont les 50 chariots élévateurs du centre Coca-Cola de Californie, approvisionnés en hydrogène par Air Liquide. Au Canada,

Air Liquide assure l'autonomie d'une flotte de plus de 750 chariots servant dans les quatre centres logistiques du groupe de distribution Walmart. Dans un marché européen estimé à 10 000 chariots à l'horizon 2020, Prélodis, fournisseur logistique des magasins Grand Frais, ouvre la voie française avec son site Prelocentre, à Saint-Cyr-en-Val, dont tous les chariots sont à hydrogène. Air liquide y a installé une station de ravitaillement qui permet d'alimenter plus de 60 chariots élévateurs.

A tall, silver, cylindrical rocket engine stands vertically on a launch pad. The engine has a long, narrow nozzle at the top and a wider base. The body is covered in vertical corrugations. The launch pad is a simple, flat, light-colored surface. The background is a clear, bright blue sky.

L'hydrogène utilisé dans les lanceurs est sous forme liquide. Les scientifiques de la Nasa estiment que si l'on parvient à solidifier ce carburant, cela pourrait bien être une formidable avancée pour la construction de lanceurs encore plus rapides.



Station de ravitaillement à Prelocentre, Saint-Cyr-en-Val, qui permet de ravitailler plus de 60 chariots élévateurs en hydrogène.

Londres est l'une des neuf métropoles européennes dans laquelle ont circulé des bus à hydrogène.



Toujours au rang de l'approvisionnement en carburant, Air Liquide a équipé la plateforme FM Logistic de Neuville-aux-Bois d'une station hydrogène qui alimente à ce jour 46 chariots élévateurs. L'opération s'est faite en 2015 dans le cadre du projet HAWL (Hydrogen And Warehouse Logistic), soutenu par le partenariat public privé européen FCH JU (Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking). Cette plateforme « pour l'hydrogène et la pile à combustible » cofinance des projets à hauteur de près de 1,3 milliard d'euros depuis fin 2014 jusqu'à 2019.

TRANSPORTS EN COMMUN

Les transports collectifs testent déjà la technologie de la pile à combustible. Ce marché est à la fois une voie de développement économique et de pédagogie de la mobilité durable. En Europe, depuis 2001, le projet CUTE (Clean Urban Transport for Europe) a permis de mettre en service une trentaine de bus à hydrogène dans neuf métropoles européennes (Amsterdam, Barcelone, Hambourg, Londres, Luxembourg, Madrid, Porto, Stockholm, Stuttgart) et trois villes associées (Perth, Beijing et Reykjavik). Ils ont transporté plus de 12 millions de passagers, sans aucun incident et sans polluer. Plus de la moitié de l'hydrogène consommé a été produite à partir des énergies renouvelables. L'expérience a fait des émules. À Rosenholm, près d'Oslo, en Norvège, Air Liquide a installé une station hydrogène qui recharge cinq bus. Idem à Rotterdam, aux Pays-Bas, et en

France, près de Versailles (Yvelines), où, depuis 2018, voitures et poids lourds peuvent faire le plein d'hydrogène. Cette station va alimenter la première ligne de bus à hydrogène en France, mise en service en 2019 entre les communes de Vélizy-Villacoublay et Versailles.

En Islande, à Reykjavik, les bus à hydrogène circulent depuis 2003 ; en Corée et en Californie depuis 2006. Au Japon, depuis juin 2007, un train à pile à combustible de l'East Japan Railway circule sur une ligne de banlieue non électrifiée. En Allemagne, le Land de Basse-Saxe s'est saisi de cet enjeu de remplacement des trains diesels et a commandé à Alstom 14 trains à PAC pour une mise en service en 2021. L'inventaire serait incomplet sans les premiers bateaux à hydrogène, en service à Hambourg pour transporter des passagers dans le port, et en France, à Nantes, pour franchir l'Erdre.

MOBILITÉ INDIVIDUELLE

Depuis les années 1990, la plupart

des grands constructeurs automobiles ont développé des prototypes de voiture à hydrogène. Après avoir exploré la piste du carburant hydrogène dans le moteur thermique traditionnel (BMW, Ferrari, Fiat, Ford, GMC, Lancia, Tata...), délaissé ensuite pour son piètre rendement, leurs efforts ont ensuite été focalisés sur la pile à combustible, arrivée à un stade de maturité illustré par de nombreux prototypes (Audi, Cadillac, General Motors, Honda, Hyundai, Kia, Mazda, Mercedes, Nissan, Opel, Toyota, Volkswagen ...) présents dans des flottes d'entreprises et des institutions publiques. Leur fiabilité n'est plus à démontrer et ils offrent notamment l'avantage sur les modèles à batteries d'avoir une autonomie (400 à 600 km) et un temps de recharge (3 à 5 mn) de l'ordre des véhicules thermiques. Aujourd'hui, les premiers modèles de série d'automobiles à hydrogène sortent des chaînes de fabrication (Honda Clarity, Hyundai Nexo, Toyota Mirai, le GLC F-Cell de Daimler) et, en Europe, BMW annonce un modèle pour 2020.

**LES AUTOS À HYDROGÈNE :
UNE AUTONOMIE ET UN TEMPS
DE RECHARGE DE L'ORDRE
DES VÉHICULES THERMIQUES.**



Toyota est en train d'implanter une centrale de production d'énergie renouvelable sur le port de Long Beach, en Californie, aux États-Unis. Prévue pour ouvrir en 2020, elle sera en mesure de générer chaque jour 2,35 Mégawatts d'électricité, ainsi qu'1,2 tonne d'hydrogène. La centrale pourra donc alimenter en carburant les véhicules transitant par le port. Toyota a également construit sur place une station hydrogène.



CONSTRUIRE DES RÉSEAUX DE DISTRIBUTION

ATTENDRE UNE MASSE CRITIQUE DE VOITURES POUR INSTALLER
UN RÉSEAU DE STATIONS HYDROGÈNE OU OSER LE RÉSEAU AVANT L'AUTO ?
AIR LIQUIDE CHOISIT UNE TROISIÈME VOIE : COLLER À LA COMMERCIALISATION
DES PREMIÈRES AUTOMOBILES DE SÉRIE À HYDROGÈNE.

AUX ÉTATS-UNIS, l'hydrogène est là, sous l'accélérateur de la voiture d'Arnold Schwarzenegger, en Californie, où Air Liquide opère une station hydrogène à Anaheim. Mis en place par l'Agence pour la qualité de l'air de l'État de Californie et repris par huit autres États américains, le programme ZEV (Zero emission vehicle) oblige les fabricants automobiles à vendre un quota minimum de véhicules propres.

Disposition qui favorise le déploiement des véhicules à hydrogène. L'État californien étudie aussi depuis janvier 2018 une mesure de bannissement commercial des véhicules neufs – voitures particulières et camions – équipés d'un moteur à essence ou diesel à partir du 1^{er} janvier 2040. Plus largement, Air Liquide accompagne le lancement commercial aux États-Unis, entre Boston et New York, de la Toyota

Mirai (photo ci-dessus, à dr.) par la mise en œuvre d'un réseau de 12 stations hydrogène dans le nord-est des États-Unis, en collaboration avec Toyota Motor Sales USA, Inc.

AU JAPON, le gouvernement considère l'hydrogène comme une énergie majeure et affiche l'ambition d'une société de l'hydrogène. Il y a déjà 100 stations

hydrogène en service et la roadmap prévoit 320 stations en 2025. Air Liquide est membre de «Japan H2 Mobility (JHyM)», consortium de près de vingt sociétés ayant pour objectif d'attirer de nouveaux investisseurs et opérateurs pour soutenir le développement du réseau de stations hydrogène au Japon. Dans un premier temps, JHyM va installer 80 stations hydrogène supplémentaires (qui s'ajoutent aux 100 existantes), sur quatre ans, afin d'alimenter un parc de près de 40 000 voitures électriques à hydrogène. Pour sa part, Air Liquide installera et opérera une vingtaine de stations d'ici 2021 qui s'ajouteront aux six déjà en service à Nagoya, Toyota, Saga, Fukuoka, Kobé et Kawasaki. Les stations de Nagoya et Toyota, dans la préfecture d'Aichi, ont été développées par une coentreprise entre Air Liquide et Toyota Tsusho.

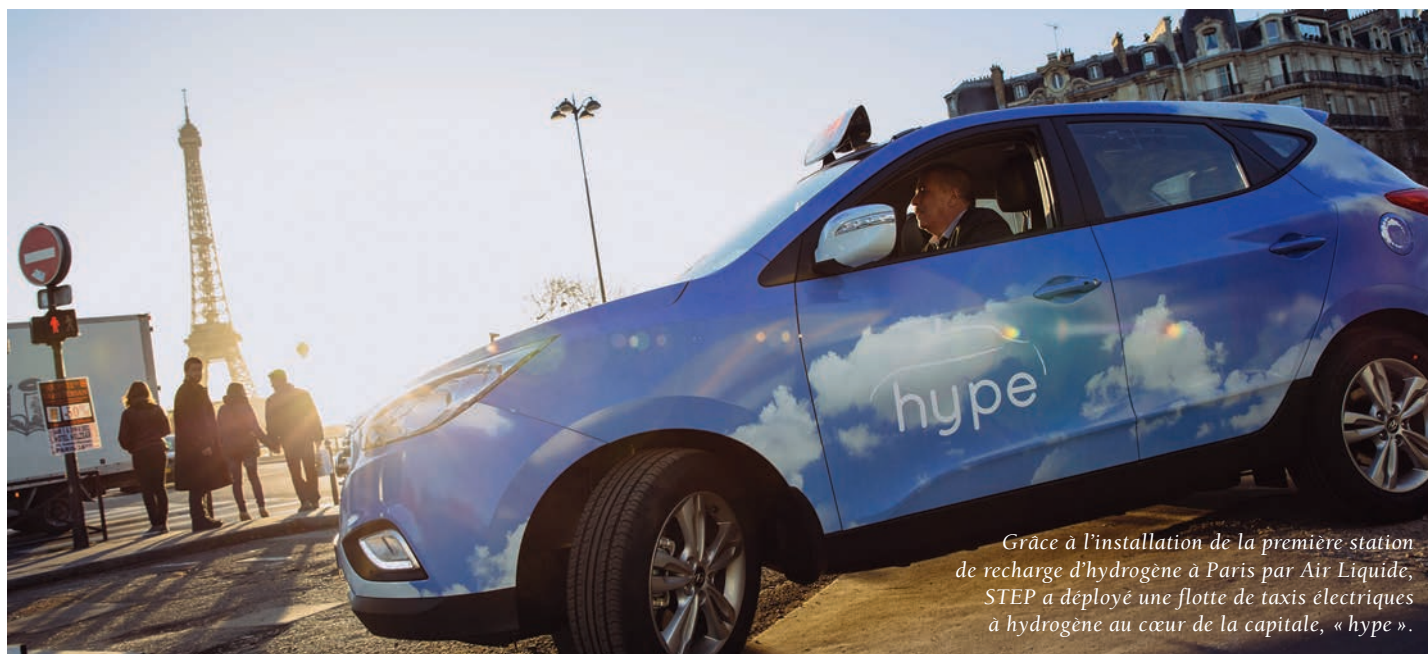
AUX ÉMIRATS ARABES UNIS, Air Liquide a inauguré à Dubaï, en octobre 2017, en partenariat avec Al-Futtaim Motors, distributeur exclusif de Toyota dans le pays, la première station hydrogène des Émirats arabes unis. La station a fait appel à des technologies de pointe pour s'adapter aux conditions climatiques de la région. Cette initiative s'inscrit pleinement dans le cadre de la Vision 2021 des Émirats arabes unis visant à réduire les émissions de CO₂ et à promouvoir une mobilité plus propre et durable dans les Émirats.

EN ALLEMAGNE, Air Liquide a déjà installé douze stations hydrogène dans le cadre de différents partenariats dont celui de la coentreprise H2 Mobility Deutschland, composée de Air Liquide, Daimler, Linde, OMV, Shell, Total. Ces entreprises se sont réunies pour étendre le réseau de stations hydrogène existants – comprenant à ce jour 43 stations en service – et de le porter à 400, avec le soutien du gouvernement allemand. Le Groupe Air Liquide contribue ainsi à la construction du plus grand réseau européen de distribution d'hydrogène.

EN EUROPE DU NORD, Air Liquide a inauguré en septembre 2014 sa première station à Rotterdam, aux Pays-Bas. Cinq autres stations hydrogène ont également été installées au Danemark et opérées par la filiale Air Liquide Copenhagen Hydrogen Network (CHN). Ces cinq stations – trois à Copenhague, une à Aalborg et une à Vejle – sont venues s'ajouter aux deux stations déjà en service, situées l'une à Copenhague et l'autre à Holstebro.

EN FRANCE, Air Liquide a mis en service, en janvier 2015, une station hydrogène à Saint-Lô, pour le Conseil général de la Manche. En France, c'est la cinquième station hydrogène installée par Air Liquide pour servir des applications voiture et bus. En Isère, Air Liquide opère une station à Grenoble, installée

sur le site de GEG pour ravitailler les flottes d'entreprises. Elle fait partie du projet Hyway, cofinancé par la région Auvergne-Rhône-Alpes, l'ADEME, l'Union européenne, dans le cadre du programme FEDER (Fonds européens de développement régional), et soutenu par la DREAL. Il rassemble les principaux acteurs de la filière H2, tous implantés en Auvergne-Rhône-Alpes et coordonnés par Tenerdis : Air Liquide, CEA, CNR, GEG, GNVERT, McPhy Energy, PUS (Cofely Services), Symbio. Il vise à tester et valider avec des flottes captives la pertinence technico-économique de « kit hydrogène » prolongeant l'autonomie des véhicules électriques hybrides. Par ailleurs, à l'occasion de la COP21 de décembre 2015, Air Liquide a inauguré la première station hydrogène au cœur de Paris, au pont de l'Alma, en partenariat avec la start-up STEP (Société du taxi électrique parisien dont Air Liquide est actionnaire minoritaire), et a soutenu cette start-up dans le lancement de sa flotte de taxis hydrogène « hype », première flotte de taxis hydrogène au monde. Aujourd'hui cette flotte compte 100 véhicules hydrogène (Hyundai ix35 et Toyota Mirai) qui peuvent également se recharger aux nouvelles stations hydrogène, installées par Air Liquide à l'aéroport Paris-Orly et aux Loges-en-Josas, près de Versailles. La STEP prévoit le déploiement de 600 taxis d'ici la fin 2020.



Grâce à l'installation de la première station de recharge d'hydrogène à Paris par Air Liquide, STEP a déployé une flotte de taxis électriques à hydrogène au cœur de la capitale, « hype ».



L'HYDROGÈNE FAIT RÉSEAU

PORTÉE PAR LE GROUPE AIR LIQUIDE, L'INITIATIVE CH₂ANGE CRÉE SUR FACEBOOK, TWITTER, MEDIUM ET YOUTUBE UN LIEU DE DÉBAT UNIQUE AUTOUR DU RÔLE DE L'HYDROGÈNE DANS LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE. SCIENTIFIQUES, SPÉCIALISTES ET CURIEUX Y ÉCHANGENT AUTOUR DE VIDÉOS, D'ARTICLES DE FOND ET D'INTERVIEWS D'EXPERTS.

*([HTTPS://FR-FR.FACEBOOK.COM/CH2ANGE/](https://fr-fr.facebook.com/ch2ange/))

Dans un monde où le changement climatique exige de repenser la façon dont nous vivons, nous déplaçons et produisons de l'énergie, il est indispensable d'entretenir un débat documenté et constructif afin de saisir l'urgence de la situation et de trouver des solutions. L'hydrogène étant l'une des clés qui nous permettra de façonner la mobilité du futur, il est crucial de la placer au centre des discussions.



MARY DOLORES NICHOLS

Présidente du California Air Resources Board (CARB).

« La première étape est de changer les habitudes et les opinions, et c'est sans aucun doute en train d'arriver. »



PROFESSEUR KATSUHIKO HIROSE

Ingénieur et chercheur spécialiste de l'hydrogène et des piles à combustible pour Toyota Motor Corporation.

« Le chemin qui est devant nous est celui de l'évolution des deux technologies, une coexistence remplissant des segments différents. [...] Le consommateur choisit le véhicule et la technologie qui s'accordent à ses besoins, au prix et aussi à la performance qu'il en attend. Comme fabricant, nous devons offrir le choix au consommateur et nous voyons le véhicule à batterie et celui à pile à combustible comme les futures options. »

« Si l'on ne commence pas à prendre au sérieux la conversion à grande échelle à l'hydrogène, je ne vois pas comment nous pourrions tenir les objectifs du changement climatique. Les gouvernements doivent être réalistes : la disponibilité de l'hydrogène, pour le chauffage, le transport et l'électricité va avoir un rôle crucial. »

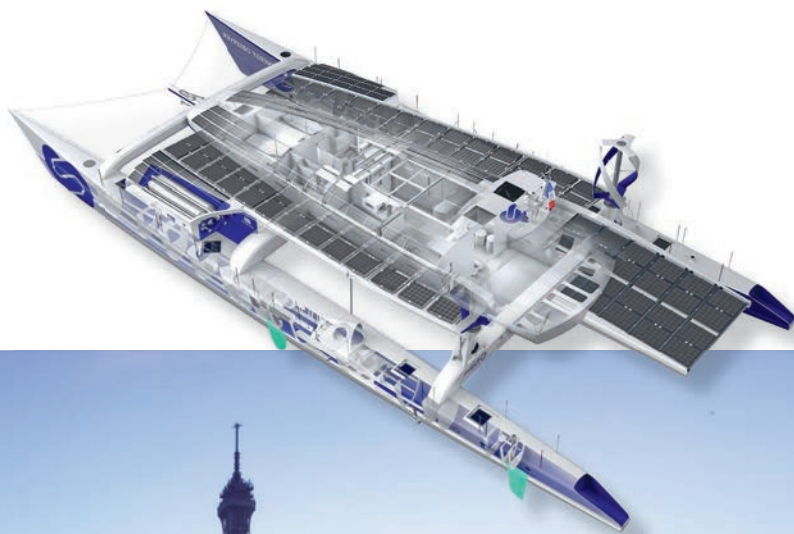


DAN SADLER

Directeur du programme H 21
Leeds City Gate.

PANORAMA DU MARCHÉ DE LA MOBILITÉ HYDROGÈNE

DE LA MER AUX ÉTOILES,
LES VÉHICULES À HYDROGÈNE
S'INSTALLENT DANS NOTRE QUOTIDIEN.



ENERGY OBSERVER

Premier navire-hydrogène visant l'autonomie énergétique, sans émission de gaz à effet de serre ni particules fines.

En partenariat avec Air Liquide, cet ancien bateau de course au large a été reconditionné en navire du futur à propulsion électrique, fonctionnant grâce à un mix d'énergies renouvelables et un système de production d'hydrogène décarboné à partir de l'eau de mer.

Air Liquide soutient ce projet scientifique et technologique qui témoigne du rôle de l'hydrogène dans la transition énergétique. Le soutien financier à ce projet illustre également la volonté du groupe de contribuer à un monde plus durable.





NAVIBUS (AVRIL 2018)

Mise en service du Jules Verne 2, navette fluviale sur l'Erdre à Nantes, reliant les facultés situées sur les deux rives de la rivière. Elle embarque 12 passagers et 6 vélos. Air Liquide fournit l'hydrogène pour le Navibus.

ARIANE 5

L'étage principal de la fusée Ariane 5 est propulsée par un moteur cryogénique. Il fonctionne pendant environ dix minutes avec 220 tonnes d'ergols liquides (hydrogène et oxygène). Air Liquide soutient depuis cinquante ans les évolutions successives de lanceurs d'Ariane 1 à Ariane 5 et a été dès les débuts intégré au programme européen Ariane pour son expertise de pointe en maîtrise des gaz et expert et leader mondial de la cryogénie spatiale.





1. BYD EBUS ARTICULÉ (2015)

Avec des centaines de bus à hydrogène circulant dans le monde, le constructeur chinois BYD s'affirme comme le leader du marché. Ici, un bus articulé de 18m de long.



3. ALPHA

Propulsé par une pile à hydrogène, ce vélo électrique, inventé par le Français Pierre Forté et produit par Pragma Industries, a une autonomie de 100 km et se recharge en moins d'une minute !

5. NIKOLA MOTORS (2016)

Le constructeur américain annonce la sortie de deux modèles à pile à combustible – Nicola One et Two – pour 2021. 1 000 CV, 0 à 100 km/h en 30 secondes et 1 300 à 1 900 km d'autonomie. Début 2018, il déclare avoir enregistré plus de 8 000 commandes.



4. CORADIA ILINT, ALSTOM (2017)

Ce train peut parcourir jusqu'à 1 000 kilomètres avec un plein et atteindre les 140 km/h. Alstom va fabriquer 14 exemplaires de ce train à pile à combustible pour l'Autorité locale des transports de Basse-Saxe, pour remplacer les trains automoteurs diesels. Ils transporteront les voyageurs entre Cuxhaven, Bremerhaven, Bremervörde et Buxtehude à partir de décembre 2021.



2.HY4 (2016)

Avec un moteur de 80 KW, le HY4 permet à quatre personnes d'effectuer des vols sur un rayon compris entre 750 et 1 500 km à une vitesse de croisière de 145 km/h.





6

6. TOYOTA MIRAI (2014)

113 kW/154 ch. A passé le cap des 3 000 exemplaires vendus en Californie en janvier 2018. 650 km d'autonomie.



7

7. HYUNDAI NEXO (2018)

Ce SUV succède au ix35 Fuel Cell (dans les pays où il est importé) ; 163 ch ; 179 km/h ; autonomie de 800 km ; 0 à 100 km/h en 9,5 s.

8. HONDA FCX CLARITY FUEL CELL 2^E GÉNÉRATION (2017)

130 kW/ 177 ch. ; 165 km/h ; 500 km d'autonomie.



8



9

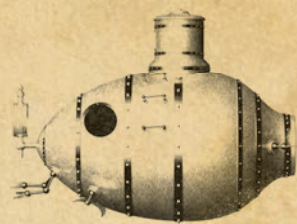


9. GREEN GT H2 (2012)

Premier prototype de compétition électrique-hydrogène. Doté d'une chaîne de propulsion de 400 kW/540 ch. Cette voiture a fait l'ouverture des 24 Heures du Mans en 2016, l'ancien pilote de F1 Olivier Panis était à son volant.



TROIS QUESTIONS À JULES VERNE



« L'EAU EST UN DON DE LA TERRE ET UN BIEN COMMUN DE L'HUMANITÉ
QU'IL FAUT SAVOIR EMPRUNTER ET RENDRE »

PROSPECTIVISTE SCIENTIFIQUE DE NOTORIÉTÉ INTERNATIONALE,
JULES VERNE, POUR QUI « L'EAU EST LE CHARBON DE L'AVENIR », PRÉCISE POUR NOUS
SA VISION DU DÉVELOPPEMENT DE LA FILIÈRE HYDROGÈNE.

**ON CONNAÎT VOTRE PENCHANT
À INVENTER DE NOUVEAUX MODES
DE PROPULSION : QUEL EST LE CARBURANT
DE L'AVENIR ?**

JULES VERNE : Je le dis depuis longtemps, je crois que l'eau sera un jour massivement employée comme combustible, que l'hydrogène et l'oxygène, qui la constituent, utilisés isolément ou simultanément, fourniront une source de chaleur et de lumière inépuisables et d'une intensité que la houille ne saurait avoir.

**QUELS AUTRES AVANTAGES VOYEZ-VOUS
À LA PILE À COMBUSTIBLE QUE VOUS
UTILISEZ PERSONNELLEMENT DEPUIS PRÈS
D'UN DEMI-SIÈCLE ?**

J.V. : En fait, à Nantes, j'ai mis au point une petite station énergétique familiale : j'ai mis des panneaux solaires sur le toit de la maison et une éolienne dans le jardin, face à la Loire. L'électricité produite par ces deux appareils me sert à faire l'électrolyse de l'eau (je fais le plein au robinet, voire je récupère l'eau de pluie). Je stocke sous pression l'hydrogène et l'oxygène produits dans des bonbonnes. Je recombine les deux gaz à façon, pour chauffer la maison, assurer la production d'eau chaude, faire fonctionner la gazinière, le réfrigérateur, et je me sers de l'hydrogène seul pour

la pile à combustible qui équipe ma voiture. Au passage, je récupère même l'eau produite par la voiture dans un deuxième réservoir. L'eau, je ne fais que l'emprunter, je la détourne momentanément. Je teste parallèlement un élevage d'algues pour faire de l'hydrogène sans électrolyse.

**IMAGINEZ-VOUS UNE
GÉNÉRALISATION DE VOS
INVENTIONS ET COMMENT ?**

J.V. : Il y a quelques jours, le Secrétaire général de l'ONU m'a confié avoir inscrit au prochain ordre du jour de l'assemblée générale, par mesure de salubrité terrienne, la mise au vote de la suppression en cinq ans de tout recours aux énergies fossiles et l'inscription de mes procédés dans les outils de développement durable. Je vais peut-être avoir un soutien pour mes recherches



sur les algues et les bactéries ! En vérité, je vous le dis, remettre l'eau au centre de notre vie et de notre économie, c'est reprendre sa place dans l'écosystème. L'eau est un don de la Terre et un bien commun de l'humanité qu'il faut savoir emprunter et rendre !

ENTRETIEN IMAGINAIRE
INSPIRÉ DE
« L'ÎLE MYSTÉRIEUSE »



Unité Cryocap™ H₂ sur le site Air Liquide de Port-Jérôme, en Seine-Maritime. Elle permet le captage par le froid (cryogénie) du CO₂ émis lors de la production d'hydrogène. Une première mondiale.

VERS UNE SOURCE INÉPUISABLE ET PROPRE

FACE AU DÉFI CLIMATIQUE, L'UTILISATION CROISSANTE D'HYDROGÈNE FAIT SENS SI CE GAZ EST PRODUIT DE FAÇON DÉCARBONNÉE.

À CE JOUR, IL Y A TROIS FILIÈRES INDUSTRIELLES : LE REFORMAGE DE BIOGAZ, LE PROCÉDÉ CRYOCAP H₂, QUI DÉCARBONE LA PRODUCTION À PARTIR DE GAZ NATUREL, ET L'ÉLECTROLYSE DE L'EAU, QUI OFFRE L'AVANTAGE D'UTILISER LE SURPLUS D'ÉNERGIE PRODUITE PAR LES ENR.

Aujourd'hui, le développement de la mobilité à l'hydrogène réclame une quantité croissante d'hydrogène qu'il faut savoir extraire proprement des molécules qui le contiennent, comme les composés organiques (gaz naturel, biomasse) ou l'eau. 90 % de la production mondiale actuelle d'hydrogène se fait à partir de composés organiques avec néanmoins la possibilité de maîtriser les émissions de dioxyde de carbone (CO₂) qui lui sont liées. Grâce à la technologie Cryocap H₂ mise au point par Air Liquide, il est possible de capter et valoriser le CO₂ émis lors de la production d'hydrogène à partir de gaz naturel (technologie dite CCUS – Carbon capture utilization and storage, lire p. 4)

UNE SOLUTION QUI COULE DE SOURCE

Une seconde filière de production d'hydrogène commence à se développer : celle par décomposition de l'eau.

L'électrolyse de l'eau est une solution simple, propre et durable. L'eau couvre plus de 70 % de la surface terrestre. L'extraction de l'hydrogène de l'eau par électrolyse consomme de l'énergie électrique qui a longtemps pesé sur sa rentabilité, mais le développement des énergies renouvelables solaires et éoliennes modifie la donne. D'une part, le prix de leur énergie devient concurrentiel et, d'autre part, leur production à des moments où la demande est faible offre de grandes quantités d'électricité non utilisées. L'électrolyse de l'eau est alors un moyen commode d'utiliser cette électricité pour stocker de l'énergie sous forme d'hydrogène. L'hydrogène rend ainsi les EnR disponibles à la demande. Dans le cas d'un usage pour la mobilité, utiliser de l'énergie renouvelable pour électrolyser de l'eau, et ensuite, via une pile à combustible, la

synthétiser en produisant de l'électricité instaure un cercle énergétique vertueux.

VEILLE TECHNOLOGIQUE

L'aube d'une ère énergétique nouvelle se caractérise par l'effervescence de la recherche développement. Outre ses propres laboratoires de recherche, Air Liquide soutient des entreprises innovantes dans le domaine de l'hydrogène. ALIAD, filiale capital-risque d'Air Liquide, a notamment pris des participations minoritaires dans trois entreprises : McPhy Energy, Plug Power et Ergosup.

Pour en savoir plus :

<https://www.airliquide.com/fr/groupe/aliad-venture-capital>

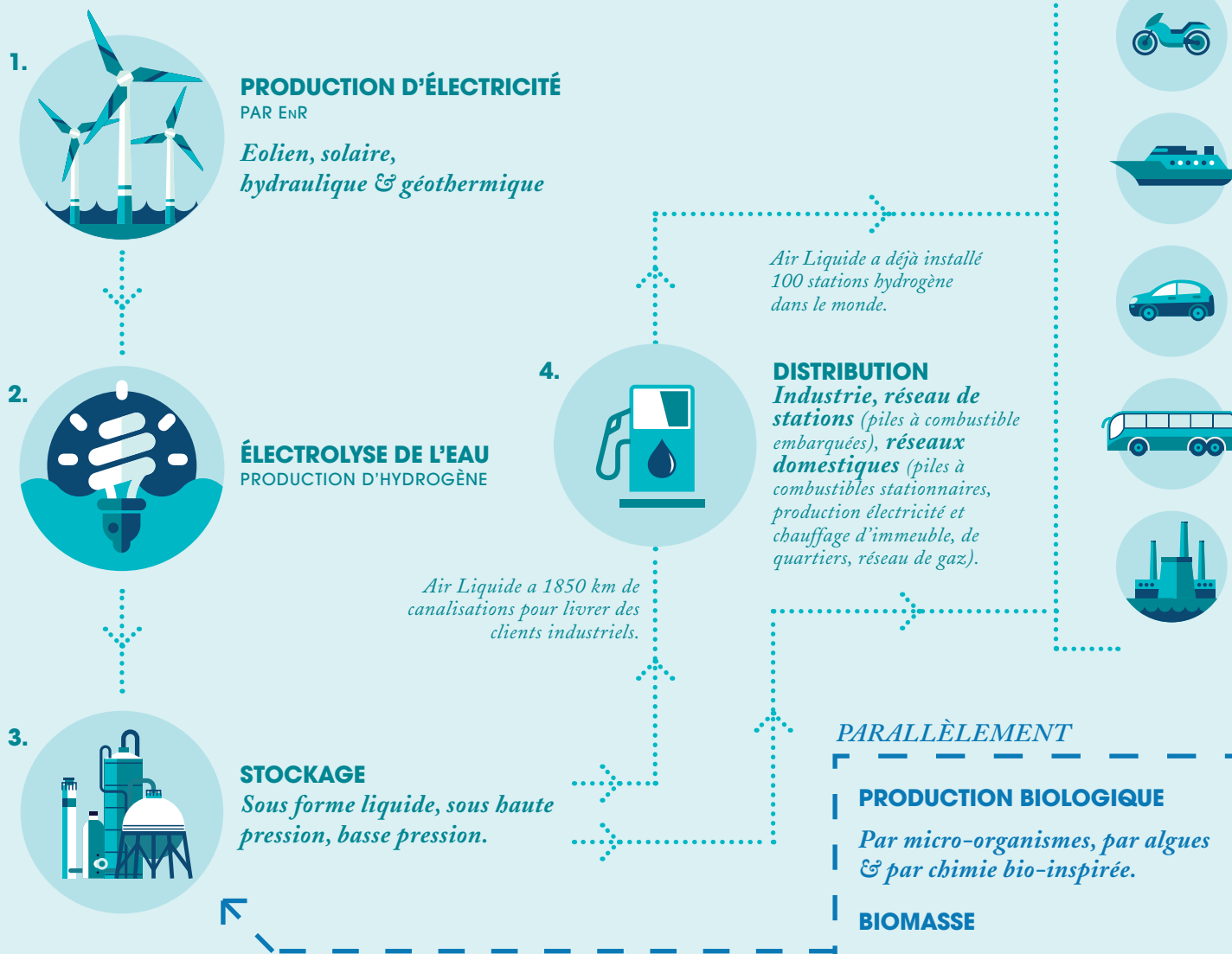
HYDROGÈNE CLIMATO-COMPATIBLE

Blue Hydrogen® est une démarche d'Air Liquide qui vise à décarboner progressivement sa production d'hydrogène dédiée aux applications énergétiques. Concrètement, Air Liquide s'engage d'ici 2020 à ce qu'au moins 50 % de l'hydrogène nécessaire à ces applications soit bas-carbone en combinant :

- l'utilisation des énergies bas-carbone, l'électrolyse de l'eau et le reformage de biogaz ;
- l'usage des technologies de captage et de valorisation du CO₂ émis lors de la production

d'hydrogène à partir de gaz naturel

L'hydrogène est une énergie vertueuse, même quand il est produit à partir de gaz naturel. En effet, à distance parcourue égale, les voitures électriques à hydrogène permettent de diminuer de 20 % les émissions de gaz à effet de serre par rapport aux véhicules à combustion et n'émettent aucune particule fine.

**DE LA PRODUCTION À L'USAGE**



CHANGER D'ÉCHELLE

L'HYDROGÈNE NOUS DÉPOSE AU SEUIL D'UNE NOUVELLE ÉCONOMIE QUI RESTE À CONSTRUIRE. LES PLANS ET MATÉRIAUX SONT PRÊTS, IL MANQUE ENCORE DANS DE NOMBREUX PAYS LA VISION STRATÉGIQUE, POLITIQUE, POUR ÉCLAIRER LE CHANTIER.

Produire de l'hydrogène avec des EnR, de la chaleur, s'engager vers une mobilité propre, décarboner nombre d'activités supposent de développer chaque maillon des différentes chaînes de production, de construire de nouvelles complémentarités, de former aux métiers de l'hydrogène de demain. Production d'hydrogène, fabrication d'électrolyseurs, d'électrolytes, de piles à combustible, de réseaux de stations autonomes, de chaînes de propulsion pour des automobiles, navires, trains, bus, drones, scooters et vélos, construction de turbines, de chaudières de toutes tailles... L'effort est à la fois grand, raisonnable et prometteur. Grand par le spectre des métiers, raisonnable car toutes les solutions sont sur la table, prometteur par l'avenir qu'il dessine pour nos enfants et les générations futures. Exaltant, n'est-ce pas ? Alors qu'est-ce qui a bloqué jusqu'ici ?

C'est l'alignement de tous les acteurs, qu'ils soient industriels, politiques.

On s'est longtemps attardé sur les marches de l'expérimentation alors qu'un pays comme la Corée du Sud grimpe l'escalier à vive allure en visant 10 000 voitures à hydrogène en 2020, que le Japon a déjà franchi une centaine de stations à hydrogène et chauffe déjà quelque 200 000 logements avec des piles à combustible, et que la Californie veut interdire tous les moteurs thermiques

fossiles en 2040. L'annonce, le 1^{er} juin dernier, d'un plan national pour l'hydrogène en France par le ministre de la Transition écologique et solidaire, Nicolas Hulot, pourrait marquer la fin de la frilosité du vieux monde carboné.

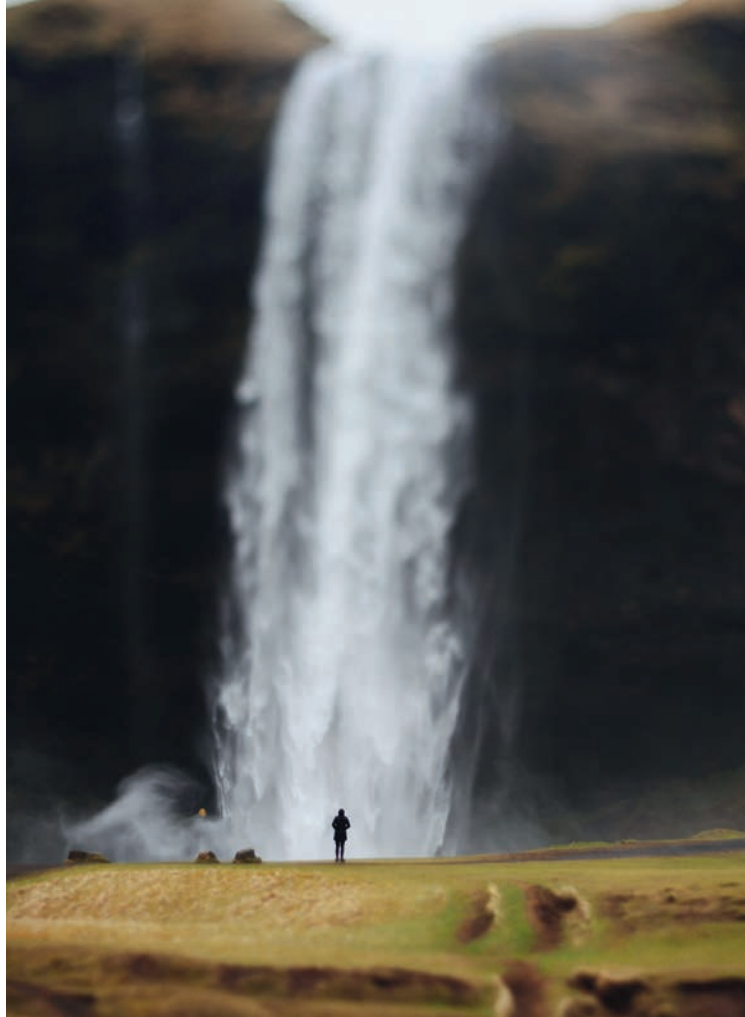
VIRER DE BORD

Le virage est aisément négociable. Depuis les années 1980, la fusée Ariane et ses concurrentes mettent des centaines de satellites en orbite grâce à des moteurs

*LA DIFFICULTÉ EST AUSSI
D'ALIGNER LES INDUSTRIELS
ET LES POLITIQUES.*

à hydrogène, la NASA a confié la vie de ses cosmonautes aux soins de piles à combustible, les voitures hydrogène roulent depuis plus de vingt ans. Les écueils techniques majeurs ont tous été franchis depuis des décennies. Demeure le barrage du prix, qui ne baissera que par la production de masse dans chaque segment de la filière hydrogène. Pour industrialiser, il faut un signal fort du marché ou du politique. Le tournant décisif peut prendre la forme de l'annonce programmée de la fin du moteur thermique, de l'accompagnement financier des réseaux de distribution d'hydrogène, de mesures abaissant le coût des premières séries (détaxation des véhicules, prime à l'achat, prime à la reprise des vieux véhicules ...) ou de toute décision balisant un avenir sociétal à l'hydrogène.

A l'horizon 2030, le Conseil de l'hydrogène prévoit qu'une voiture sur douze sera alimentée à l'hydrogène, en Allemagne, en Californie, en Corée du Sud, au Japon. Au niveau mondial, ce sont 250 à 300 TWh d'énergie solaire ou éolienne non utilisée qui pourraient être convertis en hydrogène, tandis que l'industrie pourrait remplacer 10 à 15 millions de tonnes de matières premières chimiques par de l'hydrogène. Enfin, toujours en 2030, plus de



LES ÉCUEILS TECHNIQUES MAJEURS ONT TOUS ÉTÉ FRANCHIS DEPUIS DES DÉCENNIES.

SORTIR DU CERCLE DE L'IMMOBILITÉ

Les facteurs limitant l'essor de la voiture à hydrogène sont, aujourd'hui, la durée de vie de la pile à combustible – PAC – (environ 150 000 km), le prix du véhicule et le réseau de distribution d'hydrogène. Les laboratoires de recherche sont déjà sur les pistes d'amélioration des PAC. Le prix encore élevé d'une automobile (à partir de 66 000 euros) est actuellement contourné par la location et diminuera mécaniquement avec la production de masse, mais pourquoi acheter une voiture si on ne peut pas faire le plein de carburant ?... Le soutien politique et financier est indispensable pour développer le réseau de distribution d'hydrogène. Air Liquide mène une offensive volontariste en faisant sa part sur son secteur dans la filière hydrogène. L'entreprise innove dans les stations à hydrogène en suivant la diffusion à la commercialisation des automobiles. À ce jour, Air Liquide a déjà conçu et installé une centaine de stations hydrogène dans le monde dont une quarantaine sont directement investies et opérées par le Groupe Air Liquide. Face à l'urgence climatique, l'abandon des énergies fossiles passe par le développement de réseaux de distribution qui à ce titre deviennent aussi affaire de bien commun.

50 millions de foyers pourraient être connectés à un réseau combinant gaz et hydrogène.

Pour réaliser ces ambitions, il faut investir 20 à 25 milliards de dollars par an. Ces chiffres sont à mettre en perspective avec les 1 700 milliards de dollars dépensés dans l'énergie au niveau mondial chaque année. Les entreprises de la filière sont en capacité de relever le défi mais de tels investissements ne peuvent se faire qu'en étroite coordination avec les pouvoirs publics et dans le cadre de politiques publiques adaptées.

Chez les différents acteurs de l'hydrogène, tous les équipages et leur capitaine sont parés à mettre le cap sur l'avenir.

L'HYDROGÈNE EN LIGNE

AVEC LE SOUTIEN EUROPÉEN ET SOUS
LA COORDINATION D'AIR LIQUIDE,
LE DANEMARK OUVRE LA VOIE
DES MIX ÉNERGÉTIQUES
100 % RENOUVELABLES, OÙ L'HYDROGÈNE
APPORTE LA STABILITÉ DU RÉSEAU.



Voilà une première européenne qui mérite que l'on s'attarde sur sa réussite. HyBalance – acronyme d'Hydrogen Balance/équilibre à l'hydrogène – est un dispositif industriel démontrant le bien-fondé du rôle de l'hydrogène dans la transition énergétique. HyBalance couvre l'intégralité de la chaîne de valeur, de la production d'hydrogène à partir d'énergies renouvelables à l'utilisateur final, en passant par le stockage d'énergie et sa restitution pour équilibrer le réseau électrique. Le choix européen d'implanter au Danemark ce démonstrateur d'avenir récompense l'engagement de ce pays dans la transition énergétique. En 2012, celui-ci décidait d'éliminer toute utilisation d'énergie fossile dans le chauffage et l'électricité d'ici 2035. Et à l'horizon 2050, toute énergie fossile sera substituée par un mix d'énergies renouvelables.

HYDROGÈNE VERT

L'installation, inaugurée en 2018, se situe dans la région d'Hobro, au nord de la péninsule du Jutland. Les éoliennes de la région alimentent une unité de

production d'hydrogène par électrolyse de l'eau. C'est ce que l'on appelle le *power to gas*. Cet hydrogène vert est stocké sous pression et utilisé pour équilibrer le réseau électrique, fournir les industriels et ravitailler cinq stations de recharge d'hydrogène existantes, exploitées par le Groupe Air Liquide via sa filiale Copenhagen Hydrogen Network (CHN). Ces stations servent déjà la circulation de plus 60 véhicules électriques à hydrogène et bientôt celle de trois bus d'Aalborg.

HyBalance intègre de nouvelles technologies clés en matière de production d'hydrogène, notamment un électrolyseur PEM (Membrane échangeuse de protons) de 1,2 MW fourni par la société Hydrogenics et

une chaîne d'approvisionnement en hydrogène à haute pression pour les stations de recharge. HyBalance est soutenu financièrement à hauteur de 8 millions d'euros par le Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking (FCH JU), partenariat public-privé européen sur l'hydrogène et le stockage d'énergie, et par le programme danois EUDP (Energy Technology Development and Demonstration Program).

L'objectif de mix énergétiques 100 % renouvelables met en évidence la généralisation de l'hydrogène dans le stockage de l'énergie propre, son rôle dans la stabilité des réseaux et son potentiel de libération des transports de leur addiction aux énergies fossiles.

**HYBALANCE INTÈGRE DE NOUVELLES
TECHNOLOGIES CLÉS
EN MATIÈRE DE PRODUCTION.**

Hydrogen Council

L'ÉCOSYSTÈME HYDROGÈNE

PASSÉ, EN UN AN, DE TREIZE MEMBRES À PLUS DE CINQUANTE, LE CONSEIL DE L'HYDROGÈNE (HYDROGEN COUNCIL) MONTRE LA VOLONTÉ DES ACTEURS PRINCIPAUX DU SECTEUR DE PRENDRE LEUR PART DANS LA RÉALISATION DES ENGAGEMENTS PRIS À LA COP 21. DIRECTEMENT OPÉRATIONNEL, IL FAIT ÉMERGER L'HYDROGÈNE PARMIS LES SOLUTIONS CLÉS POUR LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE DANS LES SECTEURS DE LA MOBILITÉ, DE L'ÉNERGIE, INDUSTRIEL ET RÉSIDENTIEL.

L'économie hydrogène repose sur un assemblage de compétences industrielles qui recouvre une diversité d'acteurs dont aucun ne peut piloter l'ensemble, contrairement à l'électricité, où un seul acteur peut produire, construire, distribuer, comme ce fut le cas avec EDF et comme le fait aujourd'hui Elon Musk, du toit solaire à la voiture électrique à batteries. Fort de ce constat d'une indispensable complémentarité des métiers et entreprises, les dirigeants des grandes entreprises leaders dans les différents segments de la filière se sont entendus pour fonder l'Hydrogen Council.

ACCÉLÉRER LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE

L'Hydrogen Council (<http://hydrogencouncil.com/>) est la *task force* de l'économie hydrogène, lancée au Forum économique mondial de Davos (Suisse), en 2017, avec 13 PDG des plus grandes entreprises du secteur (Air Liquide, Alstom, Anglo American,

BMW Group, Daimler, ENGIE, Honda, Hyundai Motor, Kawasaki, Royal Dutch Shell, The Linde Group, Total, Toyota) et dirigé par deux coprésidents issus de deux régions et secteurs différents. En un an, il a triplé le nombre de ses membres et développe une vision commune dans les grands rendez-vous internationaux (Forum économique mondial, Cop23...), auprès des gouvernements et de la société civile. Cette coalition de multinationales représente un chiffre d'affaires global de plus de 1 600 milliards d'euros et plus de 2,5 millions d'emplois dans le monde (2017). Être composé de dirigeants permet à l'Hydrogen Council de définir des stratégies et de prendre les décisions opérationnelles qui en découlent. Ils œuvrent à l'harmonisation des normes de l'industrie entre les régions et les secteurs, apportent leur expertise sur la faisabilité de solutions de décarbonation et réclament aux politiques des cadres stratégiques à long terme pour guider la transition énergétique, pour coordonner et encourager

les investissements. Comme le souligne Benoît Potier, coprésident du Conseil de l'Hydrogène et président directeur général d'Air Liquide : « Nous avons besoin que les gouvernements soutiennent l'hydrogène par des actions qui leur sont propres – par exemple par le biais de vastes projets d'investissement dans les infrastructures. »

GOUVERNANCE GLOBALE

A ce jour, le Conseil de l'hydrogène a publié deux études – *How hydrogen empowers the energy transition* et *Hydrogen, scaling up* – qui présentent la première vision globale du potentiel de l'hydrogène dans la transition énergétique, ainsi que les actions qu'il estime nécessaires de la part des décideurs pour mettre en œuvre et rendre possible l'émergence d'un véritable écosystème pour cette petite molécule essentielle qu'est celle de l'hydrogène. Dynamique indispensable pour accompagner la rupture technologique introduite par l'hydrogène dans la transition énergétique, pour faciliter les effets d'échelle et la réduction des coûts.

Dans un de ses récents rapports, l'Agence internationale de l'énergie (AIE) rappelle que la trajectoire des émissions actuelles des gaz à effet de serre amène à un réchauffement global de +6 °C à 2100. Pour rester dans l'épure des +2 °C annoncée à la COP21, l'AEI préconise d'équiper 25 % du parc automobile mondial en piles à combustible à l'horizon 2050. Cette ambition et cette urgence justifient de résoudre les freins économiques au développement de l'hydrogène à l'échelle de la planète et d'en faire une réalité quotidienne.

FLOTTES CAPTIVES

En France, le déploiement de la mobilité hydrogène passe par les flottes captives (d'autos, de bus, de vélos). Le consortium Mobilité Hydrogène France regroupe l'ensemble des acteurs privés et publics de la filière, des entreprises de l'énergie aux utilisateurs. Le Conseil départemental de la Manche s'est fixé comme objectifs de s'équiper d'une flotte de 40 véhicules, 5 bus, 1 bateau de pêche à hydrogène et de 3 stations-service pour les avitailler. Le programme Zero Emission Valley, porté par la région Auvergne-Rhône-Alpes, soutient la création d'un réseau de vingt stations hydrogène dédiées aux flottes captives, dont une quinzaine produiront sur place, par électrolyse, leur hydrogène. Au total, il s'agit de faire circuler 1 000 véhicules à hydrogène sur le territoire régional.

DES PARTENARIATS INTERNATIONAUX

EN PLUS DE CINQUANTE ANS, AIR LIQUIDE A DÉVELOPPÉ UN SAVOIR-FAIRE UNIQUE DANS LA MAÎTRISE DE L'ENSEMBLE DE LA CHAÎNE DE L'HYDROGÈNE (PRODUCTION, STOCKAGE, DISTRIBUTION). LE GROUPE POURSUIT ACTIVEMENT UNE DOUBLE STRATÉGIE : LE DÉVELOPPEMENT DE LA RECHERCHE ET DE L'INNOVATION DANS LE DOMAINE DE L'HYDROGÈNE AFIN D'AMÉLIORER LES TECHNOLOGIES EXISTANTES ET D'EN DÉVELOPPER DE PLUS PERFORMANTES, ET LA PARTICIPATION À DE GRANDS PROJETS DE DÉMONSTRATION INTERNATIONAUX. PARMI LESQUELS :



Japan Hydrogen Mobility est une Joint Venture créé en 2018 par Air Liquide Japan et dix-sept sociétés japonaises issues de différentes industries et de la finance pour accélérer le déploiement des stations et voiture hydrogène dans le pays, avec le soutien du gouvernement japonais. L'objectif est de mettre en place un réseau de 320 stations d'ici 2025 et 900 d'ici 2030.



Air Liquide fait partie de Hydrogen Europe – association qui représente plus de 100 entreprises impliquées dans le secteur de l'hydrogène. Hydrogen Europe s'associe à la Commission européenne et à la communauté des chercheurs pour accélérer l'introduction sur le marché de ces technologies propres dans les secteurs de l'énergie et des transports.



La Fuel Cell and Hydrogen Energy Association se concentre sur la défense, l'éducation et la promotion des avantages environnementaux et économiques des technologies des piles à combustible et de l'hydrogène.



Le Fuel Cells & Hydrogen Joint Undertaking (FCH JU) est un partenariat public/privé, conjointement dirigée par la Commission européenne et les entreprises industrielles européennes actives dans ce secteur. Le FCH JU cofinance des projets de recherche et de démonstration majeurs en Europe pour améliorer et promouvoir les technologies de la pile à hydrogène et du chargement en hydrogène.



Air Liquide est partenaire fondateur de la Joint Venture «H2 Mobility Deutschland» créé en 2015 avec Daimler, Linde, OMV, Shell et Total, pour poursuivre le déploiement de l'infrastructure des stations hydrogène commencé via le Clean Energy Partnership. H2 Mobility s'est donné pour objectif d'étendre le réseau de stations à 400, avec le soutien du gouvernement allemand.



Air Liquide est membre de l'Association Française pour l'Hydrogène et les Piles à Combustible.



Air Liquide soutient l'Alliance Mondiale pour les Solutions Efficientes créée à l'initiative de la Fondation Solar Impulse et de son président Bertrand Piccard en 2016. Air Liquide met à disposition de l'Alliance un collège d'experts pour évaluer des solutions concrètes en matière d'énergie, alliant efficacités économique, énergétique et écologique.



Le California Fuel Cell Partnership est une collaboration entre l'industrie et le gouvernement de l'état de Californie visant à élargir le marché des véhicules électriques à hydrogène afin d'aider à bâtir un avenir plus propre et plus diversifié sur le plan énergétique.



LE GRAND ENTRETIEN THOMAS PESQUET DANS L'ESPACE GRÂCE À DES MOTEURS À HYDROGÈNE

L'HYDROGÈNE EST LE PRINCIPAL CONSTITUANT DU SOLEIL, DE LA PLUPART DES ÉTOILES ET DE LA MATIÈRE INTERGALACTIQUE. LE SPATIONAUTE THOMAS PESQUET, QUI A PASSÉ 196 JOURS À BORD DE LA STATION SPATIALE INTERNATIONALE, DONNE SA VISION DE L'HYDROGÈNE.

Quand on parle hydrogène, à quoi pensez-vous ?

Thomas Pesquet : Je pense propulsion, car la plupart des véhicules spatiaux ont des moteurs à hydrogène, c'est ça qui nous amène dans l'espace.

Pensez-vous que les leçons de l'aventure spatiale peuvent servir sur Terre ?

Oui, c'est le cas pour beaucoup de choses, on a développé le solaire pour l'espace et on voit aujourd'hui les applications au sol ; idem pour l'hydrogène avec la propulsion spatiale et maintenant nous avons des voitures à pile à combustible. Pile utilisée dans la navette spatiale pour produire de l'électricité. Dans l'espace, nous sommes dans un milieu difficile. Il faut s'adapter, ça demande des efforts et de l'ingéniosité mais après, que ce soit la recherche scientifique pour la station spatiale ou les moyens technologiques qui nous

permettent d'aller dans l'espace, les résultats bénéficient en cascade à la société.

Les solutions hydrogène ont-elles prouvé leur fiabilité pour aller dans l'espace ?

Oui, bien sûr ! On n'a jamais eu d'accident lié à ça. Il y a beaucoup d'avantages. Pour nous, dans l'exploration spatiale, l'hydrogène est notre quotidien, mais il va falloir aller plus loin, trouver des solutions. On parle aujourd'hui de créer du carburant pour vaisseaux spatiaux, à partir des ressources *in situ*, c'est-à-dire de forer des astéroïdes pour avoir de l'hydrogène, c'est-à-dire de l'eau ; en séparer l'hydrogène et l'oxygène, pour faire du combustible spatial. On voit que l'approvisionnement est assuré sous réserve de savoir forer dans l'espace. C'est propre pour l'environnement, il ne s'agit pas d'aller polluer de nouveaux milieux que l'on n'a pas encore atteints.

On oublie toujours que l'hydrogène est un composant important de tout l'espace...

Oui, dans l'espace, on le trouve en quantité énorme autour de nous, même très loin de la Terre. En fait, l'hydrogène est en accès illimité. On le trouve enfoui, sous forme d'eau liquide ou de glace. Sur Mars, on sait qu'aux pôles on peut avoir de l'eau gelée enfouie, donc de l'énergie en abondance, du carburant et de l'oxygène pour permettre la vie.

Quand on a à l'esprit le potentiel de l'hydrogène, est-ce que ça change le regard que l'on pose sur le monde ?

C'est comme avec des lunettes infrarouges : on voit différemment, c'est un fil que l'on n'avait pas imaginé. Quand on regarde vers l'espace, il faut mettre les bonnes lunettes pour essayer de trouver ce qui nous permet de maintenir la vie.

AIR LIQUIDE

LES CHIFFRES CLÉS

AIR LIQUIDE ET L'HYDROGÈNE



**100 stations hydrogène
conçues et installées
dans le monde.**



**Une station hydrogène
recharge les véhicules
en moins de 5 minutes.**



**Une recharge d'hydrogène
permet à une voiture
de rouler plus de 600 km.**



**Zéro émission de CO₂.
Zéro particule.
Zéro pollution sonore.**



**Hydrogène produit par Air Liquide en
2017 pour les marchés du raffinage
et de la pétrochimie :
14 milliards de m³.
La production actuelle permettrait
d'alimenter près de 10 millions de
véhicules électriques à hydrogène.**



**Chiffre d'affaires hydrogène
pour les marchés
du raffinage
et de la pétrochimie en 2017 :
2 milliards d'euros.**

LE GROUPE AIR LIQUIDE



**Le leader mondial des gaz,
technologies et services
pour l'industrie et la santé.**



**Présent dans
80 pays.**



**Environ
65 000 collaborateurs.**



**Plus de 3,5 millions
de clients et de patients.**



**292 millions d'euros
de dépenses innovation,
dont près de 60 % sont liées
à l'amélioration de l'empreinte
environnementale,
de la qualité de l'air et
des soins de santé.**



**Environ 300 brevets
déposés chaque année.**



**Chiffre d'affaires 2017 :
20,3 milliards d'euros.
Résultat net 2017 :
2,2 milliards d'euros.**

**Pour tout renseignement complémentaire,
merci de contacter :**

COMMUNICATION CORPORATE

media@airliquide.com

Tél. : +33 (0) 1 40 62 50 84

COMMUNICATION ÉNERGIE HYDROGÈNE

Dominique Lecocq

Tél. : +33 (0) 4 76 43 64 97

E-mail : dominique.lecocq@airliquide.com



Suivez-nous sur Twitter

[@AirLiquideGroup](https://twitter.com/AirLiquideGroup)

[@cH2ange](https://twitter.com/cH2ange)

WWW.ENERGIES.AIRLIQUIDE.COM