

N°02

Le 3,14

 Polytechnique insights

Hydrogène et transports,
les 7 choses à savoir

L'HYDROGÈNE

Pour l'effet de mode,
ou contre l'effet de serre ?

Pourquoi l'hydrogène
est-il émetteur de CO₂ ?

INÉDIT

Les promesses de
l'hydrogène turquoise

La solution pour
décarboner les transports ?



Clément Boule

Directeur exécutif
de Polytechnique Insights

La science et les technologies se mobilisent pour contribuer à la décarbonation des activités humaines. Parmi les solutions au rayon de l'énergie, l'hydrogène a le vent en poupe. Tiendra-t-il ses promesses ? Rien n'est moins sûr quand on sait que 99 % de la production mondiale est d'origine carbonée.

Pour autant, certaines technologies comme l'hydrogène turquoise semblent très prometteuses. Mais à quel horizon ? Des incertitudes subsistent. Comme il est de rigueur en science, tout comme en projections futures, restons prudents, nuancés et admettons que nous ne savons pas tout, bien au contraire. C'est toute la difficulté des politiques énergétiques : il faut anticiper et décider sans disposer de l'ensemble des données.

Dans ce deuxième numéro du 3,14, nous vous proposons une sélection d'articles qui permettront d'éclairer les enjeux de l'hydrogène, avec un coup de projecteur particulier sur les transports, à travers la parole de chercheurs et d'experts internationaux.



Polytechnique insights

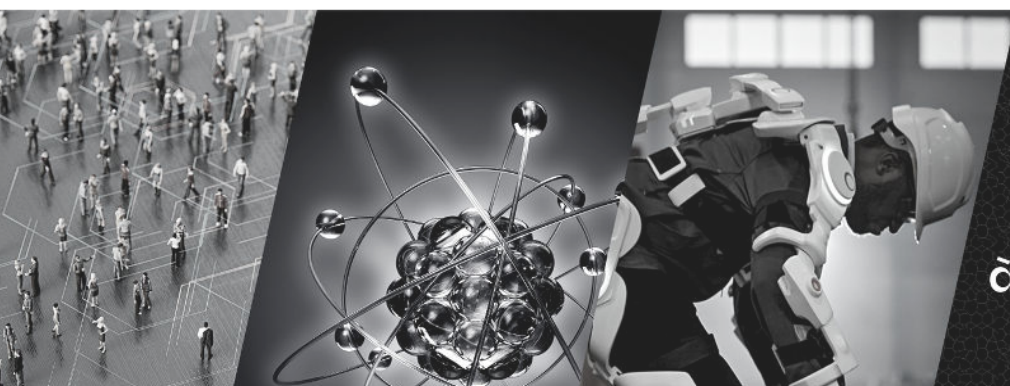
LA REVUE DE L'INSTITUT POLYTECHNIQUE DE PARIS

[Articles](#)

[Dossiers](#)

[Vidéos](#)

[La newsletter](#)



Comprendre les
grands enjeux,
à travers la science

Cadrage

L'hydrogène : pour l'effet de mode ou contre l'effet de serre ? 4

Cécile Michaut, journaliste scientifique

Infographie : "Les couleurs de l'hydrogène" 7

Polytechnique Insights



(Dé)Carboné ?

Pourquoi l'hydrogène est-il émetteur de CO₂ ? 9

Didier Dalmazzone, professeur en chimie et procédés à l'ENSTA Paris (IP Paris)

L'hydrogène turquoise, une solution viable sans CO₂ ? 12

Laurent Fulcheri, directeur de recherche au Centre PERSEE de MINES-ParisTech



Carburant ?

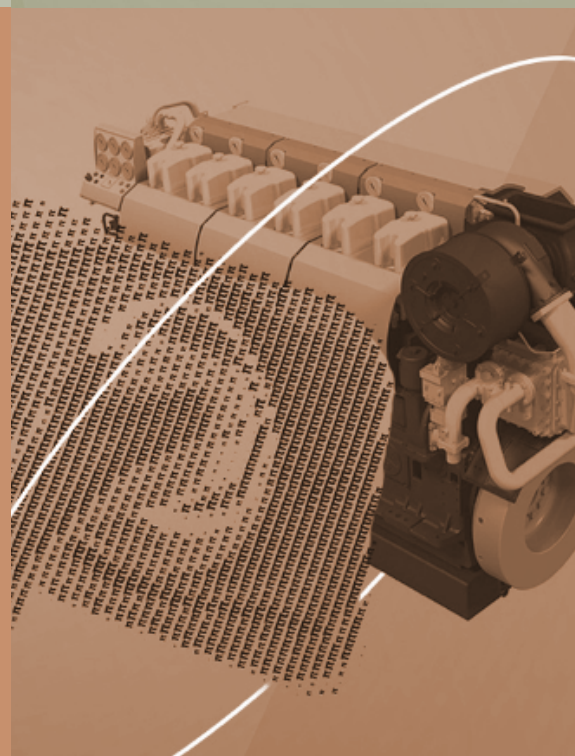
Les 7 choses à savoir sur l'hydrogène dans les transports 18

Aurélien Bigo, chercheur associé de la Chaire Énergie et Prospérité à l'Institut Louis Bachelier

INÉDIT

Moteur à hydrogène : indispensable pour décarboner les transports ? 24

François Kalaydjian, directeur de la Direction Economie & Veille et Coordinateur Hydrogène d'IFP Energies nouvelles (IFPEN), et autres



PREMIÈRE PARTIE

Cadrage

L'hydrogène est à la mode, mais pourquoi ? Voici quelques éléments de cadrage pour mieux comprendre le sujet.



Hydrogène : pour l'effet de mode ou contre l'effet de serre ?

08 juillet 2021 5 min. de lecture

L'hydrogène est à la mode. Certains États et certaines entreprises placent en cet élément chimique beaucoup d'espoir pour lutter contre le réchauffement climatique, et remplacer à terme les énergies fossiles. Pas une semaine, ou presque, sans une annonce enthousiaste concernant ce gaz comme vecteur d'énergie : un bus à hydrogène pour la compagnie Transdev, un véhicule utilitaire à hydrogène et pile à combustible dévoilé par Citroën en 2021 ou bien encore un réseau d'hydrogène transfrontalier entre la France, l'Allemagne, et le Luxembourg.

Il faut dire qu'à première vue, il a tout pour plaire. Lorsqu'on le brûle ou qu'on le consomme à l'aide d'une pile à combustible, on récupère de l'énergie thermique ou électrique, et de l'eau, sans produire de polluants. Pourtant, sa production actuelle est très émettrice de carbone, et pour qu'il devienne une énergie verte, il faudra réaliser de gros investissements en R&D combinés à de fortes incitations réglementaires.

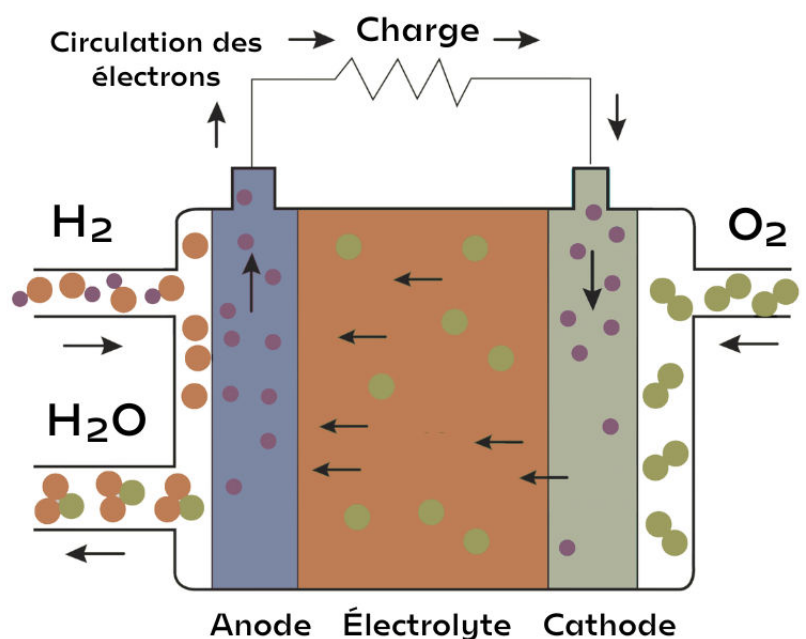
La production d' H_2 émet du CO_2

Si l'hydrogène est le constituant majoritaire de l'univers, sur Terre les atomes d'hydrogène n'existent presque pas à l'état de gaz de H_2 pur. On ne peut donc pas s'en servir comme source, mais on peut néanmoins l'utiliser comme vecteur d'énergie, tel que l'électricité. Cela signifie qu'il doit être produit à partir d'autres énergies potentiellement émettrices de CO_2 .

Aujourd'hui, l'hydrogène issu du reformage du méthane, une méthode de production émettrice de CO_2 , coûte environ 1 € par kilo, contre 4 à 6 € par kilo lorsqu'il est produit par électrolyse. Loi du marché oblige, 95 % de l'hydrogène est donc produit par reformage (voir l'encadré « Un peu de chimie pour comprendre l'hydrogène »).

Les 5 % restants, produits par électrolyse, pourraient être verts à condition que l'électricité utilisée soit elle-même décarbonée (renouvelable ou nucléaire), ce qui n'est pas toujours le cas (notamment avec les centrales à charbon). ▶

Pile à combustible à oxyde solide



70 millions de tonnes d'hydrogène sont produites par an dans le monde, entraînant l'émission de 830 millions de tonnes de CO₂, soit 2 % des émissions mondiales, un taux comparable à celui du secteur aérien.

Alors pourquoi cet engouement ? Parce qu'à terme, il semble être l'un des substituts possibles aux énergies fossiles. Des industries aujourd'hui très émettrices de CO₂, comme la métallurgie ou la verrerie, pourraient en bénéficier. En principe, il pourrait aussi permettre une révolution dans le secteur des transports : les véhicules à hydrogène n'émettant pas de polluant au moment où le carburant est consommé, leur généralisation pourrait limiter la pollution des villes.

Enfin, le mix énergétique du futur pourrait compter sur l'hydrogène pour stocker l'électricité produite par les énergies renouvelables intermittentes (éolienne, solaire).

Stockage, sécurité, coût... des défis à surmonter

Difficile de faire des prospectives fiables tant le futur de l'hydrogène dépendra de nombreux facteurs : coût et disponibilité des énergies fossiles, réglementation des émissions de CO₂, incitations financières aux énergies propres.

Néanmoins, on peut retenir quatre débouchés principaux pour l'H₂ : l'optimisation du réseau électrique lorsque celui-ci accueille beaucoup d'énergies intermittentes, l'auto-consommation locale pour les zones non connectées au réseau électrique, le développement de véhicules électriques à hydrogène, et enfin l'industrie.

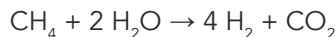
« La production d'hydrogène représente 2 % des émissions mondiales de CO₂. »

Certes, ce gaz est utilisé depuis des décennies dans l'industrie (essentiellement pour la pétrochimie, les aciéries et la production d'engrais azotés) : on sait le produire, le transporter dans des pipelines, et l'utiliser en toute sécurité. Pourtant, les problèmes posés par l'hydrogène-énergie sont nombreux et complexes.

Comment le produire de manière économique et peu polluante ? Comment l'utiliser de manière sûre au quotidien, et plus seulement dans l'industrie ? Comment le stocker dans les voitures, les bus ou les avions, sachant qu'il doit être conservé sous haute pression ? Comment adapter les infrastructures si les tuyaux de gaz actuels ne suffisent pas ? Comment améliorer les rendements de conversion énergétique ? ▶

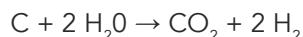
Un peu de chimie pour comprendre la production d'hydrogène

Le reformage du méthane consiste à faire réagir du méthane (gaz naturel) avec de la vapeur d'eau, en présence d'un catalyseur. L'équation de la réaction chimique montre que la production de CO₂ est inévitable par cette méthode :



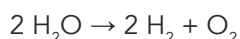
On produit donc 1 molécule de CO₂ pour 4 molécules d'hydrogène (pour être chimiquement exact, on devrait parler de molécule de dihydrogène).

La production d'hydrogène à partir de charbon est encore pire :



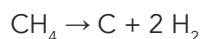
On ne produit que deux molécules d'hydrogène pour une molécule de CO₂.

En revanche, l'électrolyse de l'eau ne produit pas de CO₂ :



Mais cette réaction est fortement consommatrice d'électricité.

La pyrolyse du méthane consomme quant à elle du méthane, mais ne produit pas de CO₂ contrairement au reformage. Elle nécessite tout de même de l'électricité, mais 4 à 7 fois moins que l'électrolyse :



Car, nous l'avons dit, l'hydrogène est avant tout un moyen de stocker l'électricité. Dans le cas des énergies renouvelables, par exemple, la production d'électricité en période de grand vent ou de grand soleil par les éoliennes et les panneaux photovoltaïques ne correspond pas toujours à la consommation.

Il faut donc pouvoir stocker cette électricité, mais les batteries actuelles sont surtout adaptées au stockage à court terme. Les promoteurs de l'hydrogène suggèrent donc d'utiliser cette électricité pour produire de l'hydrogène par électrolyse, stocker cet hydrogène aussi longtemps qu'on le souhaite, puis convertir cet hydrogène en électricité grâce à une pile à combustible.

Mais pour le moment, le rendement global n'est que de 25 %. Peut-on se permettre de gâcher les trois quarts de l'électricité produite ?

Tous ces défis ne pourront être relevés qu'à deux conditions. Tout d'abord, un effort de R&D sans précédent, pour lever les freins techniques. Mais également des incitations financières : à ce stade, et compte tenu des coûts de production, on voit difficilement comment l'hydrogène vert par électrolyse pourrait prendre des parts de marché sans que les entreprises ne soient incitées à le produire aux dépens des modes de production carbonés. ■

Cécile Michaut

Pour aller plus loin sur le sujet :

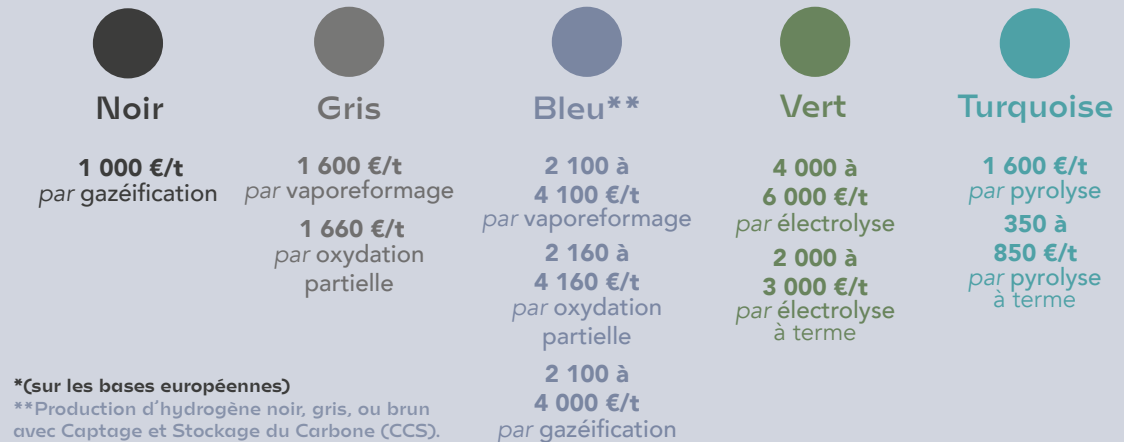
- [Le rapport de l'Agence internationale de l'énergie sur l'hydrogène \(juin 2019\)](#)
- [Le rapport de l'Ademe sur l'hydrogène comme vecteur d'énergie \(août 2020\)](#)
- [« Le rôle de l'hydrogène dans une économie décarbonée » par l'Académie des technologies, novembre 2020](#)
- [La stratégie nationale pour le développement de l'hydrogène décarboné en France](#)

Les couleurs de l'hydrogène

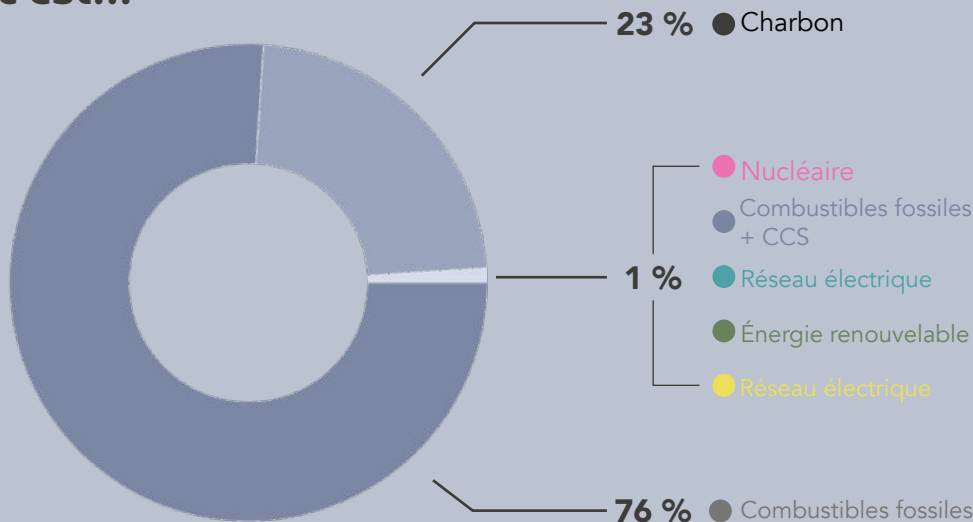
L'impact environnemental de l'hydrogène varie beaucoup, car il provient principalement du moyen de production. Bien que ce ne soit pas parfait, pour aider à les distinguer, un code couleur leur a été attribué. Voici quelques éléments pour mieux comprendre leurs différences.

Source : Note scientifique N° 4098 à l'ASSEMBLÉE NATIONALE et N° 536 au SÉNAT, d'avril 2021

Le coût* de production de l'hydrogène, c'est...



La production d'hydrogène, c'est...



75 millions



de tonnes chaque année

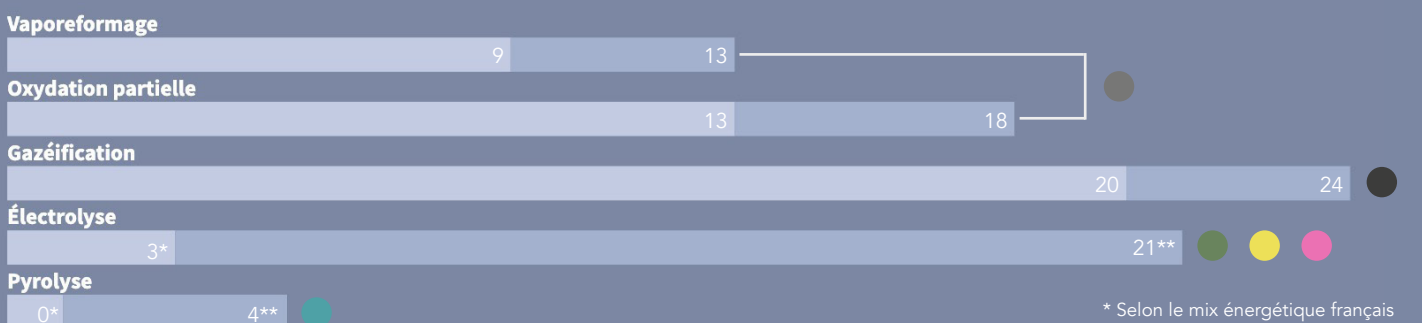
1 milliard



de tonnes de CO₂ chaque année

Le taux de CO₂ (en tonnes) émis par tonne d'hydrogène produite, c'est...

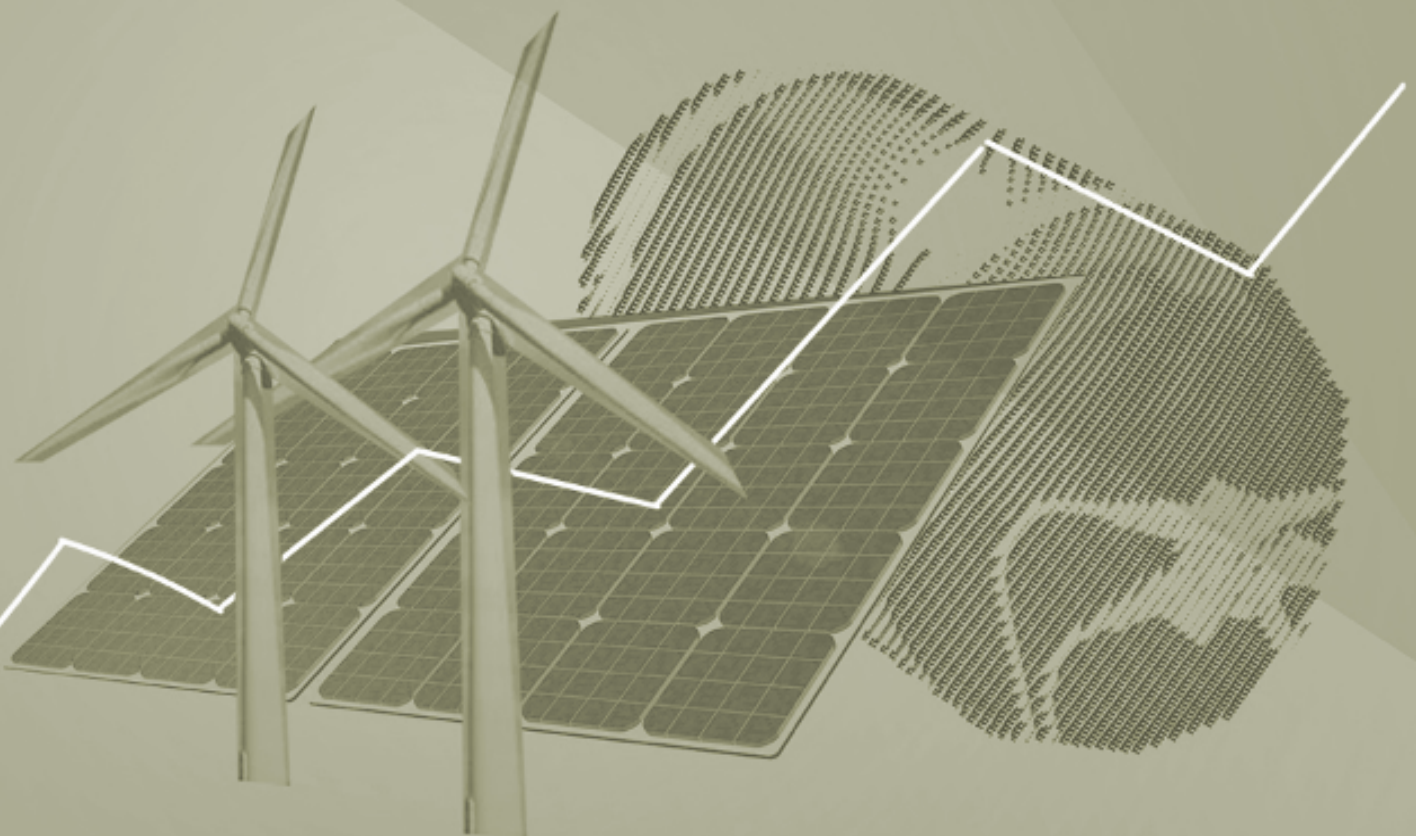
■ Émissions de CO₂ (minimum) ■ Émissions de CO₂ (maximum)



DEUXIÈME PARTIE

(Dé)Carboné ?

L'hydrogène nous est promis comme étant une solution pour la transition énergétique. Mais cette énergie est-elle réellement décarbonée ?



L'hydrogène est-il émetteur de CO₂ ?

08 juillet 2021 👁 5 min. de lecture

par Didier Dalmazzone



Par « hydrogène gris », on entend l'hydrogène produit à partir de combustibles fossiles. C'est le mode de production qui est, de très loin, le plus employé pour produire l'hydrogène aujourd'hui. C'est aussi celui qui présente le bilan carbone le plus défavorable.

Loin de son potentiel futur comme vecteur d'énergie, l'hydrogène sert actuellement surtout de matière première dans l'industrie, que ce soit dans le raffinage pétrolier pour l'hydrocraquage et la désulfuration des carburants (environ 44 % de la demande), dans la synthèse d'ammoniac pour les engrais azotés (38 %), pour la production de certains produits chimiques (8 %), ou encore dans l'industrie alimentaire et diverses autres applications (10 %). Ces besoins, qui représentent 75 millions de tonnes d'hydrogène par an à l'échelle mondiale, sont donc couverts à 48 % par le procédé de reformage du gaz naturel, à 30 % à partir d'hydrocarbures pétroliers et à 18 % par gazéification du charbon. Cette production s'accompagne de l'émission d'un milliard de tonnes de CO₂ chaque année. L'électrolyse de l'eau, beaucoup moins carbonée – mais tout dépend du mix électrique utilisé – couvre à ce jour moins de 5 % de la demande. ►

Pourquoi les combustibles fossiles ?

Dans tous les cas, la fabrication d'hydrogène passe par la décomposition de la molécule d'eau, une opération qui demande une grande quantité d'énergie : 121 mégajoules pour produire 1 kg d'hydrogène. Dans les procédés conventionnels, une partie de cette énergie est apportée par la réaction d'un combustible avec de la vapeur d'eau à haute température. Le mélange de combustible et d'eau est alors converti par la réaction de reformage en un mélange de monoxyde de carbone (CO) et d'hydrogène.

Cette opération demande néanmoins l'apport d'un complément d'énergie, qui est apporté par la combustion de fuel ou de gaz afin de maintenir le réacteur de reformage à la bonne température opérationnelle. Après cette première étape, il est nécessaire de recourir à une opération de « water gas shift » (réaction du gaz à l'eau) afin de convertir le CO, très toxique, en CO₂ par réaction avec de la vapeur d'eau à moyenne température.

Au bilan, on constate que du CO₂ est généré en grande quantité aux différentes étapes du procédé : conversion du CO issu du reformeur, combustion de fuel pour la production de vapeur et pour l'apport énergétique dans le reformeur. Pour chaque tonne d'hydrogène produite, ce sont ainsi près de 12 tonnes de CO₂ qui sont libérées dans l'atmosphère.

« 1 tonne d'hydrogène produite, 12 tonnes de CO₂ libérées. »

Si le reformage des combustibles fossiles reste, malgré son bilan carbone exécrable, le procédé le plus utilisé, c'est en raison d'un avantage décisif en matière de coûts. L'hydrogène issu du reformage de gaz naturel en grand volume coûte environ 1,5 €/kg, là où celui produit par électrolyse de l'eau revient à 6 €/kg. Notons néanmoins que, même au coût le plus bas, l'hydrogène revient encore 3 fois plus cher que le gaz naturel à quantité d'énergie équivalente.

En plus des problèmes de prix de revient et d'émissions de GES, l'hydrogène souffre de capacités de productions encore très insuffisantes pour représenter à ce jour une solution viable pour la transition énergétique. En effet, si elle était consacrée intégralement à la conversion d'énergie, la production mondiale actuelle d'hydrogène couvrirait à peu près 214 Mtep (millions de tonnes équivalent pétrole). Or, la demande mondiale annuelle d'énergie est de 14,5 Gtep (milliards de tep).

Ainsi, il faudrait accroître la production d'un facteur 14 pour que l'hydrogène puisse couvrir 20 % de la consommation énergétique mondiale. Pour que cela ait un sens, il est évident que cela ne pourra pas se faire avec de l'hydrogène gris ! ■



Didier Dalmazzone
Professeur en chimie et procédés à
l'ENSTA Paris (IP Paris)

Didier Dalmazzone

Découvrez d'autres articles de Didier Dalmazzone :

- [Limiter le changement climatique en capturant le CO₂ : rêve ou réalité ?](#)
- [Pourquoi est-il si difficile de capter le CO₂ directement dans l'atmosphère ?](#)

Conversion énergétique de l'hydrogène

L'hydrogène est un composé très versatile, qui peut être converti en énergie de différentes manières :

- **Sous forme thermochimique, par réaction avec des réactifs appropriés.** On obtient alors une énergie potentielle, aisément stockable sur de longues durées et utilisable à la demande. Par le procédé Sabatier, en utilisant du CO_2 comme réactif, on obtient du méthane synthétique qui peut ensuite servir de combustible pour l'industrie et les transports ou être injecté dans les réseaux. Ce concept est connu sous le vocable « power to gas », dans le cas où l'hydrogène utilisé provient de l'électrolyse de l'eau. Par le procédé Fischer-Tropsch, on obtient des combustibles liquides (« power to liquids »). Par le procédé Haber-Bosch on obtient, en combinant l'hydrogène avec l'azote de l'air, de l'ammoniac facilement stockable et qui peut lui-même servir de combustible.
- **Sous forme de chaleur et de travail mécanique, par combustion dans l'air ou avec l'oxygène pur.** C'est notamment le principe du moteur-fusée, utilisé sur certains étages des fusées Ariane. Cette solution fait partie des moyens envisagés pour propulser les futurs avions à hydrogène. L'hydrogène peut également être additionné en quantité limitée aux combustibles conventionnels, dans les réseaux de gaz naturel ou pour alimenter les moteurs à combustion interne.
- **Sous forme de chaleur et de travail électrique, par oxydation ménagée dans une pile à combustible (PàC).** Il existe aujourd'hui une grande variété de technologies de PàC, certaines très matures, d'autres tout juste parvenues au stade commercial, d'autres enfin, encore en développement. L'un des enjeux majeurs est d'optimiser le rendement électrique des PàC, qui se limite aux alentours de 60-65 % dans le meilleur des cas. Cela signifie que seule 60 à 65 % de l'énergie thermochimique transportée par le combustible est effectivement convertie en travail électrique, le reste étant perdu sous forme de chaleur. Si cette chaleur est produite à basse ou moyenne température (< 500 °C par exemple), elle est difficilement valorisable, alors que la chaleur produite à haute température (entre 700 et 1000 °C) peut être convertie en travail mécanique avec une bonne efficacité. C'est tout l'enjeu des piles à combustible à carbonates fondus (MCFC) ou à oxydes solides (SOFC). Quoique prometteuses pour certaines applications – fixes en général – ces technologies haute température en sont encore à un stade précoce de leur développement. Les PàC les plus employées sont celles à électrolyte liquide (solution alcaline ou acide) et à membranes échangeuses de protons (PEMFC pour « proton exchange membrane fuel cell »), qui travaillent à des températures modérées. Les PàC pour la mobilité appartiennent pour l'essentiel à cette dernière technologie, qui reste néanmoins coûteuse en raison des matériaux qu'elle utilise (membrane, catalyseur à base de platine).

On peut espérer que les recherches en cours et le développement d'un marché de masse permettront aux PàC de connaître des progrès comparables à ceux réalisés par les batteries, en termes de coûts et d'efficacité, et à l'hydrogène de trouver sa place dans la transition énergétique. ■

L'hydrogène turquoise : solution viable sans CO₂ ?

27 septembre 2022  9 min. de lecture

avec Laurent Fulcheri

Si l'utilisation de l'hydrogène-énergie est propre, sa production est le plus souvent très polluante, notamment en CO₂. Les solutions plus vertes, comme l'électrolyse, restent trop coûteuses, mais de nouvelles technologies efficaces et peu polluantes émergent, notamment la pyrolyse du méthane. Votre hydrogène, vous le préférez gris, bleu, vert ou turquoise ?

Comment produire cet hydrogène sans CO₂ ?

Aujourd'hui, on sait le faire grâce à l'électrolyse de l'eau, qui représente 5 % de la production mondiale d'hydrogène. C'est l'hydrogène dit « vert ». Il s'agit de décomposer l'eau en oxygène et en hydrogène, mais cela consomme beaucoup d'électricité. Et cette consommation est inévitable : la réaction chimique nécessite au minimum 40 kWh par kilo d'hydrogène produit, si l'on dispose d'électrolyseurs fonctionnant au rendement maximum.

Or, aujourd'hui, leur rendement est d'environ 60 %, ce qui signifie qu'aujourd'hui, produire 1 kg d'hydrogène consomme 60 kWh.

L'hydrogène dit « vert » peut être encore décliné en « rose » ou « jaune » si l'électricité utilisée est produite par des énergies renouvelables, nucléaire (toutes les deux faiblement émettrices de CO₂) ou d'origine mixte. Cette déclinaison pourrait également s'appliquer à la pyrolyse du méthane.

Quelles sont les options pour « verdir » la production d'hydrogène ?

L'une des options est de combiner le reformage du CO₂ avec la capture et le stockage du CO₂. Les scénarios montrent que cela multiplierait le coût de l'hydrogène par deux ou trois, soit un prix de 2 à 3 €/kg. Cet hydrogène est dit « bleu ». Celui issu du reformage du méthane est dit « gris », et celui provenant du charbon « noir ».

Mais il existe une autre voie. Les milieux politiques et industriels l'ont découverte récemment, mais elle n'est pas si nouvelle : j'ai travaillé toute ma carrière dessus, depuis 1995. Cette voie est dite « turquoise », elle utilise à la fois l'électricité et le méthane. Le principe est de décomposer le méthane par pyrolyse, à très haute température (1 000 à 2 000 °C).

On obtient ainsi du carbone et de l'hydrogène, mais pas de CO₂. À partir d'un kilo de méthane, on produit 250 g d'hydrogène et 750 g de noir de carbone, un produit à haute valeur ajoutée. Et surtout, cette réaction nécessite sept fois moins d'électricité que l'électrolyse de l'eau par quantité d'hydrogène produite (mais produit deux fois moins d'hydrogène que le reformage à l'eau par molécule de méthane). ▶



Laurent Fulcheri
Directeur de recherche au Centre
PERSEE de MINES-ParisTech

« Avec 10 % de biogaz, l'intensité carbone de l'hydrogène "turquoise" est nulle. »

Où en est la production industrielle d'hydrogène « turquoise » ?

Ce procédé de pyrolyse est en phase de développement industriel aux États-Unis, avec notre partenaire industriel américain Monolith Materials. Il a développé un pilote entre 2012 et 2017 en Californie, qui a été concluant, et qui l'a conduit à se lancer dans l'industrialisation. La première unité est aujourd'hui construite, et c'est la tête de série de 11 autres unités à venir. Les problèmes technologiques liés au changement d'échelle ont été résolus, et la première commercialisation est attendue dans les mois à venir.

Cette unité consommera 20 000 tonnes de gaz naturel, et produira 15 000 tonnes de noir de carbone ainsi que 5 000 tonnes d'hydrogène. Le modèle économique consistera, dans un premier temps, à valoriser le noir de carbone, utilisé à grande échelle dans l'industrie du pneu, et qui se vend environ 1 €/kg.

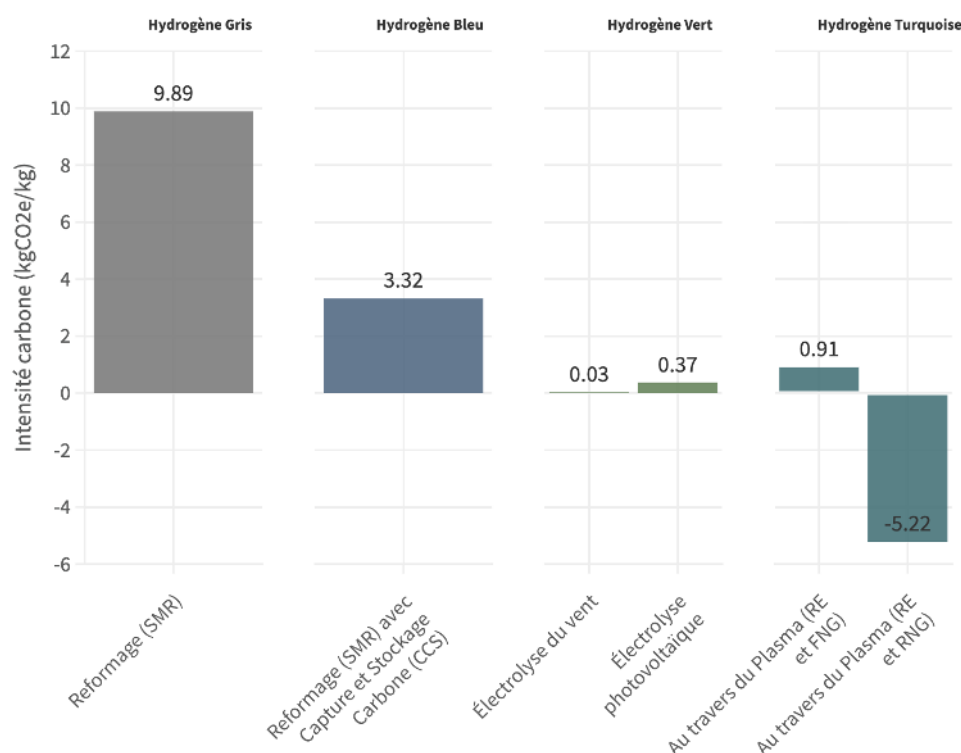
Un pneu contient environ 30 % de noir de carbone, qui permet d'augmenter la résistance à l'usure, aux ultraviolets, ou à la chaleur. Dans un second temps, l'hydrogène deviendra prépondérant économiquement.

Aujourd'hui, la technologie est optimisée pour la production de noir de carbone (on règle la température selon le grade de noir de carbone que l'on souhaite).

Demain, elle sera optimisée pour la production d'hydrogène, et il faudra développer de nouvelles applications des noirs de carbone, par exemple dans les matériaux de construction, les infrastructures routières, ou même dans les sols agricoles.

C'est moins coûteux et moins risqué que le stockage du CO₂ ! Mieux : si le méthane provient de biogaz (issu de la décomposition de matières organiques, dans des méthaniseurs ou des décharges, par exemple), il a capté du CO₂ de l'air. La pyrolyse a alors un bilan carbone négatif : on réduit la quantité de CO₂ dans l'atmosphère. ▶

Intensité carbone de la production des différents types d'hydrogène



Existe-t-il des technologies concurrentes pour la production d'hydrogène « turquoise » ?

Oui, mais uniquement au stade de laboratoire ou de démonstrateur. Il existe des méthodes dites de « bain à métal liquide » dans lesquelles le méthane est injecté dans des colonnes contenant des métaux fondus, où il se décompose. Des pilotes ont été construits en Californie et en Australie. L'industriel allemand BASF étudie quant à lui la décomposition du méthane à l'aide de catalyseurs. Ce sont des concurrents sérieux, mais ils ont encore des difficultés technologiques à résoudre.

L'hydrogène turquoise est-il la solution à la transition énergétique ? Une équipe de recherche internationale calcule pour la première fois son analyse du cycle de vie (ACV). Cet indicateur est classiquement utilisé pour évaluer l'empreinte climatique depuis la production jusqu'en fin de vie. L'analyse se base sur une unité de production commerciale, l'usine de Monolith Materials' Olive Creek, qui convertit l'électricité provenant de centrales éoliennes en plasma d'arc pour chauffer le gaz. Laurent Fulcheri est l'un des auteurs de cette étude publiée en juillet 2022 dans International Journal of Hydrogen Energy¹.

Que nous apprend l'évaluation de l'ACV sur l'empreinte climatique de l'hydrogène turquoise ?

Nous imaginions que ce mode de production avait une empreinte carbone extrêmement intéressante, mais nous le quantifions ici pour la première fois : la production d'un kilo d'hydrogène turquoise émet 0,91 kg d'équivalent CO₂ (kg CO₂e/kg). L'hydrogène « gris » — qui représente 96 % de l'hydrogène produit aujourd'hui — émet quant à lui 9,89 kg CO₂e/kg. C'est donc près de 10 fois plus que l'hydrogène « turquoise² » ! Le principal atout de notre étude tient au fait qu'elle se fonde sur les données de la première unité industrielle à taille réelle : elle est donc représentative de l'empreinte carbone réelle.

La méthode de calcul utilisée prend en compte l'ensemble des émissions : celles issues du procédé, de l'électricité utilisée, mais aussi des hydrocarbures. L'essentiel ne provient pas du procédé lui-même, mais des fuites tout au long de la chaîne d'approvisionnement du gaz (extraction, distribution, etc.). Et aujourd'hui, la production d'hydrogène « turquoise » se trouve à un niveau d'émission proche de l'hydrogène « vert » (0,03 à 0,37 kg CO₂e/kg), mais elle présente l'avantage d'utiliser beaucoup moins d'électricité.

L'usine de Monolith, qui sert ici à calculer l'ACV, utilise du gaz naturel fossile. Peut-on imaginer utiliser du méthane issu de déchets ou de stations d'épuration ?

Les États-Unis disposent d'importantes réserves de gaz de schiste, et c'est cette voie qui sera la plus favorable pour déployer l'hydrogène « turquoise ». En Europe le scénario est différent, notamment depuis la guerre en Ukraine : le biogaz sera vraisemblablement la matière première privilégiée. C'est un mode de production que nous avons modélisé : l'hydrogène « turquoise » devient alors meilleur que l'hydrogène « vert ».

Hydrogène BRUN

par Gazéification

à base de Combustibles fossiles

avec du Charbon brun
(lignite)

CO₂
très
élevé

Hydrogène GRIS

par Vaporeformage ou
par Oxydation partielle

à base de Combustibles
fossiles

avec du Méthane,
charbon...

CO₂
très
élevé

Hydrogène NOIR

par Gazéification

à base de Combustibles
fossiles

avec du Charbon

CO₂
très
élevé

Hydrogène BLEU

mêmes procédés que
Noir, Gris, Brun
+ Captage de CO₂

CO₂
moyen
à élevé

Si le réacteur est entièrement alimenté en biogaz issu de déchets ménagers, l'intensité carbone chute à -5,22 kg CO₂e/kg! La production agricole végétale contribue en effet à stocker du carbone grâce à la photosynthèse, ce qui rend l'ensemble du procédé « stockeur » de CO₂. Comme le biogaz n'est disponible qu'en quantité limitée, on peut aussi imaginer un scénario où le gaz fossile et le biogaz sont mélangés. Pour 10 % de biogaz, l'intensité carbone de l'hydrogène « turquoise » est nulle.

Qu'est-ce qui explique le faible impact climatique de l'hydrogène turquoise?

La réaction n'est pas elle-même productrice de CO₂, contrairement à d'autres procédés comme le SMR (hydrogène « gris »). De plus, à partir d'un kilo de méthane, on produit 250 grammes d'hydrogène, mais aussi 750 g de noir de carbone solide. Or ce dernier est valorisable dans de nombreuses industries : nous avons alloué les émissions de CO₂ totales à l'hydrogène et au noir de carbone produits. Ce partage contribue donc à baisser l'empreinte carbone de l'hydrogène.

Hydrogène VERT

par Électrolyse
à base d'Énergie
renouvelable
avec de l'Eau

CO₂
très bas
à moyen

Et concernant les émissions liées au noir de carbone?

C'est l'autre avantage majeur de ce procédé. 15 millions de tonnes de noir de carbone sont produites chaque année dans le monde. Les procédés utilisés émettent en moyenne 2,6 kg CO₂e/kg : la pyrolyse du gaz fossile permet d'abaisser les émissions à 0,9 kg CO₂e/kg.

Il faut comprendre que remplacer les unités de production actuelles d'hydrogène « gris » par des procédés de pyrolyse demande des investissements colossaux. Par exemple, la première usine complète de Monolith sera composée de 12 unités identiques, pour un investissement d'environ 1 milliard d'euros. Le noir de carbone – un produit technique à haute valeur ajoutée – est donc un élément très important dans l'équation économique de départ.

Hydrogène TURQUOISE

par Pyrolyse
à base d'Énergie du
réseau électrique
avec du
(Bio)méthane

CO₂
très bas
à moyen

La viabilité économique de l'hydrogène turquoise repose donc sur le noir de carbone?

Le noir de carbone est essentiellement utilisé dans les pneumatiques, mais aussi les colorants, les peintures, les piles et les batteries. Ce coproduit rend le procédé économiquement intéressant, mais aussi stratégique : il y a aujourd'hui une pénurie de noir de carbone en Europe, car l'essentiel de la production provient de Russie et d'Ukraine.

Ne risque-t-on pas de se retrouver avec une production de noir de carbone supérieure à la demande?

Si la totalité de notre production d'hydrogène actuelle était remplacée par de l'hydrogène turquoise, le marché serait effectivement très vite saturé et l'on se retrouverait avec des « montagnes » de carbone solide. Les industriels étudient déjà la pyrolyse de 2e ou 3e génération. Le noir de carbone pourrait être utilisé pour de nouvelles applications massives, comme dans les matériaux de construction ou l'amendement des sols. La dernière solution serait de l'enfouir. ►

Plutôt que de stocker du CO₂, le stockage de noir de carbone pourrait contribuer à diminuer les GES. Mais cette étape ne devrait être atteinte que si le procédé se développe à des échelles phénoménales.

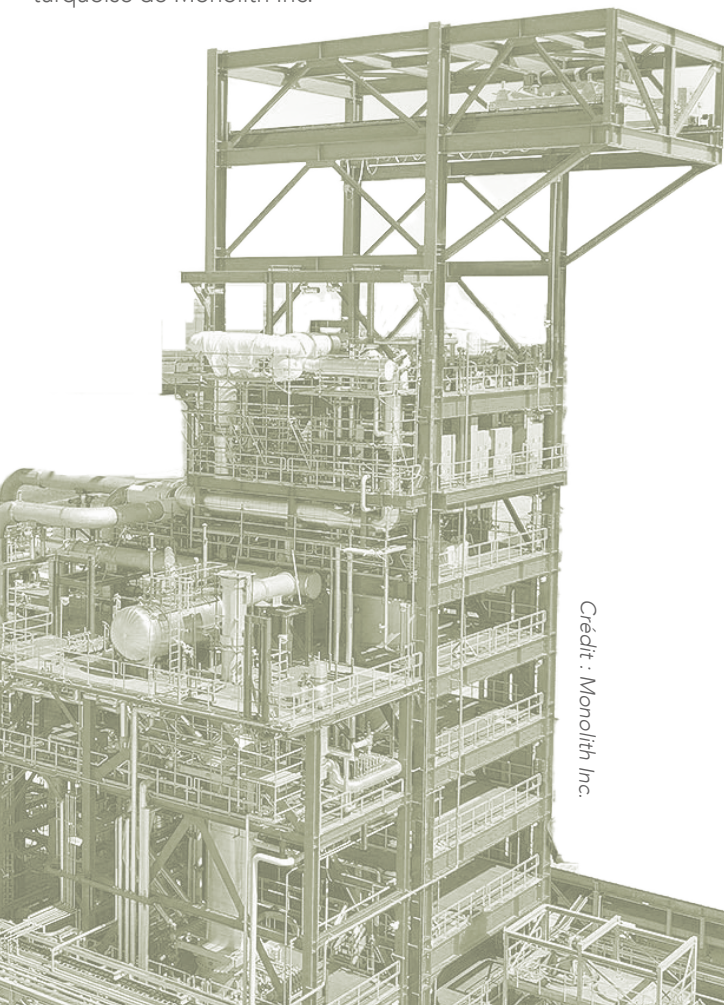
Quel rôle l'hydrogène turquoise a-t-il à jouer dans la transition énergétique ?

À plus ou moins long terme, l'hydrogène « turquoise » pourrait jouer un rôle majeur pour les applications actuelles de l'hydrogène en remplaçant les procédés de SMR. La production actuelle d'hydrogène – utilisé pour la sidérurgie, l'agriculture ou le raffinage – s'élève à 60 millions de tonnes chaque année. Cela représente près de 2 % des émissions totales de CO₂ dans le monde, car il est produit à 96 % par SMR. Il faudrait donc déjà commencer par réduire ces émissions avant de développer de nouvelles applications !

L'hydrogène « turquoise » a un rôle majeur à jouer pour décarboner l'industrie de l'hydrogène. Malgré l'engouement actuel pour l'électrolyse de l'eau, ce procédé est extrêmement énergivore et n'est aujourd'hui pas rentable : l'hydrogène « turquoise » a lui atteint une maturité technologique et un modèle économique d'ores et déjà soutenable. ■

Propos recueillis par Cécile Michaut & Anaïs Marechal

Première usine de production d'hydrogène turquoise de Monolith Inc.



Crédit : Monolith Inc.

[1] Han J, Mintz M, Wang M. Waste-to-wheel analysis of anaerobic-digestion-based renewable natural gas pathways with the GREET model (No. ANL/ESD/11-6). Argonne, IL (United States): Argonne National Lab.(ANL); 2011..

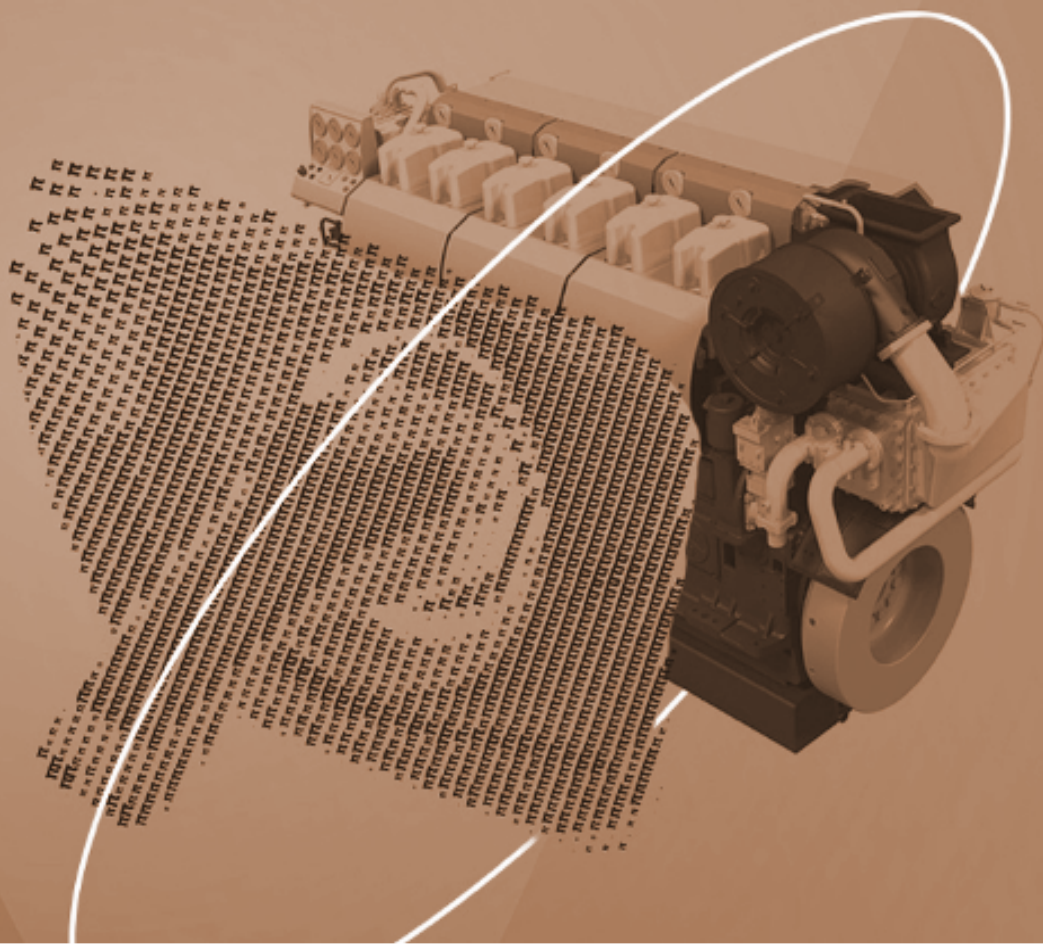
[2] Diab, J., et al. (2022), Why turquoise hydrogen will be a game changer for the energy transition, International journal of hydrogen energy, volume 47, issue 61, pages 25831–25848.

[3] World Energy Council (2019), Innovation Insights Brief, New hydrogen economy – Hope or hype ?

TROISIÈME PARTIE

Carburant ?

L'un des usages privilégiés de l'hydrogène
concerne le secteur des transports.
Mais est-ce, pour autant, le carburant idéal
de demain ?



7 choses à savoir sur l'hydrogène dans les transports

15 novembre 2021  11 min. de lecture

par Aurélien Bigo



Aurélien Bigo

Chercheur associé de la Chaire
Énergie et Prospérité à l'Institut
Louis Bachelier

1 HYDROGÈNE & TRANSPORTS

Où en sommes-nous ? Quelles échances pour sa diffusion ?

L'hydrogène dans les transports en est encore seulement à ses balbutiements. Malgré la hausse de 60 % des consommations par rapport à 2020, l'hydrogène ne représentait que 0,003 % des consommations d'énergie des transports dans le monde en 2021.

C'est sur les véhicules routiers que l'hydrogène est actuellement le plus développé, bien qu'à un niveau très faible. Fin 2021 en France, on ne comptait ainsi que quelques centaines de voitures à hydrogène (et il s'en vend environ 1 000 fois moins que de voitures électriques depuis début 2022¹, 2 poids lourds, 4 véhicules automoteurs spécialisés (VASP : par exemple les bennes à ordures), ou encore 22 bus (soit moins de 0,1 % du parc²).

Cependant, la mobilité lourde constitue le deuxième axe du plan hydrogène français de 2018 ainsi que de la stratégie nationale pour le développement de l'hydrogène décarboné de 2020³. L'objectif affiché en 2018 est d'atteindre 20 000 à 50 000 véhicules utilitaires légers, et 800 à 2 000 véhicules lourds en 2028 dans le parc. Les bornes hautes correspondent à l'équivalent de 0,9 % du parc actuel d'utilitaires et 0,3 % du parc de véhicules lourds⁴.

Pour des raisons de rendement énergétique et de bilan carbone, l'électrique est à privilégier quand cela est possible.

Pour le transport ferroviaire, des trains à hydrogène roulent déjà en Allemagne et les premières circulations commerciales sont prévues en 2025 en France⁵. Pour les navires, des expérimentations sont en cours pour des navires de faible capacité de transport et sur des distances limitées. Mais d'autres solutions de décarbonation sont généralement privilégiées à l'hydrogène, notamment pour le maritime (biogaz, méthanol, ammoniac...). Enfin, Airbus vise 2035 pour la commercialisation d'un avion à hydrogène capable de réaliser des vols court- et moyen-courriers. ▶

2 DÉCARBONISATION DES TRANSPORTS

Quelle(s) technologie(s) privilégier ?

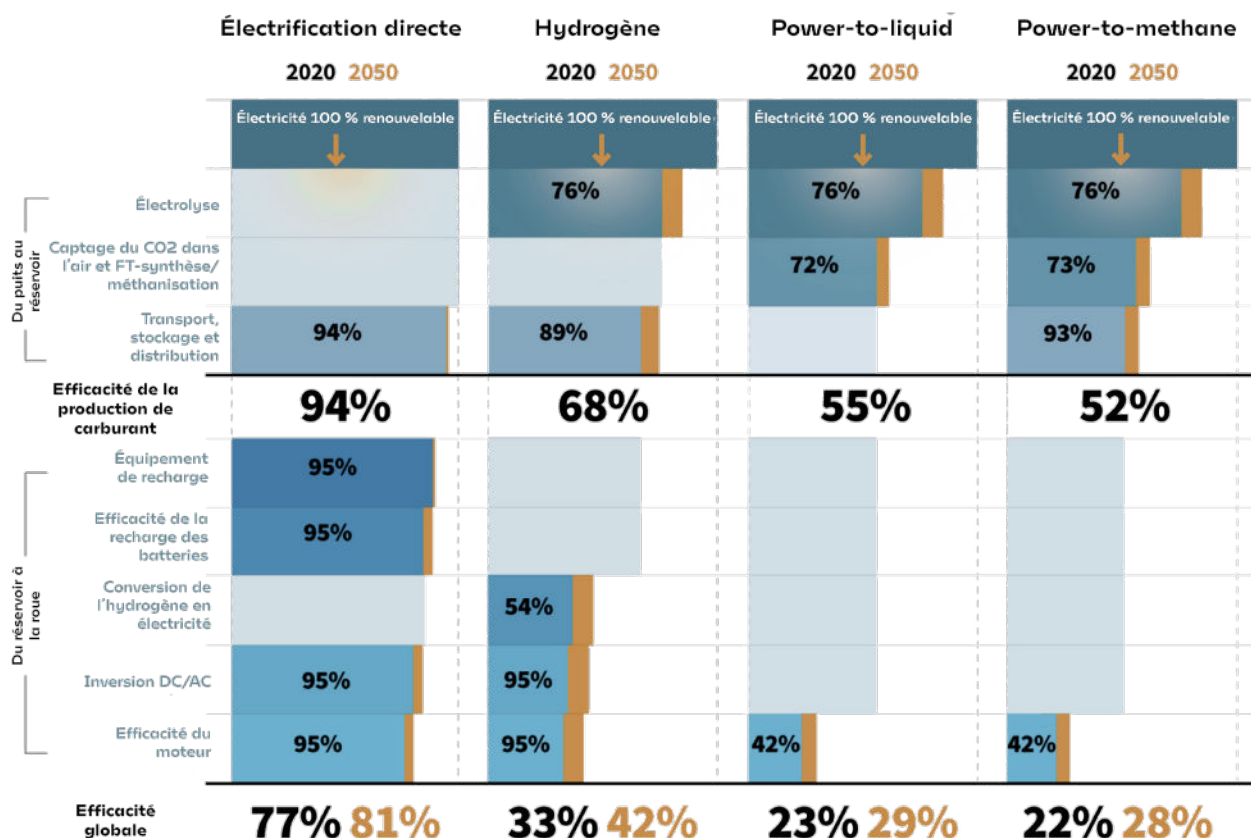
La sortie du pétrole des transports est incontournable pour atteindre l'objectif de neutralité carbone en France d'ici 2050⁶. Il existe 4 voies énergétiques possibles dans les transports : l'électricité ; l'hydrogène ; les carburants gazeux (gaz fossile ou renouvelable) et les carburants liquides (pétrole ou biocarburants). Des carburants synthétiques peuvent aussi être produits en combinant de l'hydrogène avec du CO₂, une technologie cependant très peu mature à ce stade.

Parmi ces différentes technologies, le vecteur électrique est le plus décarboné, à plus de 90 % en France, quand les autres vecteurs (hydrogène, carburants gazeux et liquides) sont au contraire dépendants des énergies fossiles à plus de 90 %. Par ailleurs, les potentiels de production de gaz renouvelable et de biocarburants sont fortement limités par les ressources en biomasse disponibles, ce qui nécessite avant tout de réduire fortement les consommations de gaz et de carburants liquides dans l'économie pour les décarboner.

Sur les vecteurs électriques et hydrogène, le rendement énergétique de l'hydrogène est moins bon que l'utilisation directe de l'électricité dans un véhicule électrique à batteries⁸. Il est en effet possible d'utiliser l'hydrogène dans un véhicule de 2 manières : soit comme combustible dans un moteur thermique à hydrogène, bien moins efficace que les moteurs électriques ; soit en retransformant l'hydrogène en électricité via une pile à combustible située dans le véhicule, pour ensuite utiliser cette électricité dans un moteur électrique. Dans ce second cas, et au vu des pertes énergétiques de ces transformations, il faut environ 2, 3 fois plus d'électricité pour faire rouler un véhicule à hydrogène que pour un véhicule électrique^{9, 10}.

Cette moindre efficacité démultiplie les coûts en électricité, ainsi que les émissions à l'usage des véhicules si l'électricité utilisée n'est pas très faiblement carbonée. Elle implique aussi de plus grands volumes d'électricité pour décarboner les transports. ►

Camions : l'électrification directe est, de loin, la plus efficace



Notes : Taux d'efficacité des poids lourds long-courriers. À comprendre comme des valeurs moyennes approximatives tenant compte des différentes méthodes de production. L'électrification directe représente à la fois les VEB fonctionnant sur batteries et/ou sur caténaires. L'hydrogène comprend la compression du carburant à bord, tandis que la conversion en méthane comprend la liquéfaction du carburant. En supposant que le rendement du moteur est le même pour les véhicules diesel et les véhicules à gaz HPDI à deux carburants. À l'exclusion des pertes mécaniques.

Ainsi, décarboner l'ensemble des transports terrestres (voitures, poids lourds, bus et cars, trains...) en Europe via les véhicules électriques nécessiterait l'équivalent de 43 % de l'électricité produite en 2015, et 108 % dans le cas de véhicules à hydrogène. Des chiffres qui augmentent encore en considérant la navigation et l'aérien¹¹.

Pour des raisons de rendement énergétique et de bilan carbone, l'électrique est donc à privilégier quand cela est possible, comme pour les véhicules routiers légers (deux-roues, voitures ou encore véhicules utilitaires). L'hydrogène trouvera sa pertinence en complément de l'électrique, notamment lorsqu'il y a besoin de forts emports de charge, d'autonomies élevées et/ou de temps de recharge très courts. C'est d'ailleurs par ces avantages que l'hydrogène laisse espérer ou peut donner l'illusion qu'il sera possible de garder à l'avenir les comportements et usages des transports permis par le pétrole actuellement.

3 IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX

Quel bilan carbone et autres impacts dans les transports ?

Lorsque l'hydrogène est produit par électrolyse avec de l'électricité renouvelable ou nucléaire, les émissions de gaz à effet de serre d'un autobus vendu en 2020 ou d'un poids lourd vendu en 2030 sont divisées par 6 par rapport au diesel, sur leur cycle de vie.

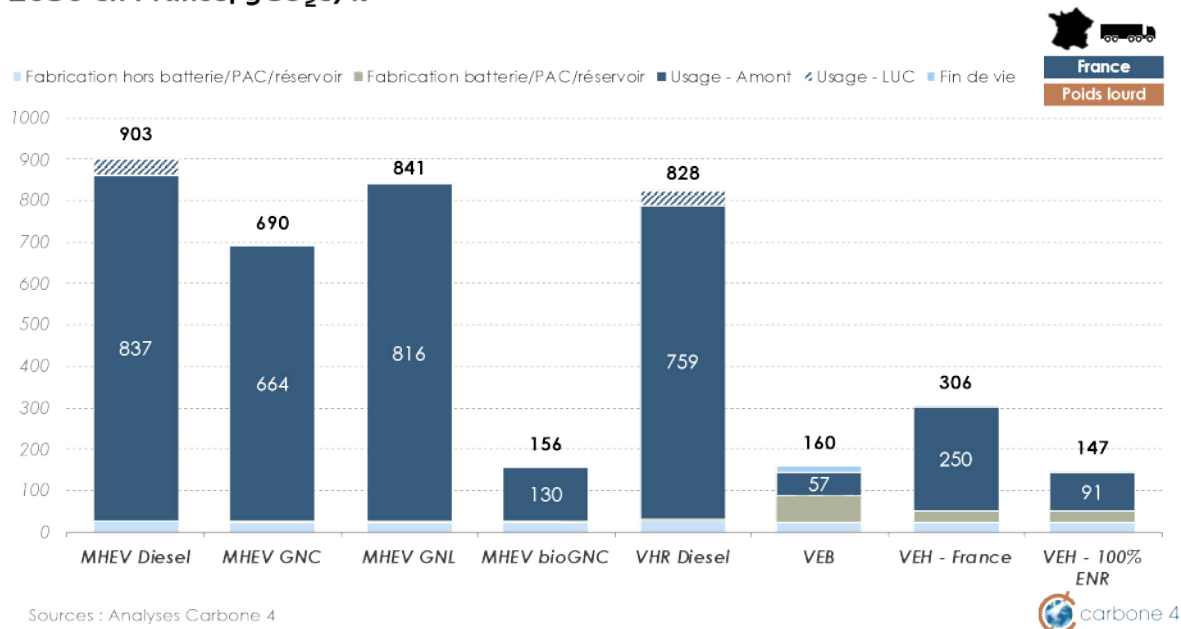
Cela place alors la technologie hydrogène à des niveaux d'émissions similaires aux autobus ou poids lourds électriques rechargés en France, ainsi qu'aux véhicules utilisant du biogaz. En revanche, si l'hydrogène est produit par électrolyse avec le mix électrique français moyen, le tracteur routier à hydrogène passe de 6 fois moins à 3 fois moins émetteur que le tracteur diesel ; il devient légèrement plus émetteur avec le mix moyen européen et même 60 % plus émetteur avec le mix électrique allemand¹².

Ainsi, la décarbonation de la production de l'hydrogène est une condition indispensable pour s'assurer de bénéfices climatiques significatifs au développement de l'hydrogène dans les transports.

Cet impact des émissions du mix électrique est encore plus fort sur les émissions des véhicules à hydrogène que les émissions des véhicules électriques, en raison du moins bon rendement de la chaîne hydrogène et ainsi des quantités d'électricité plus importantes par kilomètre parcouru.

D'un point de vue environnemental, et en comparaison du véhicule électrique à batteries, le principal avantage de l'hydrogène concerne les moindres capacités de batteries nécessaires. Cela réduit la pression sur les ressources et les pollutions engendrées par l'exploitation du lithium, du cobalt ou encore du nickel. La filière hydrogène implique aussi des consommations de métaux, en particulier de platine pour les piles à combustibles et les électrolyseurs, dont la criticité dépendra du niveau de développement de la filière¹⁴. Enfin, les plus forts besoins en électricité pour les véhicules à hydrogène (lorsqu'il est fabriqué par électrolyse) nécessitent davantage de métaux pour les moyens de production électrique. ▶

Empreinte carbone moyenne sur la durée de vie d'un tracteur routier vendu en 2030 en France | gCO₂e/k



MHEV (Véhicule Thermique à hybridation légère ; Mild hybrid) ; bioGNC (biogaz ; GNC gaz naturel comprimé) ; VHR (Véhicule Hybride Rechargeable) ; VEB (Véhicule Electrique à Batteries) ; VEH (Véhicule Electrique à Hydrogène ; à Pile à Combustible). Source : Carbone 4 (2020)¹³.

4 ENJEU ÉCONOMIQUE

Quel coût de l'hydrogène ?

Les technologies hydrogène sont aujourd'hui plus chères que celles au pétrole ou à l'électricité, aussi bien au niveau du coût des véhicules que de l'énergie. Cependant, les surcoûts à l'achat varient beaucoup selon les modes de transport et la maturité du marché des véhicules. Et les surcoûts énergétiques dépendent fortement du mode de production de l'hydrogène, la production via l'électrolyse étant aujourd'hui environ deux fois plus coûteuse que le vaporeformage du gaz fossile. Les coûts de transport et de distribution sont aussi significatifs, d'autant plus si les distances entre les lieux de production et de consommation sont importantes.

Au total, le ministère estimait en 2018 que le coût total de possession est de l'ordre de 20 à 50 % plus élevé pour un véhicule hydrogène que

pour l'équivalent thermique. Avec de l'hydrogène issu de l'électrolyse, le coût total de possession des poids lourds, bus et cars est de 1,5 à 3 fois plus élevé pour l'hydrogène que pour le diesel¹⁵. Cependant, les coûts sont prévus à la baisse, de l'ordre d'une division par deux d'ici 2030 pour la production via l'électrolyse, ce qui changera également les équilibres actuels¹⁶.

Cependant, les projections de coûts entre technologies et énergies sont soumises à de fortes incertitudes. La compétitivité de l'hydrogène pourrait ainsi varier fortement selon l'évolution des progrès ou des contraintes techniques, géopolitiques, de ressources ou de déploiement des différentes énergies. Elle dépendra enfin des éventuels soutiens ou des niveaux de taxation des énergies ou technologies par les pouvoirs publics.

5 PLANIFICATION

Quels défis techniques et organisationnels à l'avenir ?

Les défis techniques de la filière hydrogène restent importants pour permettre son développement dans les transports. Ce gaz étant particulièrement petit, léger et inflammable, les risques de fuites ou d'accidents se doivent d'être maîtrisés pour assurer la sécurité sur les véhicules, le stockage ou le transport de l'hydrogène. Le stockage dans les véhicules demande également de comprimer l'hydrogène, un processus énergivore, et de disposer de réservoirs qui alourdissent fortement les véhicules. Les technologies hydrogène sont aujourd'hui plus chères que celles au pétrole ou à l'électricité, aussi bien au niveau du coût des véhicules que de l'énergie.

Aussi, la faible densité énergétique volumique (quantité d'énergie contenue dans un volume donné) de l'hydrogène demande autant que possible de penser la production de l'hydrogène au plus près des lieux de consommation, afin

de limiter les coûts énergétiques et financiers de son transport. Cela amène la réflexion de l'organisation d'écosystèmes permettant de mutualiser la production et les usages entre plusieurs modes ou secteurs économiques sur un même lieu. Pour assurer la cohérence globale de ces plans territoriaux, il faudra aussi assurer un maillage progressif du territoire en infrastructures de production et de distribution d'hydrogène pour les modes routiers lourds.

Enfin, selon les modes de transport ou les véhicules, les défis techniques sont plus ou moins forts, ce qui conditionne aussi les échéances de diffusion du vecteur hydrogène. Par exemple, pour l'aérien, la faible densité volumique demande potentiellement de revoir la forme des avions ou du moins la forme, le poids et la taille des réservoirs, un des défis techniques majeurs du développement d'un avion à hydrogène. ▶



6 POUR DEMAIN

Quel avenir selon les modes de transport ?

Pour le transport routier, l'hydrogène n'aura pas de pertinence sur les véhicules les plus légers, plus adaptés pour l'électrique à batteries. Les vélos ou voitures à hydrogène, inefficaces énergétiquement et bien plus coûteux financièrement, sont donc à oublier comme solutions de masse et en dehors de quelques usages de niche. En revanche, l'hydrogène pourrait se montrer plus utile pour les modes les plus lourds (poids lourds, bus et cars...) et lorsque les distances sont trop longues pour l'électrique à batteries.

Côté ferroviaire, les trains à hydrogène pourront constituer une alternative pertinente au diesel et lorsque les trafics sont trop faibles pour justifier l'électrification de la ligne¹⁷. Pour les bateaux, l'hydrogène sera trop difficile d'usage pour décarboner le transport maritime sur longue distance, qui pourrait cependant se tourner vers des dérivés de l'hydrogène, à savoir l'ammoniac, le méthanol ou les électrocarburants. En revanche, l'hydrogène pourrait être adapté pour le transport fluvial, qui correspond à des volumes à transporter et des distances plus faibles.

Enfin, pour l'aérien, le pari technologique est lancé et justifié par les limites des autres options alternatives au pétrole, notamment la concurrence d'usage de la biomasse pour les biocarburants, ainsi que la maturité extrêmement faible à ce jour des carburants de synthèse, des dérivés de l'hydrogène.

En revanche, ce pari est encore soumis à de fortes incertitudes. Aussi d'ici 2050, l'hydrogène ne pourra représenter qu'une faible part des consommations du secteur, jusqu'à 7 % maximum des vols au départ et à l'arrivée de la France, parmi les 3 scénarios de transition écologique du secteur aérien de l'ADEME. Les électrocarburants, des dérivés de l'hydrogène, représentent un potentiel de décarbonation plus important, jusqu'à 38 % du mix énergétique en 2050. Ils ne deviennent cependant significatifs qu'au cours de la décennie 2030, avec de forts défis de passage à l'échelle et l'exigence d'être produits avec de l'électricité très peu carbonée pour être avantageux d'un point de vue climatique¹⁸.

7 IN FINE

Que faut-il retenir en définitive ?

L'hydrogène ne doit pas être vu comme une solution miracle pour décarboner les transports, car il ne l'est pas. Il est ainsi moins efficace énergétiquement, largement carboné et plus coûteux que l'électrique aujourd'hui, et la production d'hydrogène bas-carbone risque aussi de ne pas être à l'échelle pendant encore plusieurs années, ce qui limite ses capacités à participer aux nécessaires baisses d'émissions du secteur à court terme¹⁹.

Au niveau français et tous secteurs confondus, le plan hydrogène prévoit une baisse d'émissions de l'ordre de 6 MtCO₂ d'ici 2030²⁰, soit une réduction équivalente à 1,4 % des émissions nationales actuelles (418 MtCO₂e en 2021²¹). Si le potentiel est loin d'être négligeable, il reste limité alors que l'objectif européen est désormais de baisser les émissions de 55 % d'ici 2030 par rapport à 1990²². L'hydrogène ne doit pas être vu comme une solution miracle pour décarboner les transports, car il ne l'est pas.

Pour autant, il ne faudrait pas discréditer totalement les possibilités que l'hydrogène bas-carbone peut offrir, surtout pour l'industrie ou comme solution complémentaire pour les transports à plus long terme – qui nécessitent des investissements et un amorçage de la filière dès aujourd'hui²³. ▶



Un certain soutien public au développement de la filière est donc nécessaire, avec cependant 3 précautions :

- Les possibilités doivent être étudiées avec prudence et développées sans précipitation, au vu des nombreux défis (techniques, économiques, de production bas-carbone...) qu'il reste à relever pour la filière. Sans cette nécessaire vigilance, le risque serait grand de développer trop vite des usages qui resteraient carbonés à l'avenir²⁴.
- Le développement de l'hydrogène dans les transports doit avant tout être développé de manière pragmatique, plutôt que sur des fausses croyances et illusions technologiques, ce qui est encore trop souvent le cas.
- Surtout, comme pour les autres technologies de décarbonation, l'hydrogène ne doit pas être utilisé comme un prétexte pour cacher l'urgence de la sobriété dans les transports afin de réduire rapidement ses émissions... un argument abondamment utilisé par exemple par le secteur aérien avec l'avion à hydrogène, afin de faire diversion à la nécessaire modération de son trafic.

Sans ces précautions, l'hydrogène pourrait faire plus de mal que de bien à la transition énergétique des transports... ■

Aurélien Bigo

3 points supplémentaires sont abordés dans l'[article complet](#).

Les autres articles d'Aurélien Bigo sont à découvrir ici :

- [La voiture électrique passée au crible de la soutenabilité](#)
- [« Sans baisse du trafic aérien, pas de respect de l'accord de Paris »](#)

[1] CCFA, [dossier de presse octobre 2022](#).

[2] [Ministère de l'Économie](#), 9 septembre 2020.

[3] CGDD, 2021, [Bilan annuel des transports](#).

[4] Parc de véhicules provenant du CGDD, [bilans annuels des transports](#).

[5] SNCF, 2022. [Trains hydrogène : première commande lancée](#).

[6] Ministère de la transition écologique. [Stratégie nationale bas-carbone](#) (SNBC).

[7] Transport & Environment. [Comment décarboner le fret français ?](#)

[8] Le terme de véhicule électrique désignera sauf mention contraire le véhicule électrique à batterie (les véhicules à hydrogène utilisant une pile à combustible sont aussi des véhicules électriques, mais moins couramment appelés comme tels dans le langage commun).

[9] Transport & Environment. [Briefing feasibility study renewables decarbonisation](#).

[10] Ademe. [Changement climatique et énergie](#).

[11] Dans cette étude, le rapport de rendement entre électrique et hydrogène était de 2,5. T&E, 2018. [How to decarbonise European transport by 2050](#).

[12] Carbone 4, 2020. [Transport routier : quelles motorisations alternatives pour le climat ?](#)

[13] Carbone 4, 2020. [Transport routier : quelles motorisations alternatives pour le climat ?](#)

[14] IEA, 2021. [The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions](#).

[15] ADEME, 2022, *ibid*.

[16] MTES, 2018, *ibid*.

[17] ADEME, 2021. [Etude sur les perspectives du train hydrogène en France](#).

[18] Part de l'hydrogène de 1 %, 4 % et 7 % dans les mix énergétiques du transport aérien en 2050, dans ADEME, 2022. [Élaboration de scénarios de transition écologique du secteur aérien](#).

[19] Carbone 4, 2022. [Hydrogène bas-carbone : quels usages pertinents à moyen terme dans un monde décarboné ?](#)

[20] France Hydrogène, *ibid*.

[21] [Chiffres Citepa](#) 2022.

[22] Haut Conseil pour le Climat, [rapport annuel 2022](#).

[23] I4CE, 2020. [Hydrogène : la France a encore de nombreux défis à relever](#). Billet d'analyse, Jean-Pierre Ponssard et Guy Meunier.

[24] L'Energiegeek, Maxence Cordiez, 2020. [Décarboner l'hydrogène avant d'en promouvoir les usages](#)



Cédric Philibert
Chercheur associé à l'Institut Français
des Relations Internationales (IFRI) et à
l'Université Nationale Australienne (ANU)



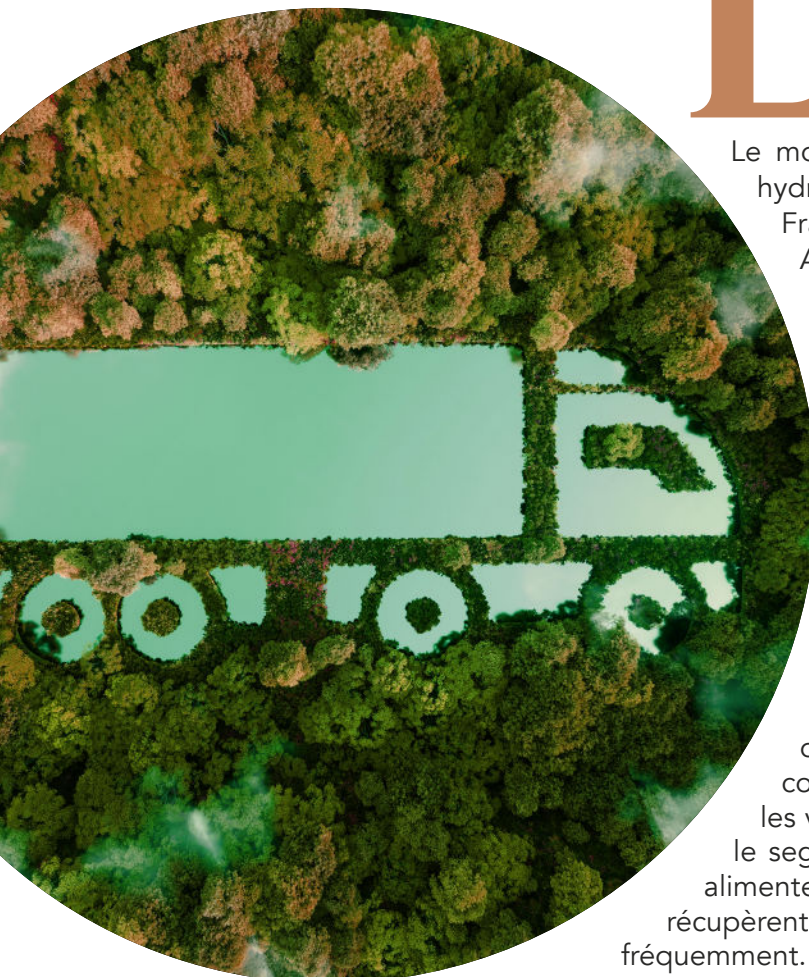
François Kalaydjian
Directeur de la Direction Economie
& Veille et Coordinateur Hydrogène
d'IFP Energies nouvelles (IFPEN)

De l'hydrogène dans nos moteurs : la solution ?

14 février 2023  6 min. de lecture

INÉDIT

avec Cédric Philibert, François Kalaydjian,
Gaëtan Monnier & Luis Le Moyne



La possibilité de brûler de l'hydrogène, ou des dérivés comme l'ammoniac, dans les moteurs connaît un regain d'intérêt. Ces moteurs peuvent répondre, parmi d'autres technologies, à l'urgence de décarboner camions, bateaux ou avions.

Le motoriste Cummins teste un moteur de poids lourd à hydrogène, Renault Trucks développe le sien avec l'Institut Français du pétrole des énergies nouvelles (IFPEN), Airbus a annoncé un avion à hydrogène pour 2035, qui pourrait être entraîné par une turbine à gaz modifiée. Autant d'annonces qui suggèrent que le bon vieux moteur thermique n'est pas mort, et qu'il a même, en décarbonant son carburant, un rôle à jouer dans l'atteinte des objectifs de neutralité climatique du transport longue distance d'ici 2050.

« Brûler l'hydrogène directement dans les moteurs thermiques »

L'hydrogène, molécule dense en énergie, peut en effet être produite de façon « propre » par électrolyse de l'eau, avec de l'énergie d'origine renouvelable ou nucléaire. Quant aux batteries électriques, qui constituent désormais la voie royale pour décarboner les voitures individuelles, elles manquent d'autonomie sur le segment des véhicules lourds : « Des batteries peuvent alimenter des bus ou des fourgons de livraison en ville qui récupèrent l'énergie au freinage et qui peuvent se recharger fréquemment. » ▶



Gaëtan Monnier
Directeur du Centre de Résultats
Mobilité d'IFPEN et de l'Institut
Carnot IFPEN Energie Transport



Luis Le Moyne
Professeur à l'Institut Supérieur
de l'Automobile et des Transports
(Université de Bourgogne)

Mais pas un poids lourd, qui même avec les superchargeurs de 350 kW devrait passer plus d'une heure en recharge tous les 300 km », expose Gaëtan Monnier, directeur du Centre de résultats transports à l'IFPEN. Dans le cadre de sa « stratégie de l'hydrogène pour une Europe climatiquement neutre » de 2020, l'Union européenne a ainsi validé l'objectif des industriels de faire rouler d'ici 2030 cent mille camions à l'hydrogène décarboné, sur les 3 millions de camions qui parcourent l'Europe. « Initialement, l'objectif était de consommer cet hydrogène dans des piles à combustible, système qui produit de l'électricité pour alimenter ensuite un moteur électrique. Mais l'idée de brûler l'hydrogène directement dans des moteurs thermiques connaît un regain d'intérêt depuis quelques années chez les chercheurs et les industriels », souligne le spécialiste.

« C'est une solution low cost pour décarboner les transports. »

Elle présente en effet plusieurs avantages. D'abord, brûler de l'hydrogène dans un moteur à combustion ne nécessite que des ajustements : « Il faut intégrer des métaux capables de tenir de plus hautes températures et un système d'injection adapté à ce carburant très volatile, revoir le contrôle de la combustion, dont les caractéristiques sont très différentes de celle du diesel... Mais ce ne sont en aucun cas des ruptures technologiques », assure Luis Le Moyne, directeur de l'ESAT. Ensuite, cette solution permettrait aux fabricants de conserver leur chaîne de fabrication et ainsi de ne pas trop augmenter leurs prix. « C'est une solution low cost pour décarboner les transports », conclut-il.

Par comparaison, les piles à combustibles (PàC) ne sont pas encore fabriquées à grande échelle et contiennent du platine, un métal rare... ce qui enchérit considérablement le coût d'achat du véhicule. « Leur durée de vie étant pour l'instant limitée, il faut aussi prévoir un remplacement de la PàC dans le cycle de vie du véhicule », ajoute Gaëtan Monnier. La PàC peut néanmoins offrir de meilleurs rendements énergétiques (65 % maximum) que le moteur à hydrogène (45 % maximum). Quelle solution l'emportera ? Ce n'est pas clair aujourd'hui : « Le moteur à hydrogène apparaît moins cher à l'investissement, mais potentiellement légèrement plus gourmand en carburant sur le cycle de vie du véhicule. Les deux pourraient donc avoir leur pertinence économique en fonction de l'usage prévu du véhicule », résume le chercheur.

L'hydrogène, trop volatile pour l'aviation ?

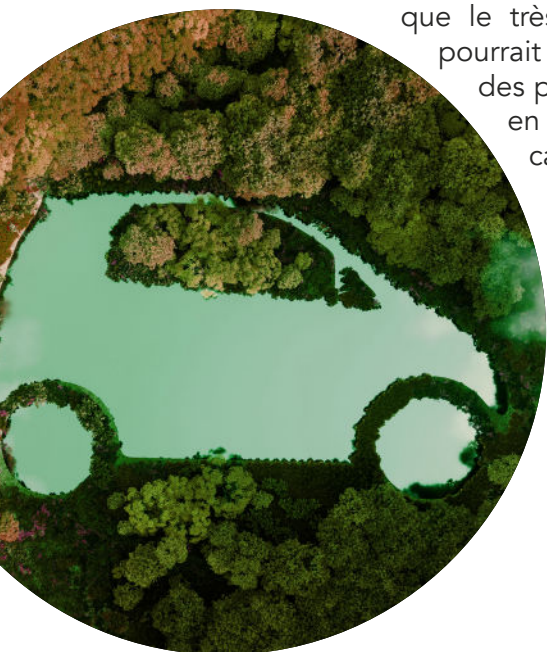
Côté aérien, là encore, le match PàC versus turbine à gaz bat son plein. Pour faire décoller un avion à hydrogène d'ici 2035, Airbus teste actuellement les deux solutions. Cependant, « le défi ne réside pas tant dans la propulsion que dans le stockage de l'hydrogène à bord, qui devra se faire à l'état liquide, sa forme la plus compacte », pointe Cédric Phillibert, ancien analyste à l'Agence internationale de l'énergie (AIE). Même ainsi, l'hydrogène occupe quatre fois plus d'espace que le kérosène et doit être maintenu à la température extrêmement basse de -253 °C. ▶



« Toutes les technologies seront nécessaires pour décarboner les transports. »

Avec une conséquence importante : le réservoir d'hydrogène liquide, de forme sphérique ou cylindrique – pour limiter au maximum les pertes thermiques – ne peut pas se loger dans les ailes de l'appareil... ce qui oblige à le placer dans le fuselage et donc à réinventer totalement l'appareil ! C'est pourquoi, en parallèle, les constructeurs étudient la possibilité de brûler dans les turbines actuelles un dérivé de l'hydrogène plus « pratique » : du carburant de synthèse.

Ce carburant, strict équivalent décarboné des kérosènes actuels, peut être fabriqué à partir d'hydrogène décarboné et de CO_2 capturé dans l'atmosphère, selon le procédé appelé Fischer-Tropsch. Malgré l'efficacité énergétique déplorable de l'opération – un rendement du puits à la roue de 15 % contre 30 % pour l'hydrogène –, elle offre un argument de poids : « Il n'oblige pas à réinventer les avions ni les infrastructures aéroportuaires », fait valoir l'expert. Les carburants de synthèse s'avèrent bien plus faciles à transporter que le très volatile hydrogène. « On pourrait donc en importer depuis des pays dotés de forts potentiels en énergies renouvelables, capables de produire massivement l'hydrogène sur place », poursuit-il. C'est exactement le plan de Porsche qui a débuté la construction d'une usine de « eFuel » au Chili en 2021.



Transport maritime : l'ammoniac prend le large

Une réflexion similaire anime le secteur des transports maritimes. Dans le domaine des bateaux longue distance, la combustion de l'hydrogène, un temps envisagée, semble aujourd'hui délaissée au profit d'un proche cousin, l'ammoniac. De formule NH_3 , ce gaz peut là encore être fabriqué de façon neutre à partir d'hydrogène décarboné et d'azote (N_2) selon le procédé Haber-Bosch. Avec un avantage : « Les infrastructures portuaires sont déjà conçues pour manipuler ce gaz, liquide à $-33,5^\circ\text{C}$, qui entre notamment dans la fabrication des engrais industriels », explique François Kalaydjian, directeur Économie et Veille à l'IFPEN. Mais là encore, la partie n'est pas jouée : l'ammoniac est un gaz toxique dont la manipulation nécessite des précautions. Un autre dérivé d'hydrogène décarboné et de CO_2 , le méthanol, est donc en lice pour brûler dans les imposants moteurs à deux temps des cargos.

Moteurs à hydrogène ou piles à combustible ; carburants de synthèse, ammoniac, méthanol... de nombreuses options sont ainsi sur la table pour décarboner l'ensemble des transports longue distance. « Au contraire de l'automobile grand public où la batterie électrique va s'imposer, l'avenir du secteur ne sera pas 'monotechnologique'. La décarbonation y est plus difficile, et les usages plus divers », résume Gaétan Monnier. Si l'avenir n'appartient donc pas intégralement au moteur à hydrogène et à ses dérivés, « Il fait bien partie du bouquet de solutions qui permettront de relever le défi ». ▶

Une conclusion à rebours de celle d'associations environnementales, comme Transport & Environnement, qui plaident pour l'électrification intégrale du transport routier. La Commission Européenne devrait trancher ce débat début 2023. Elle doit en effet revoir la définition des « véhicules zéro émission », qui se résumait jusqu'ici à un niveau d'émission à l'échappement de moins d'un gramme de CO₂ par kilomètre. « Si ce critère est maintenu, on ne sait pas si des motorisations thermiques utilisant un combustible sans carbone

comme l'hydrogène ou l'ammoniac pourront y prétendre, car ces moteurs brûlent malgré tout une petite quantité d'huile. Or les infimes émissions de CO₂ qui en résultent sont difficiles à quantifier », souligne Gaétan Monnier. « Un abandon du principe de neutralité technologique serait dommageable, car toutes les technologies seront nécessaires pour décarboner les transports de façon réaliste », conclut François Kalaydjian. ■

Hugo Leroux

Bonus

Quel est le carburant idéal pour décarboner le transport maritime ?

Deux tiers des émissions de gaz à effet de serre (GES) actuelles pourraient être évitées grâce à un *mix* énergétique renouvelable³. Il faut également considérer la disponibilité pour un déploiement à large échelle. Pour les petits navires fluviaux, la propulsion électrique est intéressante et déjà utilisée. La capacité des batteries ne permet cependant pas d'alimenter de gros navires aujourd'hui. Pour eux, les carburants à base d'hydrogène d'origine renouvelable sont les plus adaptés.

Pour les petites à moyennes distances, l'hydrogène peut être directement utilisé dans une pile à combustible ou un moteur à combustion. Pour les longues distances, la place nécessaire au stockage de grandes quantités d'hydrogène est une limite. Les électro-carburants sont la meilleure alternative. Je pense par exemple au e-méthanol ou au e-ammoniac, produits à partir d'hydrogène d'origine renouvelable. Le potentiel de réduction des émissions de GES à l'aide de ces solutions est estimé supérieur à 70 %, voire 100 % dans le cas de l'e-ammoniac.

La principale limite actuellement est leur prix. Tous les carburants à base d'hydrogène renouvelable sont très chers. L'e-ammoniac, le moins cher d'entre eux, est environ quatre fois plus cher que les biocarburants⁴. Bien sûr, une adoption plus large permettra de faire des économies d'échelle. Mais leur prix restera inévitablement plus élevé que celui des fiouls.

Qu'est-ce que les électro-carburants ?

Les e-carburants désignent l'ensemble des carburants à base d'hydrogène, généralement sous forme liquide pour les usages maritimes. Outre l'hydrogène lui-même, les e-carburants comprennent l'e-ammoniac, fabriqué à partir d'hydrogène et d'azote. Les carburants synthétiques, comme le e-méthanol, le e-méthane et l'e-diesel, sont eux fabriqués à l'aide de dihydrogène (H₂) et de dioxyde de carbone (CO₂). L'hydrogène peut lui être produit par électrolyse de l'eau, puis combiné au CO₂ dans un réacteur thermocatalytique pour produire le carburant. Le CO₂ peut être capté dans l'atmosphère, ou d'origine biologique par les déchets agricoles et ménagers. Leur empreinte carbone peut être beaucoup moins intéressante si le carbone et l'hydrogène sont d'origine fossile : le bilan carbone sur l'ensemble du cycle de vie devient alors supérieur aux carburants conventionnels.

Propos recueillis par Anaïs Maréchal



Delphine Gozillon

Shipping officer au sein de la
fédération européenne pour le
transport et l'environnement

Rédacteur en chef : James Bowers
Cheffe de projet : Viviane de Castro Rodriguez
Assistante d'édition : Poline Barthès
Maquettiste : Pablo Andres
Infographies : Pablo Andres, Poline Barthès

Crédits : AdobeStock