

L'HYDROGÈNE NATUREL : LE PÉTROLE DU XXI^E SIÈCLE ?

A S T E R È S
Études, recherche & conseil énergétique

SYNTHÈSE

Un projet de recherche d'hydrogène naturel, dit « blanc », a été autorisé par le gouvernement pour la première fois en France le 3 décembre 2023, dans les Pyrénées-Atlantiques et cinq autres sont en cours d'instruction. Par rapport aux énergies fossiles, l'hydrogène naturel a l'avantage de n'émettre que de l'eau lors de sa combustion, d'être en partie renouvelable et d'être plus également réparti géographiquement. Par rapport à l'hydrogène vert, produit par électrolyse de l'eau, ou l'hydrogène bleu, produit à base d'énergie fossile en captant le CO₂ en sortie d'usine, l'hydrogène naturel coûterait moins cher. L'hydrogène naturel n'est pas encore disponible sur le marché mais plusieurs forages ont débuté dans le monde et un premier site pilote en produit continuellement au Mali, à la suite d'une découverte accidentelle dans les années 1980. À ce jour, les réserves et flux générés sont mal connus. Les premières modélisations laissent penser que l'hydrogène pourrait être abondant sur Terre, sans indiquer la part accessible à un coût compétitif. L'arrivée sur le marché de cette nouvelle énergie primaire pourrait considérablement réduire le coût de la transition énergétique, tout en libérant des capacités pour d'autres usages. Le passage vers une économie de l'hydrogène ne serait cependant pas sans défi technique, la plupart de nos machines et équipements n'étant aujourd'hui pas prévus pour fonctionner à l'hydrogène.

1. HYDROGÈNE NATUREL : LA DÉCOUVERTE D'UNE NOUVELLE SOURCE D'ÉNERGIE

1.1 PRÉSENTATION : UNE ÉNERGIE PRIMAIRE DÉCARBONÉE, EN PARTIE RENOUVELABLE

L'hydrogène naturel (H₂) est un gaz naturellement présent dans les sous-sols et dont la combustion n'émet que de l'eau. L'hydrogène d'origine géologique a longtemps été négligé : le consensus était que ce gaz n'était pas présent en grande quantité sur Terre et n'était qu'un vecteur d'énergie¹ – c'est-à-dire que l'hydrogène devait d'abord être produit à partir d'une énergie primaire. On assiste aujourd'hui à un regain d'intérêt des géologues pour l'hydrogène naturel : alors qu'une publication académique par an mentionnait explicitement l'hydrogène naturel entre 1980 et 2010, c'est aujourd'hui une dizaine de papiers relatifs à ce sujet qui sont publiés chaque année². La relecture d'anciens papiers qui ont fait peu de bruit à l'époque et les nouvelles recherchent révolutionnent la perception que la communauté scientifique avait de l'hydrogène : il s'avère que la Terre serait une véritable « usine à hydrogène », produisant ce gaz continuellement et en grande quantité (notamment par oxydation du fer, oxydoréduction et grâce à des micro-organismes cachés dans les sous-sols³). L'hydrogène serait donc une énergie primaire, au même titre que le gaz naturel, le pétrole, ou le charbon, à la différence qu'elle serait décarbonée et renouvelable. Enfin, un autre avantage intéressant du point de vue géopolitique : l'hydrogène naturel semble plus également réparti sur la planète que les énergies fossiles.

¹ Zgonnik, « The Occurrence and Geoscience of Natural Hydrogen ».

² Gaucher et al., « The place of natural hydrogen in the energy transition ».

³ Gaucher et al.; Prinzhofen et Deville, *Hydrogène naturel*.

1.2 VOLUME : UN POTENTIEL EN COURS D'ÉVALUATION

Les premières modélisations indiquent que l'hydrogène naturel pourrait exister en très grande quantité, à des degrés d'accessibilité qui ne sont pas encore connus. À ce jour, la plupart des sites connus ont été détectés par hasard et ne sont pas représentatifs du potentiel total de l'hydrogène naturel. En outre, les données évoluent si rapidement qu'il est difficile pour la littérature de les suivre. Des chercheurs estimaient par exemple dans une revue de littérature publiée en 2020 le flux des sites détectés à 23 millions de tonnes par an⁴. Or cette donnée est probablement obsolète en 2023 puisque rien qu'en Moselle, une source continue de 46 millions de tonnes d'hydrogène a été découverte par des géologues alors qu'ils cherchaient du gaz de charbon⁵. Restent alors les modélisations. La géologie de l'hydrogène naturel est un domaine naissant mais de premières modélisations, non publiées, ont déjà été réalisées. D'après des scientifiques de l'Institut d'études géologiques des États-Unis (USGS en anglais)⁶, les réservoirs d'hydrogène (hydrogène produit en sous-sol, non consommé par les micro-organismes et accumulé dans les roches), les puits d'hydrogène renouvelable (hydrogène produit continuellement par la Terre et s'échappant *via* des conduits rocheux) et l'hydrogène qui pourrait être généré par stimulation (en injectant de l'eau dans les roches riches en fer par exemple), représentent un potentiel d'un trillion de tonnes de gaz⁷, soit de quoi « répondre à la demande mondiale pendant des milliers d'années ». L'enjeu aujourd'hui est d'évaluer la part accessible à un coût compétitif : si même une « fraction » de ce volume estimé pouvait être exploité, il y aurait de quoi répondre à la demande pendant des centaines d'années selon Geoffrey Ellis de l'USGS⁸.

1.3 MATURITÉ TECHNOLOGIQUE : DES PROJETS EXPLORATOIRES EN COURS

L'exploration de gisements potentiels a débuté et un projet pilote produit actuellement de l'hydrogène de manière pérenne. Le TRL (« *technology readiness level* ») évalue la maturité d'une technologie, de la découverte des principes scientifiques fondamentaux à sa commercialisation, sur une échelle de 1 à 11 (voir encadré ci-dessous). On peut considérer que le stade du concept (TRL 1 à 3) a été largement dépassé puisque plusieurs processus permettent maintenant d'expliquer la formation naturelle d'hydrogène sur Terre, et notamment au niveau de la croûte continentale⁹. En revanche, aucun site de démonstration commerciale n'existe (TRL 7 à 8). Le TRL de l'hydrogène se trouve donc entre les deux, à un stade qui équivaut à celui du prototype (TRL 4 à 6). Plus précisément, ce stade correspond à de petits prototypes comme l'unité pilote non commerciale de l'entreprise Hyroma au Mali, ou aux investissements qui permettent d'explorer la sous-surface, comme en France (avec le permis qui vient d'être accordé mais aussi les premières explorations réalisées en Lorraine grâce aux puits de forage déjà existants¹⁰), aux États-Unis (des forages à des profondeurs de 3 000m à 5 000m ont déjà été réalisés par Neutral Hydrogen Energy LLC au Kansas et Desert Mountain Energy en Arizona) ou encore en Australie (où une exploration à l'échelle régionale est en cours à Santos)¹¹. À titre de comparaison, le TRL de l'hydrogène vert est estimé à 9 par l'AIE (pour l'électrolyse alcaline et l'électrolyse à membranes échangeuses de protons) et la production de l'hydrogène brun fait appel à des technologies matures et éprouvées commercialement, soit au TRL 11. Cet écart pourrait toutefois vite être comblé car les défis techniques à relever pour exploiter l'hydrogène naturel ne sont pas du même ordre que pour produire de l'hydrogène vert, l'enjeu est surtout de trouver la ressource.

⁴ Zgonnik, « The Occurrence and Geoscience of Natural Hydrogen ».

⁵ Les journalistes ne précisent pas s'il s'agit d'un flux de 46 Mt par an, mais étant donné qu'ils mentionnent une « source renouvelable », nous faisons l'hypothèse qu'il s'agit d'un flux. Nouvelle, « De l'hydrogène naturel dans le bassin houiller lorrain ».

⁶ Ellis et Demas, « The potential for geologic hydrogen for next-generation energy ».

⁷ « Hidden Hydrogen ».

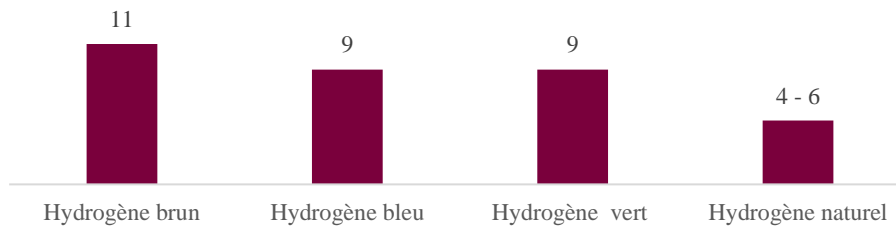
⁸ Ellis et Demas, « The potential for geologic hydrogen for next-generation energy ».

⁹ Gaucher et al., « The place of natural hydrogen in the energy transition »; Zgonnik, « The Occurrence and Geoscience of Natural Hydrogen »; Prinzhofer et Deville, *Hydrogène naturel*.

¹⁰ Nouvelle, « De l'hydrogène naturel dans le bassin houiller lorrain ».

¹¹ Gaucher et al., « The place of natural hydrogen in the energy transition ».

Graphique. TRL des différentes techniques de production/extraction de l'hydrogène.

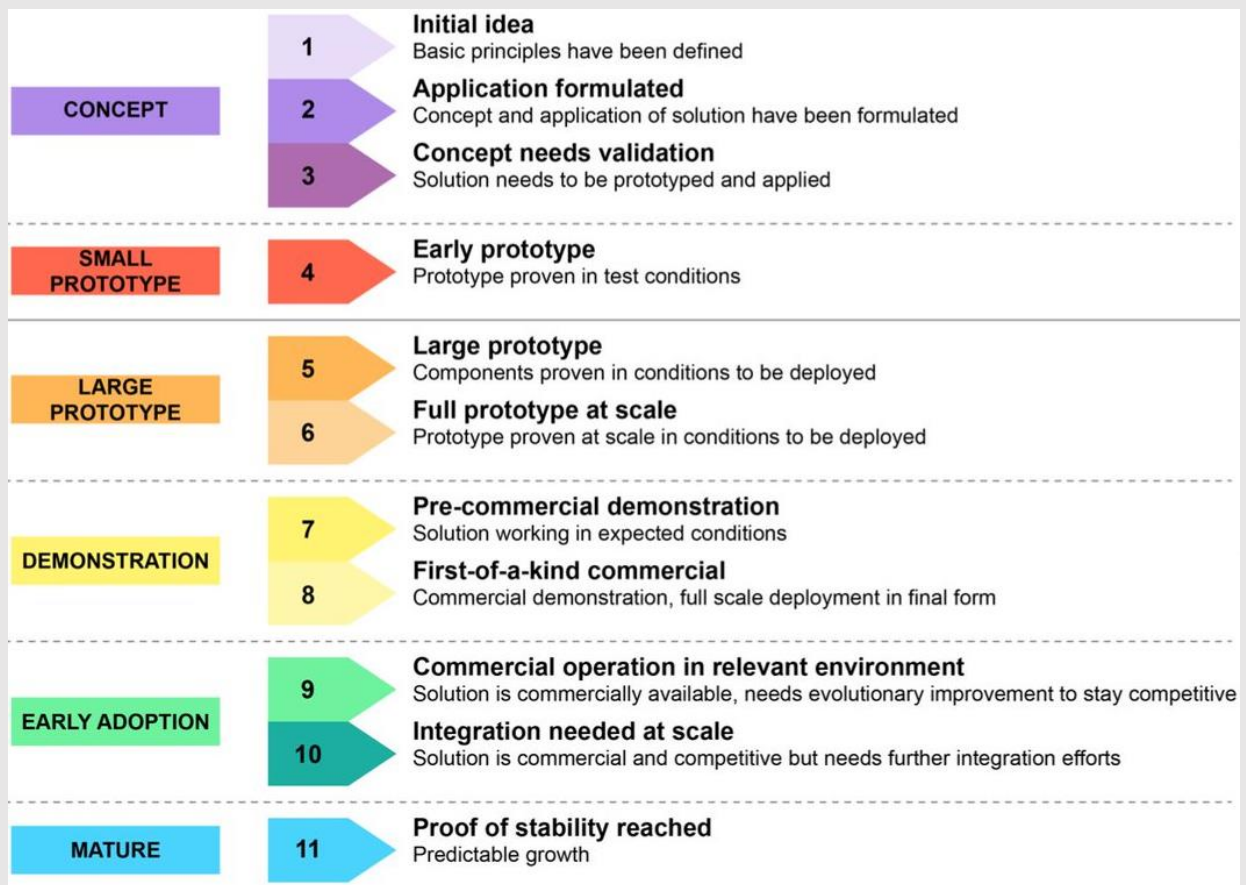


Sources : AIE, Gaucher *et al.*

Encadré. L'indicateur du *technology readiness level*

Originellement développé par la NASA, le TRL (« *technology readiness level* »), qui peut être traduit comme « niveau de maturité technologique », est une échelle visant à mesurer la maturité d'une technologie, de la formulation des principes fondamentaux à sa commercialisation. L'échelle utilisée par la Commission européenne, qui évalue le degré de maturité des technologies sur une échelle de 1 à 9, diffère de celle utilisée par l'AIE, qui évalue le degré de maturité des technologies sur une échelle de 1 à 11 (voir tableau ci-dessous). Après analyse, Asterès considère que l'AIE décompose le dernier niveau (TRL 9) en trois niveaux (TRL 9, 10 ou 11). Dans cette étude, Asterès préférera l'échelle de l'AIE pour sa précision accrue, permettant notamment de capturer la maturité économique avec l'introduction de la notion de compétitivité. Les TRLs estimés selon l'échelle de la Commission européenne seront convertis par Asterès le cas échéant.

Figure. L'échelle TRL utilisée par l'AIE.

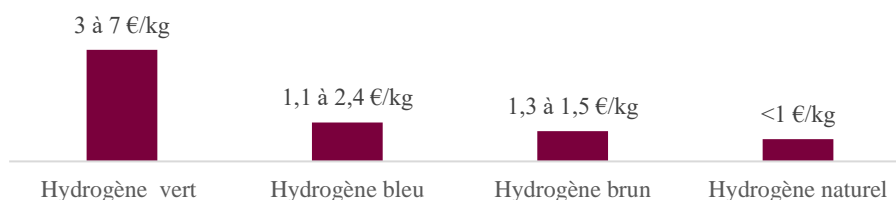


Source : AIE

1.4 COÛT : POTENTIELLEMENT L'OPTION LA PLUS COMPÉTITIVE

L'extraction de l'hydrogène naturel pourrait constituer l'option la moins chère pour la production d'hydrogène. L'hydrogène naturel n'étant pas encore commercialisé, son coût est pour le moment seulement estimé. D'après une équipe de scientifiques travaillant dans la filière, le coût de production l'hydrogène naturel devrait être « proche de celui du gaz naturel, sans le coût de raffinage », soit inférieur à 1€/kg¹². En comparaison, le coût de l'hydrogène vert se situe entre 3€/kg et 7€/kg et le coût de l'hydrogène bleu (énergie fossile + capture carbone) entre 1,1€/kg et 2,4€/kg selon l'AIE¹³, et le coût de l'hydrogène brun entre 1,3€ et 1,5€/kg selon le Ministère de la Transition Écologique¹⁴. En outre, la rentabilité de l'hydrogène naturel peut être renforcée par la valorisation de l'hélium, souvent un co-produit de l'hydrogène, ou de l'énergie géothermique. Cette estimation doit toutefois être interprétée avec beaucoup de précaution puisqu'elle suppose que l'hydrogène serait accessible dans les mêmes conditions que le gaz naturel, c'est-à-dire à la même profondeur et avec une concentration importante de la ressource sur des points géographiques. Il s'agit là de l'inconnue économique majeure.

Graphique. Coût de production de l'hydrogène selon le type.



Source : Gaucher et al., AIE, Ministère de la Transition Écologique.

Note : le coût de production de l'hydrogène naturel est une estimation qui repose sur l'hypothèse d'une ressource accessible dans les mêmes conditions que le gaz actuellement, or il s'agit pour l'instant de l'inconnue économique majeure.

2. USAGES : VERS UNE ÉCONOMIE DE L'HYDROGÈNE ?

2.1 INTRODUCTION : LA SUBSTITUTION DE L'HYDROGÈNE AUX ÉNERGIES FOSSILES EST POSSIBLE MAIS PAS SANS SURCOÛT

L'hydrogène pourrait se substituer entièrement aux énergies fossiles, mais non sans poser certains défis techniques ni renchérir le coût de certains produits et services. Dans un livre publié en 2002, Jérémy Rifkin théorise « l'économie hydrogène », une économie dont le carburant principal est l'hydrogène et non plus le pétrole¹⁵. Mais l'hydrogène dont parle Rifkin dans ce livre est produit par électrolyse, ce qui limite son potentiel « révolutionnaire », puisqu'un vecteur d'énergie ne peut véritablement se substituer à une énergie primaire. La découverte d'hydrogène naturel à l'état pur change complètement la donne et rend l'avènement d'une « véritable » économie de l'hydrogène possible. La transition vers une économie de l'hydrogène constitue toutefois un défi de taille. Dans la majorité des cas, l'hydrogène ne se substitue pas simplement aux combustibles ou carburants fossiles dans les infrastructures, moteurs et équipements actuels et le développement de nouveaux produits adaptés est nécessaire. En outre, au niveau de maturité actuel des technologies, les *green premium* (écart de coût entre l'usage décarboné et l'usage carboné¹⁶) peuvent être particulièrement élevées. Asterès présente dans les sous-parties suivantes les différents usages qui pourraient composer

¹² Gaucher et al.

¹³ « Global Average Levelised Cost of Hydrogen Production by Energy Source and Technology, 2019 and 2050 – Charts – Data & Statistics ».

¹⁴ « Stratégie nationale pour le développement de l'hydrogène décarboné en France ».

¹⁵ Rifkin, *The Hydrogen Economy*.

¹⁶ « The Green Premium | Breakthrough Energy ».

une économie de l'hydrogène. Les informations présentées dans les paragraphes suivants proviennent essentiellement des analyses de l'AIE¹⁷.

2.2 INDUSTRIE : L'HYDROGÈNE EST INDISPENSABLE POUR RÉDUIRE LES ÉMISSIONS

L'hydrogène est indispensable pour décarboner l'industrie lourde. Aujourd'hui, l'hydrogène est principalement utilisé pour le raffinage des hydrocarbures, la production d'ammoniac et de méthanol, et la production de fer et d'acier. Décarboner cet hydrogène qui sert aujourd'hui à l'industrie permettrait déjà de diminuer les émissions du secteur de l'industrie. Dans un deuxième temps, l'hydrogène pourrait se substituer au gaz naturel pour la production de chaleur à haute température (>400°C). Dans la sidérurgie, la décarbonation complète du secteur serait facilitée en favorisant la réduction directe, aujourd'hui minoritaire, aux hauts fourneaux. Les *green premium* dépendraient essentiellement du coût de l'hydrogène décarboné par rapport aux énergies substituées, sauf pour la production de chaleur où les défis techniques à relever sont plus importants.

2.3 TRANSPORT ROUTIER : LES VÉHICULES À HYDROGÈNE SONT PROMETTEURS MAIS LES COÛTS SONT ENCORE RELATIVEMENT ÉLEVÉS

Pour le transport routier, les véhicules à hydrogène apparaissent très prometteurs, malgré des *green premium* encore relativement élevés. Les véhicules à hydrogène (moteur électrique alimenté par une pile à combustible, elle-même alimentée par de l'hydrogène) bénéficient d'une meilleure autonomie que les véhicules à batterie électrique et le plein d'hydrogène est plus rapide que la recharge des batteries. Pour l'instant, les véhicules décarbonés coûtent plus cher que les véhicules à moteur thermique, et les véhicules à hydrogène apparaissent comme l'option la plus coûteuse parmi les véhicules décarbonés. Les avantages relatifs des véhicules à hydrogène se renforcent pour les véhicules lourds et sur les longues distances, les batteries électriques devenant moins viables (à cause du poids des batteries et du temps de recharge).

2.4 TRANSPORT FERROVIAIRE : LES TRAINS À HYDROGÈNE APPARAISSENT COMPÉTITIFS DANS CERTAINES CONDITIONS

Pour le transport ferroviaire, l'hydrogène semble indispensable pour finaliser la décarbonation. Les trains à hydrogène sont en concurrence avec les trains à batteries électriques pour décarboner les lignes peu empruntées pour lesquelles l'investissement dans des lignes électriques serait peu rentables. Pour les mêmes raisons que pour les véhicules routiers, l'hydrogène apparaît particulièrement compétitif pour les longues distances. Pour les plus courtes lignes, la compétitivité de l'hydrogène par rapport aux batteries électriques dépendra du coût des piles à combustible. Les données sur les *green premium* n'ont pu être consultées pour ces technologies.

2.5 TRANSPORT MARITIME ET AVIATION : LES CARBURANTS À BASE HYDROGÈNE SEMBLent INDISPENSABLES MALGRÉ DES COÛTS ÉLEVÉS

Pour le transport maritime et l'aviation, l'hydrogène apparaît comme l'alternative la plus viable pour des volumes importants mais les *green premium* sont très élevés. L'hydrogène peut servir à la production d'e-carburants (ou carburants synthétiques) neutres en carbone, ou peut être utilisé directement en tant que carburant sous forme d'ammoniac. Pour l'aviation, les e-carburants pourraient purement et simplement se substituer au kérosène, sans besoin d'adaptation des infrastructures ou de la flotte, mais pour un coût du carburant quatre à six fois plus élevé. Pour le transport maritime, l'utilisation d'e-carburant ou d'ammoniac pourrait nécessiter de changer entièrement la flotte et de repenser la logistique, ce qui a un coût, sans compter le coût des carburants. Dans l'ensemble, ces méthodes restent plus prometteuses que les biocarburants (dont le volume est limité par la disponibilité des biodéchets et des terres cultivables)

¹⁷ « The Future of Hydrogen ».

et les batteries électriques (dont le poids et le temps de recharge sont problématiques sur des trajets aussi longs et pour des véhicules aussi lourds).

2.6 CHAUFFAGE RÉSIDENTIEL : UNE ALTERNATIVE POSSIBLE AU GAZ OU AUX POMPES À CHALEUR

Pour le chauffage résidentiel, l'hydrogène pourrait constituer une alternative à l'électrification, ou un mode alternatif d'électrification. Les infrastructures actuelles pourraient être réemployées pour distribuer de l'hydrogène, ce qui nécessiterait d'équiper les bâtiments en piles à combustible ou brûleurs à hydrogène. Les *green premium* sur ces équipements n'ont pu être évaluées pour cette note.

2.7 PRODUCTION D'ÉLECTRICITÉ : UNE SOLUTION DE STOCKAGE, VOIRE UNE ALTERNATIVE AUX ENR INTERMITTENTES

Pour la production d'électricité, l'hydrogène pourrait constituer une nouvelle source d'énergie. L'hydrogène pourrait alimenter des centrales à piles à combustible, ou des centrales à gaz à cycle combiné. L'avantage de la deuxième option est que ces centrales existent déjà : il suffirait de les adapter et de les alimenter à l'hydrogène plutôt qu'au gaz naturel et les coûts hors combustible seraient les mêmes. C'est peut-être la seule technologie pour laquelle le passage à l'hydrogène n'implique à ce jour pas de *green premium* – hors coût de transition.

3. PROSPECTIVE : VERS UNE BAISSÉ DU COÛT DE LA TRANSITION, UNE LIBÉRATION DES CAPACITÉS, VOIRE UN ÉLARGISSEMENT DE L'OFFRE ?

3.1 MÉTHODE : ANALYSE DE TROIS SCÉNARIOS DE DISPONIBILITÉ DE L'HYDROGÈNE VERT

Trois scénarios ont été établis par Asterès où l'hydrogène naturel serait disponible à un coût inférieur à 1€/kg, en plus ou moins grande quantité. L'inconnue majeure étant la quantité d'hydrogène naturel accessible dans des conditions similaires au gaz naturel, Asterès imagine trois scénarios de disponibilité de la ressource et en analyse les impacts économiques potentiels. Dans le premier scénario, la quantité disponible permet à l'hydrogène naturel de se substituer à l'hydrogène que l'on pensait produire à partir d'électrolyse. Dans le deuxième scénario, la quantité disponible permet d'utiliser l'hydrogène pour produire de l'électricité en se substituant aux énergies renouvelables ou au nucléaire. Dans le troisième scénario, l'hydrogène naturel est si abondant que l'énergie consommée par la société augmente. Notons qu'aucune temporalité n'a été intégrée à cette partie prospective, faute d'éléments concrets pour estimer le potentiel délai potentiel de déploiement de cette nouvelle ressource.

3.2 SCÉNARIO 1 : LE VOLUME DISPONIBLE PERMET À L'HYDROGÈNE NATUREL DE SE SUBSTITUER À L'HYDROGÈNE VERT OU BLEU

Dans le premier scénario, une énergie primaire (l'hydrogène naturel) se substitue à un vecteur d'énergie (l'hydrogène vert), entraînant une baisse du coût de l'hydrogène et libérant de l'électricité qui pourrait être économisée ou utilisée pour d'autres usages. Dans ce scénario, l'hydrogène naturel se substitue à l'hydrogène que l'on pensait produire à partir d'électrolyse, entraînant une baisse du coût de l'hydrogène et rendant les électrolyseurs obsolètes. Cette baisse du coût de l'hydrogène ne ferait pas entièrement disparaître les *green premium* sur tous les usages évoqués précédemment (sur le court à moyen terme en tout cas), car le carburant n'est pas la seule composante du coût. De prochains travaux pourraient estimer les baisses de coûts à partir des données sur la décomposition des coûts de chaque technologie. En outre, la filière hydrogène ne consommerait plus d'électricité – en France, RTE prévoit que 8%

de la consommation d'électricité, soit 50 TWh, serait utilisée pour produire de l'hydrogène par électrolyse¹⁸. Cette électricité pourrait être économisée ou utilisée pour d'autres usages. Économiser de l'électricité serait intéressant dans un contexte de tension sur la production et les réseaux d'électricité. Sinon, l'électricité libérée pourrait être notamment utilisée pour la réparation des émissions passées *via* la captage atmosphérique du carbone.

3.3 SCÉNARIO 2 : LE VOLUME DISPONIBLE PERMET À L'HYDROGÈNE NATUREL DE SE SUBSTITUER À L'ÉOLIEN, AU SOLAIRE, VOIRE AU NUCLÉAIRE

Dans le deuxième scénario, une énergie primaire (l'hydrogène naturel) se substitue à d'autres énergies primaires (l'éolien, le solaire ou le nucléaire), entraînant une baisse du coût de l'électricité. Dans ce scénario, l'hydrogène naturel serait utilisé pour produire de l'électricité à bas coût et aurait l'avantage d'être pilotable (contrairement aux EnR intermittentes) et stockable (contrairement au nucléaire). Étant donné que le prix de l'électricité d'origine nucléaire devrait passer à 70€/MWh en 2026¹⁹, l'hydrogène pourrait devenir l'option la moins coûteuse, l'électricité produite par les centrales à gaz conventionnelles présentant des coûts médians de l'ordre de 60€/MWh²⁰, sachant que le coût de l'hydrogène devrait être inférieur à celui du gaz naturel. Des recherches plus approfondies méritent toutefois d'être conduites sur le coût de l'électricité produite à partir d'hydrogène naturel et le coût du nucléaire nouveau. Au-delà du coût, l'hydrogène aurait l'avantage par rapport au nucléaire d'être stockable, et serait ainsi particulièrement utile pour passer la pointe de demande. Les *green premium* seraient abaissées davantage que dans le premier scénario, mais Asterès n'est pas en mesure de conclure sur leur disparition complète ou non.

3.4 SCÉNARIO 3 : LE VOLUME DISPONIBLE PERMET UN ÉLARGISSEMENT DE L'OFFRE D'ÉNERGIE

Dans le troisième scénario, l'hydrogène naturel est si abondant que de nouvelles entreprises économiques deviennent rentables et se développent. Dans ce scénario, l'hydrogène augmente l'offre d'énergie en plus d'en diminuer son coût, ouvrant de nouvelles perspectives. Ce scénario est en rupture avec la perspective actuelle de baisse de la consommation d'énergie. Des activités jugées jusqu'alors trop énergivores pourraient être envisagées, comme le captage massif du carbone dans l'atmosphère, la désalinisation de l'eau de mer ou encore l'exploitation des astéroïdes.

4. CONCLUSION : FAUT-IL RÉORIENTER LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE ?

À l'état actuel des connaissances, la meilleure stratégie est d'investir massivement dans la recherche sur l'hydrogène naturel en parallèle de la poursuite de la transition énergétique. L'espoir que représente l'hydrogène naturel est trop important pour ne pas être pris au sérieux le plus tôt possible. Il faut donc investir dès maintenant dans l'hydrogène naturel, à tous les niveaux : de la recherche fondamentale (pour approfondir la compréhension des phénomènes géologiques et être en mesure de cartographier et estimer les flux) aux usages finaux (pour préparer « l'économie hydrogène » qui marquera peut-être un tournant dans l'histoire de l'humanité). Rien de cela ne doit remettre en cause la transition énergétique en cours. Attendre que les réserves et puits d'hydrogène soient mieux connus pour trancher sur la trajectoire à prendre dans l'espoir de minimiser le coût de la transition serait trop risqué. Dans le cas où les recherches aboutiraient à des résultats décevants, ce seraient une dizaine d'années qui auraient été perdues. Et même si les espoirs se matérialisaient un jour, l'horizon d'une telle révolution est trop lointain : le défi en termes de déploiement serait considérable pour atteindre l'objectif de neutralité carbone en 2050. À moins de remettre en cause cet objectif, l'option la plus raisonnable est de continuer à déployer l'hydrogène vert, les énergies renouvelables et le nucléaire nouveau, quitte à ce que l'hydrogène naturel prenne progressivement le relais à mi-parcours (dans le meilleur des cas) ou après 2050.

¹⁸ « Bilan prévisionnel long terme "Futurs énergétiques 2050" ».

¹⁹ « Energie ».

²⁰ Haeusler et al., « Coûts des énergies renouvelables et de récupération en France ».

5. BIBLIOGRAPHIE

- « Bilan prévisionnel long terme “Futurs énergétiques 2050” ». RTE, janvier 2021. <https://assets.rte-france.com/prod/public/2021-01/Bilan%20Previsionnel%202050-consultation-complet.pdf>.
- Ellis, Geoffrey, et Alex Demas. « The potential for geologic hydrogen for next-generation energy », 13 avril 2023. <https://www.usgs.gov/news/featured-story/potential-geologic-hydrogen-next-generation-energy>.
- « Energie : un nouvel accord sur le prix de l'électricité nucléaire | vie-publique.fr », 23 novembre 2023. <http://www.vie-publique.fr/en-bref/291910-energie-un-nouvel-accord-sur-le-prix-de-lelectricite-nucleaire>.
- Gaucher, Eric C., Isabelle Moretti, Nicolas Péliissier, Glen Burridge, et Nicolas Gonthier. « The place of natural hydrogen in the energy transition: A position paper », 30 juin 2023. <https://doi.org/10.5281/ZENODO.8108239>.
- Haeusler, Laurence, Gérard Gié, Débora Moreira, Thierry Badouard, et Morgan Crenes. « Coûts des énergies renouvelables et de récupération en France ». ADEME, 2020. <https://librairie.ademe.fr/energies-renouvelables-reseaux-et-stockage/765-couts-des-energies-renouvelables-et-de-recuperation-en-france-9791029713644.html>.
- « Hidden Hydrogen: Earth May Hold Vast Stores of a Renewable, Carbon-Free Fuel ». Consulté le 6 décembre 2023. <https://www.science.org/content/article/hidden-hydrogen-earth-may-hold-vast-stores-renewable-carbon-free-fuel>.
- IEA. « Global Average Levelised Cost of Hydrogen Production by Energy Source and Technology, 2019 and 2050 – Charts – Data & Statistics ». Consulté le 6 décembre 2023. <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/global-average-levelised-cost-of-hydrogen-production-by-energy-source-and-technology-2019-and-2050>.
- Nouvelle, L'Usine. « De l'hydrogène blanc dans le bassin houiller lorrain », 5 juin 2023. <https://www.usinenouvelle.com/article/de-l-hydrogene-blanc-dans-le-bassin-houiller-lorrain.N2139617>.
- Prinzhofer, Alain, et Éric Deville. *Hydrogène naturel: la prochaine révolution énergétique ?* Paris: Belin, 2015.
- Rifkin, Jeremy. *The Hydrogen Economy: The Creation of the World-Wide Energy Web and the Redistribution of Power on Earth*. Reprinted. Oxford: Polity, 2003.
- « Stratégie nationale pour le développement de l'hydrogène décarboné en France ». Dossier de presse, 8 septembre 2020. https://minefi.hosting.augure.com/Augure_Minefi/r/ContenuEnLigne/Download?id=5C30E7B2-2092-4339-8B92-FE24984E8E42&filename=DP%20-%20Strat%C3%A9gie%20nationale%20pour%20le%20d%C3%A9veloppement%20de%20l%27hydrog%C3%A8ne%20d%C3%A9carbon%C3%A9%20en%20France.pdf.
- « The Future of Hydrogen ». Agence internationale de l'Énergie, s. d. <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen>.
- « The Green Premium | Breakthrough Energy ». Consulté le 6 décembre 2023. <https://breakthroughenergy.org/our-approach/the-green-premium/>.
- Zgonnik, Viacheslav. « The Occurrence and Geoscience of Natural Hydrogen: A Comprehensive Review ». *Earth-Science Reviews* 203 (avril 2020): 103140. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103140>.

CONTACTS

Guillaume MOUKALA SAME | gmoukalasame@asteres.fr

Asterès est un cabinet d'études économiques et de conseil.

Nous proposons aux entreprises et au secteur public des outils de réflexion pour orienter l'action. Notre mission est de mettre l'expertise économique au service du développement de nos clients. Ainsi, nous donnons à l'analyse économique son rôle opérationnel.

NOUS CONTACTER

contact@asteres.fr

A S T E R è S
études, recherche & conseil économique