

Rôle de l'hydrogène dans une économie décarbonée

Synthèse et recommandations de l'académie des technologies

30 juin 2020

Synthèse du rapport et recommandations

L'hydrogène est dans l'univers un atome aussi simple qu'abondant. Ses propriétés chimiques et énergétiques sont multiples, ce qui lui confère parfois le surnom de « couteau suisse ». L'hydrogène est largement utilisé dans l'industrie (hydrogène « matière première », ci-après dans ce rapport "hydrogène matière") notamment dans les raffineries pour produire des carburants légers ou désulfurés, dans la chimie pour produire de l'ammoniac et des engrais, potentiellement dans la sidérurgie pour produire les aciers en réduisant le minerai de fer, etc. La France produit et utilise 922 000 tonnes d'hydrogène par an et dispose de plusieurs réseaux privés de transport d'hydrogène, de plus de 300 km de longueur. La production mondiale, en croissance, avoisine les 70 millions de tonnes.

Les objectifs de réduction drastique des émissions de CO₂, voire de neutralité carbone en 2050, provoquent dans de nombreux pays, dont la France, un regain d'intérêt pour les applications énergétiques de l'hydrogène dont la combustion est non émettrice de CO₂ ou de particules fines. De nouveaux usages de l'hydrogène « énergie » sont envisagés tels que l'injection jusqu'à 20 % dans les réseaux de gaz naturel, la transformation en méthane ou en carburants liquides (e-fuels et notamment carburants de synthèse pour le transport aérien), électricité par conversion directe dans des piles à combustible (PAC) stationnaires (alimentation d'écoquartiers ou de bâtiments) ou embarquées dans des véhicules.

L'hydrogène est parfois évoqué comme un vecteur de stockage d'énergies solaires et éoliennes intermittentes, après production par électrolyse puis reconversion en électricité dans des PAC (*Power-to-Gas-to-Power*).

L'objectif du rapport de l'académie est de présenter les rôles possibles de l'hydrogène dans la transition écologique, de proposer l'amplification des efforts de recherche et développement (R&D) sur certains axes et de recommander des axes de développement industriel. Il comporte un benchmark international.

La chaîne de valeur de l'hydrogène.

Production

L'essentiel de l'hydrogène est actuellement produit par vaporeformage d'hydrocarbures. Les procédés sont matures, mais fortement émetteurs de CO₂. Les procédés de production par électrolyse (alcaline, ou avec membranes échangeuses de protons "PEM" sont matures, mais sensiblement plus coûteux que le vaporeformage. L'hydrogène produit par électrolyse n'est un vecteur décarboné que si la production d'électricité l'est également.

Les coûts de l'hydrogène électrolytique sont déterminés par le prix de l'électricité (75 % du coût total), loin devant l'amortissement des installations si elles sont utilisées au moins 3 000 à 4 000 h/an. L'hydrogène électrolytique produit avec l'électricité renouvelable va rester durablement plus cher (5 à 8 €/kg) que l'hydrogène de reformage (de 3,0 à 4,5 €/kg y compris la capture et le stockage du CO₂) tant que les prix de marché du gaz naturel resteront faibles. L'exploitation des propriétés énergétiques de l'hydrogène produit par électrolyse ne peut se justifier que si le prix attribué à la tonne de CO₂ évité est sensiblement supérieur à 100 €/t.

Le contenu énergétique de l'hydrogène nécessaire à la décarbonation d'une part significative de la consommation finale française d'énergie mobiliserait plus de 275 TWh d'électricité si l'hydrogène était produit exclusivement par électrolyse. Cette augmentation de plus de 50 % de la production annuelle d'électricité requerrait de doubler la puissance installée actuelle, si réalisée uniquement par les énergies renouvelables intermittentes (variables et non pilotables).

Il paraît plus réaliste de prévoir que la production d'hydrogène sera assurée 1) par électrolyse d'eau par de l'électricité d'origine nucléaire permettant d'assurer un facteur de charge élevé des électrolyseurs, 2) par électrolyse d'eau par de l'électricité intermittente, 3) par vaporeformage avec capture et stockage du CO₂ (CCS). Le savoir-faire français dans ce domaine est notable, permettant d'envisager le développement d'une filière industrielle. Mais elle ne se développera en France que si elle est admise par la société, et si la pénalité pour la tonne de carbone émise (prix de l'EU-ETS) augmente significativement.

Transport et stockage

Actuellement l'hydrogène doit être comprimé pour être transporté et stocké. Ces opérations ont un impact direct sur l'économie de l'hydrogène. Pour des petites distances, le transport est effectué dans des réservoirs sous pression (actuellement 220 bars). Des hydrogénoducs sont envisageables pour des distances et des quantités importantes. Le stockage de l'hydrogène embarqué pour les mobilités (700 bars) a progressé grâce aux composites de fibre

de carbones (ou autres) qui permettent d'alléger les réservoirs. Cependant leur forme est cylindrique, ce qui ne facilite pas leur intégration dans des véhicules.

Usages

Dans ce contexte où l'hydrogène présente des attraits multiples, mais aussi des coûts, son utilisation devrait concerner en priorité **deux secteurs, l'hydrogène « matière première » pour l'industrie et l'hydrogène « énergie » pour les mobilités.**

Le besoin le plus évident et immédiat est la **substitution de l'hydrogène carboné** issu des procédés de reformage par de l'hydrogène décarboné produit par électrolyse. Cela peut être fait rapidement pour **l'industrie chimique diffuse** qui paye pour l'hydrogène un prix élevé faute de réelle concurrence entre fournisseurs et du coût élevé du conditionnement et du transport. En outre de nouveaux usages doivent être promus pour décarboner certaines industries (sidérurgie et peut-être cimenteries).

La mobilité à base d'hydrogène apporte une autonomie que ne permet pas la mobilité électrique exclusivement à base de batterie. Certaines mobilités (bateaux, trains, camions et bus) ne peuvent être décarbonées par des batteries électriques dont la densité massique et volumique d'énergie est trop faible.

Il est raisonnable de penser que la mobilité hydrogène ne se développera dans un premier temps qu'à partir d'un nombre limité de points de distribution, réservant de fait son usage aux transports lourds et à des flottes locales. Enfin, la traction ferroviaire et les navires (sur de courtes distances, mais aussi en stationnaire au port) pourront recourir à l'hydrogène en substitution des hydrocarbures et notamment du fioul lourd.

L'injection d'hydrogène décarboné dans les infrastructures existantes de gaz en substitution du gaz naturel doit être un troisième levier pour booster la demande et susciter des sources fiables de production comme le souligne d'ailleurs l'AIE³². Certes, le coût du CO₂ évité est élevé ; mais c'est la conséquence du fait que le gaz naturel est bon marché et peu émetteur de CO₂.

L'utilisation massive d'hydrogène comme stockage intermédiaire d'énergie électrique intermittente (éolien et solaire) dans la chaîne **Power-to-Gas-to-Power** se heurte à des obstacles rédhibitoires tenant aux volumes considérables des stockages d'hydrogène requis et au faible facteur de charge des électrolyseurs et piles à combustible de la chaîne « conversion-stockage-conversion » qui obère considérablement les coûts.

Les différents usages possibles de l'hydrogène seront en concurrence, dès lors que les capacités de production par électrolyse sont nécessairement limitées. Par exemple, produire la moitié de l'hydrogène actuellement consommé en France (922 kt) nécessiterait près de 50 TWh d'électricité ; cet hydrogène pourrait alternativement alimenter une dizaine de millions de véhicules électriques légers, soit environ le tiers du parc ; l'hydrogène pourrait également être utilisé pour décarboner certaines industries ou pour produire du gaz et des carburants de synthèse. Ces différents usages pourraient requérir près de 300 TWh d'électricité ce qui dépasse de très loin les excédents d'électricité intermittente d'un mix 100

% renouvelable. Les différentes filières électricité, gaz et hydrogène sont interdépendantes et une approche systémique de la production et des usages de l'hydrogène est nécessaire.

Le développement de la filière hydrogène nécessitera la création d'infrastructures considérables pour sa production, sa distribution aux véhicules, sa transformation en méthane ou carburants liquides de synthèse ou, après stockage, en électricité, etc. Il conviendra de réaliser ces investissements alors que la demande ne sera pas présente : seul l'État pourra prendre ce risque.

Sécurité

Le déploiement de l'hydrogène en dehors du secteur industriel s'accompagnera d'utilisations grand public, accroissant le potentiel d'accidents notamment dans la mobilité et les secteurs résidentiel et tertiaire. Il faudra prendre en compte ce risque nouveau et adapter les normes et la réglementation déjà existantes qui sont fondées sur un important retour d'expérience, mais acquis dans un autre contexte.

Opérations de démonstration ; recherche et développement

Il faut profiter de la forte motivation des territoires à initier des « opérations de démonstration ». Quelques projets entrent dans des programmes plus vastes de recherche et développement. Mais d'autres visent essentiellement à être des vitrines de solutions techniques connues et souvent importées ; elles doivent être encadrées au niveau national, et un bilan périodique et transparent de ces opérations doit être mené.

La recherche publique française a permis d'identifier de nombreuses technologies prometteuses, de *Technology Readiness Level* (TRL) variables telles qu'électrolyseurs réversibles à haute température, torches plasma, hydrogène natif, hydrogène issu de l'activité bactérienne et/ou procédé de type biogaz 2^e génération sont des voies prometteuses ; le développement de ces technologies est insuffisamment soutenu, et leur passage au stade de pilote industriel doit être encouragé. Il en est de même des techniques de transport où la R&D française est présente, mais parfois pas sur le territoire national faute d'un encadrement réglementaire adéquat.

Vers une Industrie française/européenne de l'hydrogène

Les technologies clés (électrolyseur, pile à combustible, réservoirs embarqués, etc.) existent ; presque toutes sont matures et industrialisables.

L'écosystème français des équipementiers est bien vivant et il couvre ces technologies clés et dispose des composants requis (connectique, robinetterie). Néanmoins il s'agit de petites voire très petites sociétés qui auront des difficultés à appréhender le marché, qui étant mondial implique des coûts de prospection commerciale très élevés. Une consolidation du secteur s'imposera tôt ou tard ; d'ici là, les petits acteurs auront besoin de l'appui et la crédibilité d'acteurs plus puissants, en évitant de tarir leur créativité et leur agilité. Cet écosystème doit bénéficier d'appels d'offres ciblés en France et en Europe pour aider les entreprises à grandir. En outre ces sociétés sont confrontées aux problématiques de management de la croissance et de disponibilité de fonds propres bien connus à ce stade de

développement. C'est une chance pour la France de pouvoir développer une nouvelle industrie dans le bon timing.

Les grands intégrateurs français (Air Liquide, Engie, EDF, Total...) sont présents, notamment par les commandes qu'ils passent et les opérations – certaines de taille significative – qu'ils engagent ou annoncent souvent avec l'aide des pouvoirs publics. Leur effet d'entraînement de l'industrie française et européenne n'est pas toujours suffisant.

Benchmarks internationaux

De nombreux pays sont engagés dans le pari de l'hydrogène avec une stratégie nationale, une stimulation de la demande d'hydrogène décarboné, des incitations à la mobilité hydrogène, la couverture des risques pour les premiers investisseurs et enfin des programmes de recherche. Citons parmi les pays les plus dynamiques et dans un ordre décroissant des efforts : hors Europe, le Japon, la Corée, la Chine, les États-Unis (Californie en tête), l'Australie ; et en Europe, l'Allemagne, les pays nordiques, la France et le Royaume Uni.

Plusieurs de ces pays (Allemagne, Japon, Corée...) considèrent avoir des potentiels limités de production nationale d'hydrogène décarboné, et envisagent malgré les difficultés du transport maritime de l'hydrogène, son importation massive de pays qui le produiraient à partir de gaz naturel ou de charbon et capture du CO₂ (Australie pour le Japon, Russie pour l'Europe), ou à partir d'électrolyse dans des pays où les énergies renouvelables peuvent être très compétitives). Les implications géostratégiques de ces politiques sont complexes.

Recommandations

À partir de ces observations développées et complétées dans le rapport, les principales recommandations de l'Académie des technologies sont les suivantes. Sauf exception dûment notées, elles s'adressent aux pouvoirs publics.

RECOMMANDATION 1 : Privilégier et promouvoir les applications de l'hydrogène en considérant le coût de la tonne de carbone évitée pour la transition énergétique.

1.1: La production décentralisée de l'hydrogène par électrolyse pour les usages industriels diffus, plutôt que par reformage du gaz naturel, présente un bilan carbone positif sans surcoût pour le consommateur. Il convient d'en faire une priorité.

1.2 : L'Académie recommande que la distribution de l'hydrogène pour les mobilités fasse l'objet d'une politique nationale à l'instar de l'Allemagne. La priorité va au transport lourd (camions, bus et cars, ferroviaire, transport fluvial et maritime) et aux flottes locales urbaines et périurbaines. Il convient de mettre en place une structure de coordination nationale des acteurs publics et privés de tous les secteurs industriels de l'hydrogène. L'équipement des grandes capitales régionales au voisinage, notamment des centres de logistique doit être privilégié. Le réseau se développera ultérieurement le long des principaux corridors et au fur et à mesure du développement d'un parc de véhicules à hydrogène. Une attention particulière doit être portée aux enjeux de sécurité.

1.3 : La France possède un réseau de gaz naturel étendu. L'Académie recommande que, dans une phase de développement de l'économie de l'hydrogène, l'injection d'hydrogène décarboné dans les réseaux de gaz soit encouragée, malgré le coût élevé de la tonne de CO₂ évité, pour soutenir la demande et bénéficier ainsi d'économies d'échelle dans la production.

1.4 : L'Académie recommande de développer des démonstrateurs industriels de systèmes de stockage et de distribution 100 % hydrogène notamment pour l'approvisionnement énergétique des zones non interconnectées (ZNI) ou pour l'exportation. Cependant le stockage massif d'hydrogène pour produire de l'électricité dans la logique Power-to-Gas-to-Power n'a pas de modèle économique convaincant d'ici 2050.

RECOMMANDATION 2 : Se doter d'un cadre politique favorable

2-1 : La France à l'instar des grands pays avec lesquels elle est en compétition doit avoir une vision et une politique industrielle hydrogène ambitieuse, partagée et lisible. Les initiatives des territoires et en particulier des régions portent souvent sur des opérations de démonstration. L'Académie recommande d'encourager ces initiatives avec l'objectif de contribuer au développement industriel de la filière française : la politique hydrogène ne peut résulter de la seule agrégation d'initiatives régionales et doit être pilotée et encadrée par le gouvernement au niveau national.

Les pouvoirs publics pourraient en toute transparence et indépendamment des organismes de promotion de l'hydrogène, évaluer la cohérence de l'ensemble de la politique et les résultats obtenus.

2-2 : l'Académie recommande que les pouvoirs publics en liaison avec les milieux industriels, les universités et laboratoires de recherche, produisent des analyses Système et des scénarios d'ensemble, couplant notamment le secteur électrique et le secteur gazier en incluant l'hydrogène et les émissions de CO₂ et permettant d'apprécier les opportunités, les coûts et les horizons de temps des diverses options.

2-3 : Il convient de poursuivre les efforts prénormatifs, normatifs et réglementaires, notamment pour la sécurité des applications grand public ou semi-grand public au niveau européen. En poursuivant les pratiques actuelles, le travail réglementaire doit associer l'administration et toutes les parties prenantes (pompiers, centres techniques, équipementiers, exploitants, usagers...).

2-4 : L'Union européenne doit mettre en place une segmentation des différents types d'hydrogène exclusivement fondée sur les émissions de CO₂ lors de sa production. La qualification d'hydrogène vert doit être réservée à l'hydrogène décarboné (électrolyse avec de l'électricité décarbonée ou reformage avec capture et stockage ou utilisation du CO₂).

RECOMMANDATION 3 : Promouvoir une industrie française et européenne de la chaîne de l'hydrogène.

Au-delà de l'électrolyseur, les principaux éléments sont le stockage, le transport, la distribution et la consommation. Ces éléments sont en interaction pour former un système, dont le fonctionnement est dicté par la volatilité de certaines sources d'électricité renouvelables (variables et non pilotable) et la variabilité de la consommation.

3.1 : Il y a principalement deux modes de production d'hydrogène décarboné : 1) le reformage d'hydrocarbures et la réduction de l'eau accompagné de capture et stockage ou utilisation du CO₂ (CCUS), 2) l'électrolyse de l'eau par de l'électricité décarbonée. La voie reformage/CCUS est à développer quand les conditions économiques sont réunies d'autant que la France dispose d'acteurs d'envergure internationale.

Il appartient aux pouvoirs publics de promouvoir une filière industrielle française et européenne Electrolyseur/Pile à combustible pour abaisser les coûts et satisfaire les fonctionnalités requises (charge variable de l'électrolyseur...).

3.2 : Il convient de mettre en place une politique de soutien des entreprises pour toutes les composantes de la filière hydrogène, notamment les maillons à valeur ajoutée en privilégiant les équipementiers français par l'amplification de prises de participation, de soutiens en fonds propres, d'aides remboursables, d'aides à la trésorerie, et en favorisant les coopérations entre acteurs à gouvernance française ou au moins européenne.

3.3 : Les opérations de démonstration, pré-déploiement et déploiement organisés par les territoires créent une demande. Il faut les valoriser en veillant à ce qu'elles n'aient pas comme principale conséquence l'importation d'équipements produits en Asie ou en Amérique du Nord.

3.4 : La prospection de l'hydrogène géologique natif doit être soutenue.

RECOMMANDATION 4 : Préparer l'avenir par un effort français et européen accru de R&D

4.1 : La recherche et développement doit être amplifiée pour aider au lancement de la filière et à l'émergence de groupes français à ambition mondiale. Toute la chaîne doit être soutenue en parallèle : la production d'hydrogène – de nombreux procédés alternatifs sont possibles - le transport, le stockage et l'utilisation en particulier pour les mobilités. Les leviers potentiels de changement à TRL (*Technology Readiness Level*) intermédiaires (3 à 6) ou bas sont à aider en priorité sur fonds publics pour réaliser des prototypes et pouvoir ensuite passer aux pilotes et à l'industrialisation.