

Pourquoi l'hydrogène?

Pourquoi recourir à l'hydrogène ?

Certaines réponses à cette question relèvent autant d'un optimisme excessif que d'un pessimisme exagéré. Comme souvent dans de tels débats, la vérité se situe entre ces deux extrêmes. Elle résulte de tendances lourdes: explosion de la demande énergétique, tarissement des ressources fossiles et réchauffement de la planète imputable à un effet de serre excessif.

À la question du recours à l'hydrogène, certains médias ne se privent pas de relayer aussi bien des réponses d'un optimisme excessif que d'autres d'un pessimisme exagéré. Parmi les premières figurent les affirmations selon lesquelles l'hydrogène est un combustible propre, performant et universel et qu'il suffit donc d'en généraliser l'emploi, en se demandant même pourquoi on n'y a pas pensé plus tôt. Au rang des secondes, celles qui assurent qu'il faut bien produire cet hydrogène qui n'existe pas à l'état naturel et que le fabriquer est énergivore, n'améliore pas le bilan environnemental et complique même les systèmes qui l'utilisent. La "bonne réponse" devra inéluctablement s'appuyer sur deux faits que relèvent les études prospectives sérieuses. Le premier est que si les ressources fossiles satisferont encore, en 2050, plus de 60% des besoins mondiaux en énergie (contre 85% aujourd'hui), ceux-ci auront plus que doublé ! Le complément à l'offre existante ne pourra être fourni que par les énergies renouvelables et nucléaire. Le second est que les émissions résultantes de CO₂ dépasseront alors largement le seuil de concentration de 550 ppmv au-delà duquel l'augmentation moyenne de la température de l'air atteindra des valeurs inacceptables pour notre environnement.

La seule solution envisageable pour résoudre cette apparente incompatibilité est la limitation des émissions de CO₂ issu des énergies fossiles, par séquestration. En clair, cela signifie la transformation du combustible fossile pour en extraire ses atomes de carbone qui, une fois transformés en CO₂, seront stockés dans des réservoirs géologiques de grande taille, comme les puits épuisés de pétrole, de charbon ou de gaz naturel. Le reliquat de cette transformation – gé-



Étages cryogéniques du lanceur d'Ariane 5 en cours de soudage chez Cryospace (étage supérieur ESC-A au premier plan et étage principal EPC au second). La propulsion spatiale, bien que quantitativement limitée, constitue une première utilisation industrielle de l'hydrogène en tant que vecteur énergétique.

néralement dénommée reformage – est un gaz de synthèse qui reste un combustible. Une fois purifié, il devient de l'hydrogène pur, nouveau vecteur d'énergie, substitut des hydrocarbures dont il est directement issu, aussi performant, mais débarrassé des atomes de carbone, fatalement transformés en CO₂ au cours de leur cycle de vie.

L'intérêt de l'hydrogène ne se limite pas à la seule valorisation des combustibles fossiles, mais aussi aux autres formes d'énergie primaire. En effet, ces énergies alternatives sont de deux types. Soit elles fournissent directement de l'électricité (photovoltaïque, éolien, géothermie) qui doit être utilisée simultanément ou transformée en hydrogène (par électrolyse) pour être stockée ou utilisée dans d'autres systèmes mobiles (transports) ou fixes (industrie), soit elles fournissent de l'hydrogène directement (thermochimie) ou indirectement (transformation de la biomasse).

Des qualités évidentes :

L'atome d'hydrogène est, sous forme d'eau, très abondant sur Terre. Sa molécule est la plus énergétique : 120 MJ/kg, soit 2,2 fois le gaz naturel (tableau). L'hydrogène a un contenu énergétique de 39,4 kWh/kg tandis que le charbon, selon sa forme, oscille dans la fourchette 7,8 - 8,7 kWh/kg, soit environ 5 fois moins par unité de masse. Il n'est ni polluant, ni toxique et sa combustion dans l'air ne génère que de l'eau. C'est le plus léger des gaz, ce qui est un facteur positif vis-à-vis de la sécurité (grande vitesse de diffusion dans l'air). En dehors d'une situation dite "confinée" (c'est-à-dire emprisonné avec de l'air dans un volume fermé), l'hydrogène est moins dangereux que le gaz naturel. Son transport (en particulier par pipes) et son stockage (sous pression ou liquide) sont aisés. Ses modes de production sont variés et il est le combustible idéal des piles à combustible, le moyen le plus efficace pour

convertir l'énergie chimique en énergie électrique .

Une acceptation non acquise :

La légèreté de l'hydrogène implique une densité énergétique volumique moins favorable au transport et au stockage sous forme gazeuse, que pour le gaz naturel (facteur 4 à 200 bars, par exemple). Ses limites d'inflammabilité et de détonation avec de l'air sont plus larges que pour le gaz naturel, d'un facteur 5 environ . Sa combustion thermique à haute température, en présence d'air, génère des oxydes d'azote. Considéré comme un gaz dangereux, son image dans le public n'est pas bonne et son acceptabilité n'est donc pas encore acquise.

De grands programmes de R&D en cours :

Le choix de l'hydrogène comme vecteur d'énergie du futur fait aujourd'hui la quasi unanimité des scientifiques, des industriels et des politiques, tant français (programme PACo, CNRT Pile à combustible), qu'européens (6e PCRDT de l'Union européenne, Hydrogen and Fuel Cell Technology Platform) et internationaux (États-Unis, Japon, Canada...). Tous reconnaissent que des verrous subsistent mais font confiance aux chercheurs pour les lever à moyen terme. Ainsi, tous les pays industrialisés ont aujourd'hui lancé des grands programmes de recherche, de développement et de démonstration dans toute la chaîne verticale qui mène de la production à l'utilisation de l'hydrogène, ainsi que dans les voies transverses comme la sûreté, la sécurité, les normes et réglementations, la formation et les impacts socioculturels.

Le plus séduisant des candidats :

D'ici quelques années apparaîtra une phase plus industrielle. Son lancement sera au moins autant une affaire de volonté politique que de maturité technologique. Les "trop optimistes" comme les "trop pessimistes" quitteront alors la scène dos à dos. Les premiers admettront que l'hydrogène n'a jamais eu la prétention d'être la réponse universelle à toutes les situations énergétiques : certains vecteurs subsisteront, comme l'électricité, et d'autres (combustibles liquides issus de la biomasse, par exemple) se dévelop-



Les essais du prototype HydroGen, sur la base d'un Peugeot Partner, ont constitué, au début des années 2000, un jalon important dans la réalisation d'un véhicule équipé d'une pile à combustible, alimentée en l'occurrence en hydrogène comprimé. Le CEA est associé au groupe PSA-Peugeot-Citroën dans ce développement.

peront. Les seconds constateront que la nécessaire séquestration du CO₂ issu des énergies fossiles, comme le développement des énergies alternatives, impose-

ront un nouveau vecteur d'énergie : l'hydrogène est assurément le plus séduisant des candidats.

propriétés	valeur numérique
masse atomique	1,0079
constante du gaz	4124,5 J/kg K
PCI (Pouvoir Calorifique Inférieur)	33,33 kWh/kg / 3 kWh/Nm ³ (essence: 12 kWh/kg, 8,8 kWh/l) (gaz naturel : 10,6 - 13,1 kWh/kg, 8,8 - 10,4 kWh/Nm ³) L'énergie contenue dans 1 Nm ³ d'hydrogène est équivalente à 0,34 litre d'essence, 1 kg d'hydrogène est équivalent à 2,75 kg d'essence 10800 kJ/Nm ³
PCS (inclut l'énergie de la vapeur d'eau)	39,41 kWh/kg / 3,55 kWh/Nm ³ 12770 kJ/Nm ³
densité gazeuse à 273 K	0,0899 kg/Nm ³ (gaz naturel : 0,6512 kg/Nm ³)
chaleur spécifique (Cp à 273 K)	14199 J/kg/K
température d'ébullition (à 1013 mbars)	20,268 K

Tableau. Quelques caractéristiques physiques et physico-chimiques de l'hydrogène moléculaire.

Thierry Alleau,
Association française de l'hydrogène, Paris.
«Extrait de CLEFS CEA - N° 50/51»