

LES NOTES DU CREOGN

Centre de Recherche de l'École des Officiers de la Gendarmerie Nationale

Numéro 76 – Septembre 2022

Colonel David BIÈVRE (Dr)



Priorité stratégique de la prospective



Environnement et biosécurité

TRANSITION ÉNERGÉTIQUE : LE POINT SUR LE « HY¹ »

La succession des épisodes météorologiques caniculaires, un peu partout à travers le monde et en particulier en France métropolitaine, ne laisse plus guère de place au doute quant à son origine. Ainsi, la nécessité de lutter contre les gaz à effets de serre (GES), en premier lieu le dioxyde de carbone (CO₂), invite fermement à accélérer l'exploration de nouveaux modèles énergétiques décarbonés, en vue de contrarier le dérèglement climatique auquel nous sommes confrontés. Dans cette perspective, la molécule d'hydrogène suscite un espoir largement partagé alors que, dans le même temps, quelques voix s'élèvent pour en souligner l'inefficacité et le coût exorbitant ; cependant, la recherche et les différents progrès technologiques relatifs à l'usage de l'hydrogène sont loin d'être achevés². Auditeur de la 22^e promotion de l'IHEE³ dont le thème est consacré à la transition énergétique, j'ai pu constater l'extrême compétition à laquelle se livrent les États et les entreprises, en visitant, entre autres, les installations d'Air Liquide en Allemagne et celles d'Hydroquébec au Canada, ou bien encore en mesurant l'espoir d'une finance verte à Francfort et en m'essayant à une mobilité électrique dans les bus de Transdev à Montréal. Afin de clarifier la question de l'hydrogène, je propose dans la présente Note un point synthétique sur les principes techniques actuellement maîtrisés concernant cette molécule. En revanche, si cette technologie présente de nombreuses conséquences dans le champ de la géopolitique énergétique ou en économie, ces points ne seront pas développés dans la suite de ce document qui se veut prioritairement orienté vers l'ingénierie du processus ; toutefois, ils ne doivent pas être perdus de vue, car ils font partie de l'équation générale à résoudre.

La molécule d'hydrogène H (plus exactement, dihydrogène, H₂ lorsqu'elle revêt la forme d'un gaz) est à ce jour la seule alternative possible identifiée aux énergies fossiles, si et seulement si elle est générée à partir d'une origine et selon un processus décarbonés. On notera toutefois que cette molécule n'est pas une source énergétique en tant que telle, mais un vecteur d'énergie : l'hydrogène, loin de produire *ex nihilo* de l'électricité, favorise seulement la restitution d'une énergie qu'il a captée au préalable. En effet, l'hydrogène, une fois isolé, permet le stockage, le transport, puis la réutilisation de l'énergie électrique initialement générée par une autre source. La présente Note distinguera ces deux aspects, d'abord celui de l'objectif assigné à l'hydrogène, c'est-à-dire la restitution d'une énergie finale (I) puis s'intéressera à sa génération à partir d'une énergie primaire (II) ; enfin, l'ambition française dans ce domaine fera l'objet d'une présentation, car les enjeux technologiques sont pour notre pays tout à fait fondamentaux (III).

1 « Hy » pour hydrogène.

2 Voir, par exemple, Les matériaux face au plasma en fusion. *Les défis du CEA*, n° 249, mai-juin 2022, p. 13 .

3 Institut des hautes études de l'entreprise.

I) La restitution d'une énergie finale

La molécule d'hydrogène est la molécule la plus répandue dans l'univers ; sa découverte n'est pas récente car elle remonte au XVI^e siècle. Elle est actuellement utilisée essentiellement dans le secteur de l'industrie chimique (production d'ammoniac pour les engrais et de méthanol) et pétrochimique (réactif dans les procédés de raffinage des produits pétroliers, carburants et biocarburants). Toutefois, dans le cadre de la réduction des émissions de GES, les perspectives d'usage apparaissent prometteuses dans le secteur des transports (responsable de 25 % des GES), celui de l'industrie et de la construction (responsable de 18 % des GES), ou encore dans le secteur résidentiel (responsable de 6 % des GES). En particulier, la production d'énergie primaire non décarbonée pèse aujourd'hui, à elle seule, pour 41 % des émissions de GES dans le monde. En définitive, 90 % des émissions de GES sont potentiellement concernés par les perspectives de développement autour de l'hydrogène.

Les avantages

La capacité de stockage offerte par l'hydrogène constitue en quelque sorte le « chaînon manquant » dans le processus des énergies renouvelables : en effet, l'absence de capacité de stockage des flux électriques rend les énergies renouvelables difficiles à canaliser pour que la production coïncide avec le besoin de consommation à l'instant « t ». Le stockage de l'électricité produite dans des batteries est techniquement maîtrisé, mais rencontre des limites, aujourd'hui sans solution, liées à la densité énergétique (le nombre de kWh stockés par kg ou litre) et à la durée de conservation. Les autres sources d'énergie, comme celle issue du nucléaire, sont également confrontées aux problématiques de stockage, même s'il est possible de calibrer la puissance de production en amont.

L'hydrogène permet ainsi d'absorber une certaine puissance produite au moment de sa production et de la restituer par transformation au moment du besoin. Cette molécule peut prendre plusieurs formes pour assurer le stockage chimique de l'électricité : gazeuse, liquide, et même solide. Lorsque l'électricité est générée à partir de l'hydrogène, elle ne produit pas de CO₂ mais rejette de l'eau. Par exemple, en termes de mobilité, le moteur à hydrogène peut prendre deux formes : soit il s'agit d'un moteur à combustion classique raccordé à un réservoir dont le carburant est l'hydrogène, soit le moteur est électrique et il est alimenté par une pile à combustible. Dans les deux cas, le dihydrogène (H₂) consommé se transforme en eau (H₂ + O = H₂O) par combustion au contact de l'oxygène.

La pile à combustible fonctionne sur le principe d'une anode qui émet des électrons à partir d'un combustible, l'hydrogène, et d'une cathode dont le combustible est l'oxygène et qui collecte les électrons. Un électrolyte va contraindre le passage des électrons émis par l'anode via un circuit externe qui va générer une énergie électrique continue, puis ces électrons sont ensuite captés par la cathode ; au contact de l'oxygène, de la chaleur et de l'eau vont ainsi être produites.

La combustion directe dans un moteur thermique adapté à de l'hydrogène gazeux permet, au vu des derniers constats, d'obtenir des performances proches des moteurs à essence, mais avec des coûts de reconfiguration moins élevés que dans le cas d'un remplacement intégral de la motorisation. Toutefois, encore aujourd'hui, l'hydrogène doit être mélangé à des carburants plus classiques, ce qui ne permet pas d'être en zéro émission de GES. De plus, dans ce cas, deux réservoirs de carburants distincts sont nécessaires.

La transformation de la molécule crée de la chaleur qui peut être exploitée dans les réseaux calorifiques, ainsi est-il possible d'injecter un pourcentage de dihydrogène dans les réseaux de gaz en complément des autres sources d'énergies. Enfin, au plan résidentiel, il est permis d'imaginer, dès à présent, des ballons de production d'eau chaude sanitaire munis d'une pile à combustible et alimentée par du dihydrogène.

Les inconvénients

Le rendement

Le taux de restitution de l'énergie n'est pas très favorable, car il est bien inférieur à 25 % : pour une unité d'électricité produite en amont par une source énergétique, l'énergie finale restituée par l'hydrogène ne sera au mieux que de 0,25. Dès lors, il apparaît que, pour maintenir un même niveau de restitution de 1 en énergie finale, qui correspond au besoin de consommation, il faudra multiplier par plus de 4 les sources primaires d'électricité en amont. *Challenges* rappelle que l'Union européenne (UE) a pour cible la circulation de 10 000 camions à l'hydrogène à l'horizon 2030, ce qui correspond à un besoin nouveau de production d'électricité équivalant à 15 réacteurs nucléaires.

Un risque d'explosion

Avant que la molécule H₂ ne redevienne de l'eau, son contact avec l'oxygène la rend très inflammable et explosive ; de plus, le dihydrogène étant la plus petite des molécules, il nécessite des compresseurs plus puissants et des moyens de transport spécifiques de façon à éviter des fuites. Il est par ailleurs inodore, incolore, non toxique et non corrosif, ce qui complexifie sa maîtrise.

II) L'absorption d'une énergie primaire⁴

60 % des molécules combinant de l'hydrogène, il apparaît, dès lors, nécessaire de développer des processus de dissociation pour en isoler la molécule H.

En France, c'est 1 million de tonne d'hydrogène qui est produit chaque année (sur un total mondial de 70 millions). Toutefois, à ce jour et selon une note de recherche parlementaire⁵, 99 % de l'hydrogène généré n'est pas décarboné et 50 % de cette production est constituée d'hydrogène fatal⁶ ou coproduit : 48 % est produit à partir du gaz⁷ (on parle d'hydrogène gris, qui devient hydrogène bleu si le CO₂ est capté⁸), 28 % à partir de dérivés pétroliers (classification identique à celle du gaz) et 23 % à partir du charbon (hydrogène brun s'il s'agit de lignite, ou noir s'il s'agit de houille).

L'hydrogène peut être obtenu à partir de différents process : décomposition thermochimique ou photochimique, vaporeformage (pour le gaz), pyrolyse de la biomasse ou encore électrolyse de l'eau. Toutefois, pour que l'hydrogène puisse être totalement qualifié de vert, seule l'électrolyse de l'eau peut être retenue comme mode de production, car les émissions de CO₂ sont alors inexistantes, à condition d'être alimentée par les seules énergies renouvelables (énergies éoliennes, biocarburants, biogaz, énergies houlomotrices, géothermie et chimie biosourcée). De manière très schématique, c'est le processus inverse à celui de la pile à combustible, décrit *supra*, qui est mis en œuvre pour dissocier la partie H₂. Si, au terme de l'électrolyse, l'hydrogène est isolé à partir de l'énergie nucléaire, la molécule obtenue sera lors qualifiée de jaune (aussi parfois de rose). Enfin, il existe également de l'hydrogène blanc, dont l'obtention est le résultat de plusieurs processus naturels et qui n'émet aucun dioxyde de carbone. La France dispose de plusieurs sources importantes d'hydrogène blanc mais les conditions d'exploitation ne sont pas encore stabilisées au plan technique.

À noter que l'[ordonnance du 17 février 2021 relative à l'hydrogène](#) est venue simplifier les catégorisations de la molécule au niveau français :

- hydrogène *renouvelable* pour l'obtention par électrolyse de l'eau issue d'une électricité renouvelable (correspond à de l'hydrogène vert) ;
- hydrogène *bas carbone*, si et seulement si les molécules obtenues sont identifiées jaunes ou bleues ;
- hydrogène *carboné* si la molécule est obtenue à partir d'énergies fossiles.

La cible à atteindre est *a minima* celle de l'hydrogène bas carbone.

Les inconvénients*Un coût très élevé*

Comme vu précédemment, la génération de l'hydrogène n'a de sens que si elle est verte, c'est-à-dire issue d'une énergie initiale décarbonée comme dans le cas de la production issue des éoliennes, des panneaux photovoltaïques, de l'hydrologie ou de la géothermie.

Mais les coûts d'obtention de l'hydrogène vert sont aujourd'hui environ 5 fois plus élevés que ceux de l'hydrogène gris et 2 fois plus que ceux de l'hydrogène jaune.

4 Énergie primaire, selon la définition de l'agence internationale de l'énergie.

5 Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques, *Les modes de production de l'hydrogène*, Note scientifique n° 25, avril 2021.

6 Fatal signifie qu'il est obtenu à l'issue d'un processus industriel sans lien initial avec la production de H.

7 Si le gaz en question est du méthane traité par pyrolyse, le code couleur associé par l'UE est turquoise.

8 La captation de l'hydrogène nécessite ensuite un stockage à long terme.

III) L'ambition française

Le ministère de la Transition énergétique est chargé de piloter un vaste plan de soutien au développement de l'hydrogène décarboné. Ce plan, doté de 7 milliards d'euros, vise à réduire les émissions de GES de 55 % d'ici 2030, ce qui représente un volume d'emplois estimé à 150 000.

Trois axes prioritaires ont été définis par le ministère :

1. la décarbonation de l'industrie ;
2. le développement des mobilités lourdes à l'hydrogène ;
3. le soutien d'une recherche d'excellence et le développement des offres de formation.

Certaines sociétés françaises ont déjà franchi le pas : ainsi, à Béziers (34), Gendia installe un électrolyseur permettant de produire en masse de l'hydrogène vert⁹. La société Helion, filiale d'Alstom¹⁰, communique, quant à elle, sur son positionnement comme pionnière des piles à combustible pour la mobilité lourde, en lieu et place des batteries électriques dont le poids à l'embarquement est rédhibitoire pour garantir un avenir à la mobilité électrique.

Pour sa part, la France vise 20 % de la consommation électrique à base d'hydrogène vert en 2050 dans le mix énergétique, ce qui devrait conduire à un doublement de la production électrique primaire décarbonée.

*

Il ressort de ce qui précède que l'hydrogène offre des perspectives prometteuses, en particulier si la molécule est isolée par électrolyse de l'eau, elle-même alimentée par des énergies renouvelables ou, à défaut, d'origine nucléaire. Toutefois, le cycle d'innovation est loin d'être achevé. La mobilité électrique telle que nous la connaissons actuellement, c'est-à-dire par connexion par câbles à des bornes de recharge, apparaît, dès lors, comme une modalité de déplacement transitoire au plan technique. En effet, les perspectives de production de masse sont inférieures à 20 ans et les stations de recharge en hydrogène commencent seulement à se développer à travers le monde.

En revanche, la bascule vers l'hydrogène bas carbone pour l'industrie ou la mobilité nécessite, dès à présent, un investissement massif en vue de démultiplier la production électrique primaire. Un mix énergétique à 100 % renouvelable n'apparaît pas immédiatement accessible, ce qui confère à l'énergie nucléaire un rôle déterminant pour combler par l'hydrogène jaune les besoins de consommation finale, au pire par captation du CO₂ pour de l'hydrogène bleu. Enfin, il convient de noter que les enjeux économiques sont considérables pour notre pays, tant en termes de souveraineté énergétique que d'emplois créés. À quand les premières stations gendarmerie d'hydrogène et les premiers véhicules d'intervention à propulsion sur la base de cette molécule ? Demain, pas après-demain, à coup sûr.

Références

Hydrogène : de l'utopie à la réalité. *Challenges*, numéro spécial 3, mai-juillet 2022.

Revue mondiale de l'hydrogène 2021. Rapport technologique, octobre 2021. Disponible sur : <https://www-iea-org>

MAISONNEUVE Cécile, FREMAUX Benjamin. Souveraineté énergétique européenne : en finir avec le nucléaire honteux. In : *Site de l'Institut Montaigne*, 17 mars 2022. Disponible sur : <https://www.institutmontaigne.org/blog/souverainete-energetique-europeenne-en-finir-avec-le-nucleaire-honteux>

Technologies de demain, pourquoi la France peut encore gagner. *Capital*, n° 368, mai 2022.

Site d'information H2-Mobile.fr. Disponible sur : <https://www.h2-mobile.fr/>

Hydrogène, filière d'avenir. *Les défis du CEA*, n° 243, mai-juin 2021, p. 17.

Le Colonel David Bièvre [ORCID iD 0000-0001-5806-1998] est directeur adjoint du CREOGN.
 Docteur en Sciences de gestion – Université Paris Dauphine (thème : la conduite du changement dans les administrations publiques – 2005)
 Doctorant en Sociologie – Université de Lille (CLERSé) (thème : rationalités et facteurs de contingence en sécurité routière – en cours)

Le contenu de cette publication doit être considéré comme propre à son auteur et ne saurait engager la responsabilité du CREOGN.

⁹ Technologies de demain, pourquoi la France peut encore gagner, *Capital*, n° 368, mai 2022, p. 44.

¹⁰ Hydrogène : de l'utopie à la réalité, *Challenges*, numéro spécial 3, mai-juillet 2022, p. 17.