



**H<sub>2</sub>**  
HYDROGEN

# LE PARI DE L'HYDROGÈNE VERT

# SOMMAIRE

<b>SOMMAIRE</b>	<b>2</b>
<b>INTRODUCTION</b>	<b>3</b>
<b>L'EUROPE À FOND SUR L'HYDROGÈNE</b>	<b>4</b>
▪ <b>LE PIIEC HYDROGÈNE, CARREFOUR DES AMBITIONS ÉCOLOGIQUES EUROPÉENNES</b>	<b>4</b>
▪ <b>DÉPLOIEMENT DE LA FILIÈRE HYDROGÈNE : « LA DIFFICULTÉ PRINCIPALE SE SITUE SUR LE TERRAIN RÉGLEMENTAIRE »</b>	<b>6</b>
▪ <b>« NOUS VOULONS DEVENIR LEADER SUR LE MARCHÉ EUROPÉEN DU VÉHICULE UTILITAIRE HYDROGÈNE »</b>	<b>9</b>
▪ <b>QUELS SERONT LES BÉNÉFICES CLIMATIQUES D'UNE ÉCONOMIE DE L'HYDROGÈNE ?</b>	<b>12</b>
<b>POUR ALLER PLUS LOIN</b>	<b>14</b>
▪ <b>UE : LA FAUSSE INTERDICTION DES MOTEURS THERMIQUES EN 2035</b>	<b>14</b>
▪ <b>JCB : DE L'HYDROGÈNE DANS LE MOTEUR</b>	<b>16</b>
▪ <b>UN NOUVEAU MATÉRIAU POUR LA PRODUCTION D'HYDROGÈNE VERT À GRANDE ÉCHELLE</b>	<b>18</b>
▪ <b>QUELS MATÉRIAUX POUR UN STOCKAGE DE L'HYDROGÈNE PLUS PERFORMANT ET ACCESSIBLE ?</b>	<b>21</b>
▪ <b>LE VÉRITABLE COÛT DE L'HYDROGÈNE VERT</b>	<b>23</b>
▪ <b>LES THÈSES DU MOIS : LE PARI DE L'HYDROGÈNE VERT</b>	<b>24</b>

# INTRODUCTION

Le projet important d'intérêt européen commun (PIIEC) doit constituer un tremplin pour faire de l'hydrogène le vecteur énergétique du futur en Europe.

Par ce PIIEC, la commission européenne autorise un soutien public, qui avoisine 5,4 milliards d'euros, par les 15 États membres pour le développement et la recherche sur des technologies liées à la chaîne de valeur de la technologie hydrogène.

Cette manne financière va accompagner 35 entreprises sur une quarantaine de projets, qui ont déjà pris place dans plusieurs États membres, dont l'hexagone fait partie.

L'idée de faire de l'hydrogène un vecteur important dans le mix énergétique français pas nouvelle. Aujourd'hui, la contrainte principale, pour réduire les émissions de gaz à effet de serre liées à l'utilisation de l'hydrogène, consiste à le produire de manière décarbonée : le fameux hydrogène vert. Cet hydrogène vert est produit par électrolyse de l'eau via une source d'électricité décarbonée. Comme l'est l'électricité nucléaire. Une étude du CNRS estime qu'une tonne d'hydrogène rejetée dans l'atmosphère "produit" treize fois moins de gaz à effet de serre qu'une tonne de CO<sub>2</sub>.

Le PIIEC constitue donc le signal d'un déploiement industriel des technologies hydrogène sur le continent. Pour l'heure, la production d'hydrogène en France est très largement - 94 % - carbonée. Tout l'enjeu consiste à entraîner certaines filières industrielles vers de nouveaux usages énergétiques, au profit de l'utilisation d'hydrogène. En France ce dernier est très majoritairement utilisé dans la chimie et le raffinage. La volonté derrière les investissements actuels est d'élargir les usages de l'hydrogène, en en faisant un vecteur énergétique, notamment pour le stockage. Ensuite, la molécule doit révolutionner le secteur des transports. Pour ce dernier, l'usage de l'hydrogène, sous forme de combustible ou alors au sein d'une pile à combustible, permettrait de faire baisser substantiellement les émissions liées aux transports, qui représentent en France plus d'un quart des émissions de GES.

## L'EUROPE À FOND SUR L'HYDROGÈNE

# LE PIIEC HYDROGÈNE, CARREFOUR DES AMBITIONS ÉCOLOGIQUES EUROPÉENNES

*Le projet important d'intérêt européen commun consacré à l'hydrogène va permettre à l'Europe de déployer dans certains de ces États membres des technologies de production et de stockage d'hydrogène.*

Cet outil, validé par la commission européenne, verra quelque **5,4 milliards d'euros soutenir près de 41 projets** relatifs à la **molécule hydrogène**. A cette manne s'ajouteront près de 9 milliards d'investissements venant du secteur privé.

Quinze États membres sont impliqués : l'Allemagne, l'Autriche, la Belgique, le Danemark, l'Espagne, l'Estonie, la Finlande, la France, la Grèce, l'Italie, les Pays-Bas, la Pologne, le Portugal, la Slovaquie et la Tchéquie.

Les 41 projets sélectionnés couvrent l'ensemble de la chaîne de valeur des technologies hydrogène : production, pile à combustible, stockage, transport, distribution, et applications d'utilisation finale, en particulier pour le secteur de la mobilité. Cette offensive sur l'hydrogène va créer de l'emploi (on parle de **100 000 postes** d'ici à 2030 sur l'ensemble de la filière au niveau européen), et permettre aux pays membres de l'UE d'accélérer leur transition énergétique, en remplaçant, quand cela est possible, la consommation d'énergies fossiles par celle de l'hydrogène. C'est particulièrement vrai pour un secteur comme l'automobile et les transports en général, qui génère à lui seul près du quart des émissions de gaz à effet de serre au niveau européen.

Concrètement, quelle est la raison d'être de ce PIIEC sur l'hydrogène ? Tout d'abord sa dimension : en formalisant au niveau européen des investissements massifs autour de

l'hydrogène, les acteurs continentaux sont plus à même de mettre les différents projets en cohérence, et au-delà éviter des distorsions de concurrence.

Côté français, les **10 projets retenus**, et financés à hauteur de 2,1 milliards d'euros, constituent le tremplin tricolore vers une économie hydrogène décarbonée. C'est ainsi que sept gigafactories doivent voir le jour, réparties sur le territoire français, créant au passage **5200 emplois directs**. Ces giga usines assureront la **production d'électrolyseurs**, de piles à combustible, de réservoirs d'hydrogène, mais aussi de véhicules (trains et automobiles) et de matériaux.

Les plus grandes entreprises françaises sont impliquées sur le PIIEC : Air Liquide, McPhy, Alstom, Renault, Faurecia, et d'autres fleurons de l'industrie française sont ainsi engagés sur les **10 projets** prenant place sur le territoire. Les autres projets européens, sont eux aussi portés par des grands groupes industriels, accompagnés de quelques jeunes pousses.

Pour l'Europe, le pari sur l'hydrogène est risqué et extrêmement ambitieux. En effet, selon les estimations, l'hydrogène pourrait représenter jusqu'à **20 % du mix électrique européen** à l'horizon 2050. Partant de là, l'hydrogène pourrait couvrir 2 à 50 % de la demande énergétique dans les transports, et entre 5 et 20 % de la demande énergétique pour l'industrie.

Pour atteindre ces objectifs, la contrainte majeure consiste à produire de l'hydrogène décarboné, dit vert, voire jaune dans le cas de l'électrolyse de l'eau alimentée par de l'électricité nucléaire. Le PIIEC et les investissements européens ont pour objectif de produire de l'hydrogène décarboné, seul hydrogène permettant de réduire efficacement les

émissions de gaz à effet de serre.

Seconde contrainte, les fuites d'hydrogène potentielles, liées au déploiement massif de la molécule. Les simulations démontrent que les effets indirects d'une augmentation du taux d'hydrogène atmosphérique sur les autres gaz à effet de serre peuvent rendre le bilan global des technologies hydrogène négatif en termes de bilan GES global.

Les objectifs élevés de la France et de l'Europe sur l'hydrogène vont, d'ici à 2030, révolutionner le mix énergétique continental, à condition de lever les deux verrous technologiques que constituent la [production décarbonée de l'hydrogène](#), et la limitation des fuites potentielles dans l'atmosphère.

11/04/2023

# DÉPLOIEMENT DE LA FILIÈRE HYDROGÈNE : « LA DIFFICULTÉ PRINCIPALE SE SITUE SUR LE TERRAIN RÉGLEMENTAIRE »

*France hydrogène est une association qui fédère les acteurs de la filière hydrogène. Les 460 membres de France Hydrogène représentent l'ensemble de la chaîne de valeur de l'hydrogène : cela va du monde industriel au monde académique, en passant par la recherche, les laboratoires et les collectivités territoriales.*

Au niveau industriel, France Hydrogène regroupe plus de 110 grands groupes industriels, des secteurs de la mobilité, de l'industrie ou de l'énergie, ainsi que plus de 200 PME ayant des activités sur la chaîne de valeur industrielle de l'hydrogène. Un écosystème en pleine effervescence depuis quelques années, et l'engagement national et européen sur les technologies hydrogène, le vieux continent voulant faire de la molécule le vecteur énergétique de la prochaine décennie.

Christelle Werquin, déléguée générale de France Hydrogène, a expliqué à Techniques de l'Ingénieur comment les investissements massifs autour de l'hydrogène en France et en Europe, notamment via le PIIEC hydrogène, sont un tremplin pour la filière, sous certaines conditions.

**Techniques de l'Ingénieur : Sur le terrain, quelles sont les conséquences des investissements massifs annoncés pour déployer une filière européenne des technologies hydrogène ?**

**Christelle Werquin :** La dynamique actuelle autour de l'hydrogène s'incarne aujourd'hui beaucoup au niveau d'écosystèmes territoriaux, c'est pourquoi nous avons, dès 2020, créé des délégations régionales, qui sont aujourd'hui

au nombre de 14. Cette action au niveau des régions nous permet d'aider à fédérer les acteurs de la filière au niveau territorial ; notre rôle fondamental étant d'être l'interlocuteur des pouvoirs publics sur le déploiement dans tous les secteurs des technologies hydrogène, au plan national comme local.

Nous agissons également au niveau européen, et même mondial pour porter la voix de la filière française à l'international, puisque le déploiement de l'hydrogène connaît une accélération partout dans le monde.

**Quel rôle joue le PIIEC par rapport aux autres dispositifs mis en place pour développer la filière hydrogène ?**

Le PIIEC est un outil utilisé par l'Etat français dans le cadre de la stratégie nationale hydrogène, aux côtés du PEPR hydrogène, ou encore des appels à projet pilotés par l'ADEME.

Il permet aux pays européens qui le souhaitent, d'identifier des entreprises leader sur les technologies hydrogène et de leur apporter un appui financier, à certaines conditions. L'objectif étant de faire du déploiement de la filière hydrogène une ambition commune au niveau de l'Europe.

Le processus de sélection des industriels bénéficiant du PIIEC a été long, près de 18 mois, durant lesquels les projets ont été sélectionnés, en deux vagues. La première vague a permis de sélectionner des projets recouvrant l'ensemble de la chaîne de valeur technologique de l'hydrogène, et a vu 10 projets français sélectionnés sur un

total de 35. La seconde vague a vu deux projets français de décarbonation de l'industrie être à leur tour sélectionnés. Deux autres vagues de sélection sont prévues, sur les aspects infrastructure et mobilité. Les 10 premiers projets français sélectionnés représentent 2,1Md€ d'argent public, pour un investissement global de 5,2Md€. Ce soutien public génère ainsi de l'investissement privé. Cela doit permettre de faire passer de nombreux projets à l'échelle industrielle sur le court terme.

### **Le déploiement en cours permettra-t-il d'atteindre les objectifs écologiques fixés par l'Europe ?**

L'Europe s'est fixée des objectifs climatiques très ambitieux à travers le paquet de propositions "Fit for 55", puis le "REPowerEU", mis en place à l'aune de la situation en Ukraine et des incertitudes en termes d'[approvisionnement énergétique](#) qui en découlent. L'idée étant de sortir le plus vite possible de notre dépendance au gaz fossile.

Pour atteindre ces objectifs, il va donc falloir être en mesure de produire et d'importer de grandes quantités d'hydrogène dans les années qui viennent. L'objectif fixé est de produire 10M de tonnes d'[hydrogène renouvelable](#) au sein de l'Union européenne, et d'en importer 10M de tonnes, pour répondre aux besoins estimés à 20Mt en 2030 à l'échelle européenne.

Il faut donc une qualification claire de l'hydrogène renouvelable, et des règles pour répondre aux enjeux de décarbonation sectorielle fixés par l'UE. Les règles européennes mettent la plupart du temps un long moment avant d'être adoptées, car elles sont le fruit de nombreuses négociations. L'adoption mi-février[1] des [deux premiers actes délégués](#) requis au titre de la directive sur les énergies renouvelables (RED2), et qui permettent de [qualifier l'hydrogène](#) d'origine renouvelable et de connaître la méthodologie carbone associée, a été largement saluée malgré certaines réserves, tant l'ensemble des acteurs industriels ont besoin d'un cadre réglementaire clair et stable, notamment face aux ambitions américaines ou chinoises.

Des discussions ardues sont en cours pour finaliser l'adoption de la [directive révisée RED3](#). Celles-ci fixent des cibles

de décarbonation par secteur (industrie et transport), à atteindre via l'hydrogène renouvelable ou ses dérivés. Dans ce contexte la France défend la possibilité d'utiliser l'hydrogène produit à partir d'électricité nucléaire pour répondre aux ambitions.

### **L'immense chantier mis en place pour déployer une filière hydrogène au niveau européen constitue-t-il un risque industriel ?**

Le risque ne réside pas dans le fait d'avoir des ambitions importantes, mais plutôt dans le fait de prendre garde à ne pas mettre en place des contraintes qui empêcheraient d'atteindre ces objectifs. Par exemple, si on veut, ce sont les objectifs, produire 10 millions de tonnes d'hydrogène renouvelable sur le sol européen à l'horizon 2030, cela signifie qu'il nous faut produire près de 550 TWh additionnels d'électricité renouvelable. Ce qui est énorme. Au vu des difficultés à implanter de nouveaux ENR, avec les règlements sur l'addition et la temporalité notamment, on voit bien que la difficulté principale ne se situe pas sur un plan technique mais plutôt réglementaire. Comme souvent, on observe un tiraillement entre l'ambition politique affichée, et les règles concrètes qui sont mises en place pour les acteurs industriels.

Sur l'hydrogène, le cadre européen n'est aujourd'hui pas clair sur beaucoup de points, avec pour conséquence le fait de voir certains projets dans le flou, et des décisions d'investissements qui ne sont pas prises. L'aboutissement d'un cadre clair autour de l'hydrogène et de son utilisation, le plus rapidement possible, est fondamental au déploiement et à la compétitivité de la filière en France et en Europe.

### **L'hydrogène peut-il permettre de décarboner substantiellement le secteur très émetteur des transports ?**

Il faut raisonner en termes d'objectifs et d'usages. Si l'objectif est de décarboner massivement les transports, il existe plusieurs possibilités, pas seulement l'hydrogène. Donc il faut qu'un ensemble de solutions soient développées. Dans un contexte de mobilité zéro émission à l'échappement ou d'incorporation d'énergie renouvelable dans le transport, l'hydrogène joue un rôle essentiel. Il permet en

effet de décarboner tout en préservant la facilité d'usage (autonomie, temps de recharge) d'un véhicule thermique. Il y a de la place à la fois pour les véhicules électriques à batterie et hydrogène dans ce cadre-là.

Si on sort de l'industrie des transports pour se projeter sur l'industrie tout court, il y a de nombreux process industriels qui seront difficiles à électrifier, donc là encore, on peut imaginer plusieurs solutions, dont l'hydrogène, afin de décarboner ces processus dans le futur.

#### **Quel est l'état d'esprit de la filière aujourd'hui ?**

Le lancement de la stratégie hydrogène en 2020 a créé un réel enthousiasme. Beaucoup d'appels à projets se sont lancés, rapidement. Aujourd'hui, avec la **révision stratégique** en cours sur l'hydrogène, nous sommes un peu plus en alerte. Avec la volonté de relier la stratégie hydrogène à la décarbonation des 50 sites les plus émetteurs sur le territoire, nous risquons de cantonner l'hydrogène à la décarbonation. Or, c'est aussi une filière industrielle créatrice d'emplois dans les territoires. Nous sommes donc attentifs aux révisions qui vont être faites sur la stratégie hydrogène cet automne{2}.

Au-delà, il est vital pour la France de développer sur son territoire des technologies performantes autour de l'hydrogène pour pouvoir ensuite les valoriser. Pour en arriver là, il est nécessaire que le pays soit une vitrine pour ces technologies, avec des projets importants développés sur notre sol. C'est tout un tissu économique local, sur les territoires, qu'il faut déployer et pérenniser autour de l'hydrogène, pour être également acteur de la réindustrialisation de l'hexagone, voulue par le Président de la République.

C'est aussi pour cela qu'il faut songer à développer des projets de taille intermédiaire, qui peuvent être mis en route rapidement, pour mailler le territoire et développer localement des nouveaux usages. Il y a un enjeu de temporalité, entre la mise en place de très gros électrolyseurs pour la décarbonation de sites industriels, et des équipements ou des projets – notamment en mobilité –, déjà prêts à être lancés. Le déploiement de l'hydrogène répond à des enjeux structurants tant en termes de souveraineté énergétique

que de souveraineté industrielle ou technologique.

**Propos recueillis par Pierre Thouverez**

*[1] Le 13 février 2023*

*{2} Automne 2023*

12/04/2023



# « NOUS VOULONS DEVENIR LEADER SUR LE MARCHÉ EUROPÉEN DU VÉHICULE UTILITAIRE HYDROGÈNE »

*HYVIA, coentreprise entre Renault Groupe et PLUG fondée en 2021, fait partie des entreprises françaises sélectionnées pour bénéficier du PIIEC européen, qui vise à accélérer certains projets identifiés comme porteurs pour le développement d'une filière hydrogène au niveau européen.*

Mehdi Ferhan, Directeur général en charge des opérations chez [HYVIA](#), a expliqué à Techniques de l'Ingénieur la stratégie de l'entreprise pour devenir un leader sur le marché des véhicules utilitaires à [hydrogène](#), dans un contexte de mise en place par l'Europe des briques pour développer une véritable filière européenne autour de l'hydrogène.

**Techniques de l'Ingénieur : Quels sont les enjeux aujourd'hui autour du développement de la mobilité hydrogène pour Hyvia ?**

**Mehdi Ferhan :** L'[hydrogène vert](#) pour la mobilité constitue à lui seul un écosystème, avec sa chaîne de valeur. Cela concerne les véhicules, mais aussi les piles à combustible, les stations de recharge, et la production d'hydrogène à partir d'[électrolyseurs](#). Il s'agit donc de développer cet écosystème dans son ensemble, et c'est la raison d'être d'HYVIA.

Aujourd'hui, HYVIA dispose d'une usine à Flins pour l'assemblage des piles à combustible et d'un site partenaire, PVI, situé à Gretz-Armainvilliers, pour l'intégration des piles à combustibles sur les Renault Master H2-TECH. C'est sur ce dernier site que sont fabriqués les Renault Master H2-TECH dont la version Van "grand fourgon" vient d'être homologuée pour l'ensemble du marché européen.

**Hyvia a été sélectionnée pour bénéficier du PIIEC européen sur l'hydrogène. Dans quelle mesure cela va-t-il**

**accélérer le développement de l'entreprise ?**

Le PIIEC hydrogène est un des mécanismes mis en place au niveau européen pour accélérer le développement de la chaîne de valeur autour des technologies hydrogène.

L'ambition étant de mettre en place au niveau européen toutes les briques technologiques qui constitueront une filière à part entière, sur l'ensemble de la chaîne de valeur de l'hydrogène, notamment en développant de nouvelles technologies.

Dans le cas d'HYVIA, qui a été notifié de sa sélection à l'automne dernier<sup>[1]</sup>, le PIIEC va permettre de mettre en place tout l'écosystème nécessaire à la production de piles à combustible, produites sur le site de Flins, où HYVIA vient d'ailleurs tout juste d'installer son [premier électrolyseur livré par PLUG](#). Cela consiste dans un premier temps à l'assemblage des systèmes à pile à combustible puis à l'intégration réalisée dans les véhicules. Cette accélération est donc également un moyen de favoriser la réalisation d'opérations industrielles localement, sur les territoires.

Dans une seconde étape, ces développements vont se matérialiser par la construction d'une gigafactory, qui sera en mesure de fabriquer des piles à combustibles à l'échelle industrielle, pour un marché du véhicule utilitaire léger qui devrait décoller dans les prochaines années.

**Quelles sont les étapes qui vont aboutir à la mise en route de cette gigafactory ?**

La mise en place de cette gigafactory s'inscrit dans un processus par étapes. Nous avons démarré au mois de mars 2022, par l'inauguration de notre usine pilote à Flins : les

premiers 3500 mètres carrés d'infrastructure industrielle nous permettent d'assembler une première génération de systèmes à pile à combustibles PEM "ProGEN", délivrant une puissance de 30 kW.

Ces piles sont vouées à s'intégrer dans des systèmes de propulsion hybrides. L'architecture des véhicules, que l'on appelle "dual power", est constituée de la pile à combustible d'un côté, avec des bonbonnes stockant de l'hydrogène à 700 bars, et également d'une batterie, ce qui permet de bénéficier de différents modes de propulsion et de recharge. Ceci est très important pour proposer des véhicules dont l'utilisation ne soit pas uniquement dépendante de l'hydrogène. En effet, les infrastructures de recharge en hydrogène ne sont pour le moment pas suffisamment déployées sur le territoire, et cela ne doit pas brider l'usage des véhicules. L'idée est donc de pouvoir faire une recharge en électricité quand la recharge en hydrogène n'est pas possible, tout en conservant un véhicule zéro émission. Tout cela constitue la première étape pour HYVIA. Aujourd'hui, le site de Flins dispose d'une capacité de production de 1000 systèmes piles à combustible par an.

#### **Et sur le plus long terme ?**

D'ici à 2030, l'objectif pour l'entreprise est d'être un des leaders européens du véhicule utilitaire à hydrogène, avec une ambition chiffrée. Nous voulons capter 30% du marché sur le véhicule utilitaire à hydrogène d'ici à la fin de la décennie. En cela, l'usine pilote de Flins constitue la première brique qui doit nous mener, d'ici 7 à 8 ans, à l'ambition que je viens d'évoquer. La seconde brique est la gigafactory, qui nous permettra de massifier la production, et de localiser les technologies nécessaires au déploiement de tout l'écosystème hydrogène sur le territoire, aux niveaux français et européen.

Nous allons passer par un déploiement de nos véhicules utilitaires par le réseau Renault, dans un premier temps. Ce réseau est constitué de concessionnaires agréments du label PRO+ avec une gamme de services adaptés aux professionnels. Ce réseau opère en France, mais éga-

lement dans des pays comme l'Allemagne et les Pays-Bas, qui sont très actifs en matière de décarbonation par l'hydrogène. L'étape suivante consistera à poursuivre ce déploiement européen en passant par la Grande Bretagne, l'Espagne, le Portugal, les pays scandinaves, la Suisse, la Pologne, et la République Tchèque... d'ici à deux ans, l'objectif sera donc de déployer dans une douzaine de pays européens des capacités de commercialisation, mais aussi d'assurer la maintenance et tous les services associés : réparation, mise à disposition de véhicules de prêt, pièces de rechange, recharge via de stations à hydrogène... le tout en restant compétitifs, bien sûr.

#### **Quels sont les freins persistants au développement de la mobilité hydrogène ?**

Une des problématiques spécifiques à notre activité est aujourd'hui de créer le marché en apportant toutes les briques. Nous sommes au début de l'aventure des véhicules à hydrogène, il est donc difficile de prévoir exactement comment va évoluer la demande de la mobilité hydrogène. A l'heure actuelle, nous disposons de technologies robustes et éprouvées, notamment grâce au savoir-faire de PLUG sur cette molécule. D'ailleurs la plupart des solutions ont déjà été industrialisées dans le domaine du transport logistique des marchandises. Néanmoins, pour les rendre disponibles au plus grand nombre dans le secteur de la mobilité, il existe encore un certain nombre de verrous technologiques, économiques et réglementaires notamment. Le déploiement de la filière européenne est par exemple un grand défi : nous avons besoin de partenaires, de fournisseurs ayant une expertise automobile, afin de développer nos technologies avec les standards automobiles bien connus pour les moteurs thermiques. L'objectif est également de développer cette filière localement, au niveau européen, à des fins de compétitivité, mais aussi dans un souci de limiter notre empreinte environnementale tout en renforçant notre autonomie.

L'ambition européenne, à travers les grands programmes de décarbonation, notamment [Fit for 55](#), est très importante. Cela bouleverse le paysage automobile, et rend particulièrement attractives les solutions de propulsion à l'hy-

hydrogène comme celles proposées par HYVIA. A un niveau plus local, les réglementations concernant par exemple les zones à faibles émissions (ZFE) qui vont se mettre en place progressivement dans les centres-villes des grandes villes, puis dans les zones périurbaines, vont nécessiter des solutions palliatives aux véhicules thermiques. Là aussi, nous pensons qu'HYVIA peut se faire une place de leader, notamment sur tout ce qui touche aux cas d'usage de la livraison de matériel et de colis, notamment sur la problématique du dernier kilomètre.

**Pour terminer, quelle est votre stratégie en termes de formation aux nouveaux métiers liés aux technologies hydrogène ?**

Chez HYVIA, nous avons un questionnement permanent sur ce que seront les compétences clés dont nous aurons besoin dans les années qui viennent pour développer la mobilité hydrogène. L'hydrogène est un gaz qui nécessite d'être appréhendé de façon sécuritaire, avec tous les moyens de contrôle qui sont développées autour de son usage. Créer les métiers de demain au sein de cette filière est donc un enjeu énorme.

Sur le site de Flins, cela fait deux ans que des ouvriers, opérateurs, ou techniciens, qui évoluaient pour certains depuis plusieurs années au sein de l'usine de Renault, ont migré chez HYVIA pour poursuivre leur carrière. Nous les avons accompagnés dans des parcours de formation pour leur permettre de développer des compétences en rapport avec les nouvelles technologies de l'hydrogène. Certains ont même eu l'opportunité de se rendre chez notre autre partenaire, PLUG, aux Etats-Unis, pour se former spécifiquement aux techniques de montage des piles à combustible.

Toutes ces actions nous permettent de développer des parcours de formation spécifiques à l'hydrogène et qui respectent les standards liés à l'automobile, pour préparer les ressources dont nous allons avoir besoin dans les prochaines années.

[1] 2022

**Propos recueillis par Pierre Thouverez**

19/04/2023

# QUELS SERONT LES BÉNÉFICES CLIMATIQUES D'UNE ÉCONOMIE DE L'HYDROGÈNE ?

*Les investissements massifs, en France et en Europe, autour des technologies hydrogène font de cette molécule le cœur de la stratégie continentale pour diminuer les émissions de gaz à effet de serre.*

Il convient de souligner que si l'**hydrogène** n'est pas un gaz à effet de serre en tant que tel, il est considéré comme un **gaz climatique indirect** : c'est-à-dire qu'il induit des perturbations sur d'autres gaz, comme le méthane, l'ozone et la vapeur d'eau dans l'atmosphère, trois puissants gaz à effet de serre.

Tout un ensemble de recherches et de simulations permettent d'anticiper les conséquences pour le climat et les températures d'une hausse de la concentration atmosphérique en hydrogène, qui résulterait de l'usage massif de cette molécule dans le mix énergétique européen, mais aussi mondial.

Ainsi, les deux problématiques majeures concernant la massification de l'hydrogène en tant que vecteur énergétique résident dans les méthodes de production, et donc dans les conséquences de l'augmentation de sa concentration atmosphérique sur les autres GES.

## Les émissions liées à la production

Vecteur principal de la transition énergétique en cours, l'hydrogène peut être produit par différentes méthodes. La plus connue est l'électrolyse de l'eau, qui permet, si l'énergie nécessaire à l'électrolyse est d'origine renouvelable, d'obtenir de l'**hydrogène "vert"**.

La seconde technologie de production est le **vaporeformage** de l'hydrogène, qui permet de produire de l'hydrogène "bleu", si du carbone est séquestré lors de cette phase de production, ou "gris" (pas de séquestration de carbone).

En 2020, **94 % de l'hydrogène en France était gris**, c'est-à-dire produit à partir d'énergies fossiles. On voit bien que la méthode de production, au-delà des effets de l'hydrogène sur les autres gaz à effet de serre, induit déjà des conséquences sur l'atténuation des émissions de GES via les méthodes de production d'hydrogène. Les investissements actuels, notamment via le PIIEC sur l'hydrogène, visent à produire un maximum d'hydrogène décarboné, **notamment en France** en utilisant de l'électricité "nucléaire" pour l'électrolyse de l'eau. On parle d'**hydrogène "jaune"**.

## L'hydrogène, gaz climatique indirect

La seconde source d'augmentation des GES de par l'utilisation massive de l'hydrogène concerne les effets induits par une augmentation du taux d'hydrogène dans l'air atmosphérique. Cette augmentation serait principalement liée à des fuites de la molécule. Naturellement présent dans l'atmosphère mais sous forme de traces - environ 0,510 ppm - l'hydrogène a une durée de vie longue, ce qui lui permet de rejoindre les plus hautes couches de la stratosphère. Lorsque c'est le cas, le gaz réagit avec les radicaux hydroxyles (OH) pour former de la vapeur d'eau, ce qui a tendance à refroidir la stratosphère et ralentit la **reconstitution de la couche d'ozone**.

En réagissant avec les radicaux hydroxyles, l'hydrogène se substitue à d'autres gaz, qui réagissent habituellement avec ces radicaux, comme le méthane (mais aussi les molécules type CO et NOx). Il convient donc, pour analyser l'impact de l'hydrogène en tant que gaz climatique indirect, d'évaluer quelle pourrait être le volume des fuites de H<sub>2</sub> dans l'atmosphère, pour évaluer la quantité de gaz à effet de serre "produite" par la massification de H<sub>2</sub> en tant que vecteur énergétique.

Le CNRS a, en simulant les effets que nous venons de mentionner, évalué que le rejet d'une tonne d'hydrogène "vert" dans l'atmosphère correspondrait à l'équivalent de **13 tonnes de CO2 émises**.

En ce qui concerne l'hydrogène "bleu" ou "gris", les émissions de méthane et de CO2 associées à leur production et à leur transport rendent leur bénéfice climatique quasi nul.

En conclusion, il faudra veiller, en cas de massification de l'hydrogène en tant que vecteur énergétique, à quantifier précisément les fuites de H2 potentielles dans l'atmosphère, ainsi que les différents modes de production d'hydrogène utilisés. Ces calculs permettront d'**évaluer l'impact réel sur les émissions de gaz à effet de serre du pari technologique que constitue le choix de l'hydrogène** pour incarner la transition énergétique.

**Par Pierre Thouverez**

19/04/2023

## POUR ALLER PLUS LOIN

# UE : LA FAUSSE INTERDICTION DES MOTEURS THERMIQUES EN 2035

*L'UE interdira les moteurs thermiques carburant aux énergies fossiles en 2035. Le texte interdit ainsi les véhicules essence, diesel et hybride, au profit du 100% électrique. Mais la voie des carburants de synthèse sera finalement bien ouverte.*

L'Union européenne avait prévu en 2022 d'interdire les **moteurs thermiques** en 2035. Mais début mars, l'Allemagne avait créé la surprise en bloquant le texte au conseil de l'Union européenne, manifestant son souhait de développer les carburants synthétiques. Le texte avait pourtant fait l'objet en octobre d'un accord entre États membres, dont l'Allemagne, et négociateurs du Parlement européen, et avait été formellement approuvé mi-février par les euro-députés.

En raison de cette abstention sur le texte sur cette dernière étape, le vote avait été reporté sine die. Sans l'Allemagne, la majorité qualifiée des 27 qui est requise (vote favorable d'au moins 55 % des États représentant au moins 65 % de la population de l'UE) n'était en effet plus atteinte.

La Commission européenne et l'Allemagne ont finalement annoncé samedi 25 mars avoir trouvé un accord pour débloquent le texte. Ce dernier reste inchangé. Mais Bruxelles s'est engagée à une dérogation pour les véhicules utilisant du carburant synthétique (ou e-fuels), comme le demandait l'Allemagne, dans une proposition séparée. Celle-ci devra être validée d'ici à l'automne 2024.

### Des carburants synthétiques après 2035

Les véhicules équipés d'un **moteur à combustion** pourront être immatriculés après 2035 s'ils utilisent exclusivement des carburants neutres en termes d'émissions de CO2, s'est réjoui le ministre allemand des Transports, Volker Wissing. Ces carburants synthétiques peuvent être produits par un mélange entre du CO2 et de l'hydrogène. Le premier pour-

rait être récupéré dans l'atmosphère ou capturé en sortie des usines, le second produit par électrolyse de l'eau grâce à des énergies renouvelables.

Pour la filière automobile, cette décision permettra de prolonger l'utilisation des moteurs thermiques. Mais l'usage de cette technologie dans l'automobile est contesté, car elle demande beaucoup d'électricité. Elle coûte aussi cher, a peu de chances de s'imposer sur le marché des véhicules particuliers et ne concernerait dans le meilleur des cas qu'une minorité de véhicules de luxe, estiment de nombreux experts.

Porsche et Ferrari, notamment, soutenaient la position de l'Allemagne. Le premier a inauguré sa **première usine de production en Chili en décembre 2022**. Le second mise toujours sur les moteurs thermiques. « *La bonne nouvelle pour nous, c'est que nous allons pouvoir continuer à vendre des moteurs thermiques en plus de nos **moteurs électriques*** », a de son côté réagi le PDG de Ferrari, Benedetto Vigna auprès de **Reuters**.

### Des carburants pour les plus riches qui retardent l'action climatique

Dans **un rapport**, l'ONG Transport & Environnement estime que l'essence synthétique pourrait coûter plus de 2,82 euros par litre à la pompe en France en 2030, soit presque 50 % de plus que l'essence ordinaire aujourd'hui. « *Le coût plus élevé des e-fuels signifiera que seuls les riches pourront se les offrir, tandis que tous les autres seront poussés à contourner les règles et à utiliser de l'essence fossile à la place. Les automobilistes et le climat seront perdants* », estime Marie Chéron, responsable des politiques véhicules à T&E France.

Julia Poliscanova, directrice principale des véhicules et de la mobilité chez Transport & Environnement, estime même

cet accord dangereux. *« Les carburants de synthèse sont une diversion coûteuse et massivement inefficace de la transformation vers l'électrique qu'affrontent les constructeurs automobiles européens. Dans l'intérêt de la crédibilité climatique de l'Europe, l'accord sur les voitures zéro émission de 2035 doit entrer en vigueur sans plus tarder. »*

Du fait des ressources limitées en e-fuels, autoriser la vente de moteurs à combustion après 2035 pourrait priver les voitures existantes de cette solution nécessaire à leur décarbonation. *« Si l'essence de synthèse est employée dans les nouvelles voitures, les véhicules déjà en circulation consommeront 135 milliards de litres d'essence fossile supplémentaires et émettront 320 MtCO<sub>2e</sub> de plus d'ici à 2050 que si l'essence de synthèse était disponible pour le parc automobile existant »*, projette Transport & Environnement.

31/03/2023

# JCB : DE L'HYDROGÈNE DANS LE MOTEUR

*Le constructeur britannique d'engins de chantier JCB a annoncé en décembre dernier avoir franchi une étape majeure dans la production d'un moteur d'un genre nouveau : un moteur à combustion interne alimenté à l'hydrogène. Une solution zéro émission aussi performante que son équivalent diesel, dont vont ainsi bénéficier d'ici peu certaines machines du fabricant basé à Rocester, au Royaume-Uni.*

Le projet est né d'un challenge. Celui lancé à ses ingénieurs par le président du troisième constructeur mondial[1] d'engins de BTP, le groupe britannique JCB.

Il y a un peu plus de deux ans, en pleine montée de la pandémie de COVID-19, Anthony Paul Bamford – dit Lord Bamford, fils du fondateur qui a légué ses initiales au groupe, Joseph Cyril Bamford – a mis au défi son équipe R&D composée d'une centaine d'ingénieurs de concevoir rien de moins qu'un tout nouveau type de moteur : un moteur à combustion interne alimenté non pas par du gazole, mais par de l'**hydrogène**. Une voie alors encore quasi inexplorée dans le secteur des engins de chantier.

Aiguillonnés, c'est en l'espace de seulement quelques semaines que les ingénieurs sont parvenus à jeter les bases de cette innovation. Des mois de travail leur ont toutefois été nécessaires pour affiner ensuite la mise au point, puis l'intégration de ce moteur novateur dans un engin de chantier.

## Un fonctionnement entièrement revu

« Il ne s'agit pas d'une conversion à l'hydrogène, mais bien d'une toute nouvelle technologie de combustion », assure Ryan Ballard, directeur de l'ingénierie des groupes motopropulseurs chez JCB. « Nous avons dû passer au crible la plupart des éléments du moteur et nous les avons entière-

ment repensés pour l'hydrogène », poursuit le responsable.

Partant de la base d'un **moteur diesel** conventionnel, les ingénieurs n'en ont conservé que les bases, « l'ADN du moteur », tel que les décrit Ryan Ballard. Ils ont en revanche complètement revu de nombreux éléments clés, à commencer par le système d'injection, qu'ils sont en outre venus compléter par un dispositif d'allumage commandé. Contrairement au gazole, l'hydrogène utilisé comme carburant n'est en effet présent dans la chambre de combustion qu'à des pression et température relativement basses. Une étincelle est donc nécessaire pour initier sa combustion. Partant de ce principe, les ingénieurs de JCB se sont ainsi également attelés au développement d'un système électronique de pointe destiné à assurer un contrôle précis de l'allumage. Et outre cet aspect, l'équipe de développement s'est concentrée sur trois autres points clés.

Le premier d'entre eux est le turbo. Les ingénieurs britanniques ont en effet développé un modèle de **turbocompresseur** spécifiquement pensé pour les besoins du moteur à hydrogène : capable de comprimer un important volume d'air, il offre aussi un temps de réponse extrêmement court.

Afin d'en optimiser les caractéristiques, le comportement du mélange air/hydrogène introduit dans les cylindres du moteur a également été scruté à la loupe par les ingénieurs JCB, à grand renfort d'outils de modélisation numérique.

Enfin, l'équipe s'est penchée sur un ultime problème, qui aurait pu réduire à néant le reste de leurs efforts : celui de la gestion des gaz d'échappement. Contrairement au diesel, les gaz rejetés par le moteur à hydrogène sont en effet relativement froids et, surtout, composés uniquement de vapeur d'eau. Un gaz qui a tendance à se transformer en liquide, formant ainsi des gouttelettes d'eau susceptibles d'enrayer le fonctionnement du moteur. Pour remédier à ce phénomène, les ingénieurs ont ainsi eu l'idée de lubrifier le



moteur à l'aide d'une huile hydrophobe renforcée d'additifs empêchant la formation d'une émulsion au contact de l'eau.

Allumage, mélange air/hydrogène, suralimentation, et gestion de la vapeur d'eau... En parvenant à maîtriser l'ensemble de ces points clés, l'équipe a ainsi donné naissance à un moteur à hydrogène de 55 kW aux performances en tous points comparables à celle de son équivalent diesel. « *Les propriétés de combustion uniques de l'hydrogène permettent au moteur de fournir la même puissance, le même couple et le même rendement que ceux dont bénéficient les machines JCB actuelles, mais sans émission de CO<sub>2</sub>* » s'est ainsi félicité dans un communiqué le président du groupe, Lord Bamford.

### En route vers la production à grande échelle

Alors que le constructeur britannique annonçait début décembre la sortie de chaîne de production du cinquantième exemplaire de ce moteur zéro émission – toujours pour des besoins de développement –, JCB en a déjà équipé plusieurs de ses machines : chargeuses-pelleteuses et chargeurs télescopiques. Des machines qui, si elles ne sont pas encore produites en série, sont en tout cas parfaitement fonctionnelles. La production à grande échelle devrait quant à elle démarrer fin 2023 et ouvrira ainsi la voie à un élargissement de la gamme d'engins animés par le moteur hydrogène à combustion interne imaginé par JCB dans le cadre de sa stratégie « **Road to zero** ». « *Ces équipements disposeront des mêmes caractéristiques de vitesse, de chargement et d'excavation que ceux alimentés par du carburant d'origine fossile* », souligne Tim Burnhope, directeur de l'innovation.

Des engins qui devraient en outre bénéficier peu ou prou de la même autonomie, grâce à un réservoir d'hydrogène installé en lieu et place du réservoir de gazole, et dont le coût ne devrait se révéler qu'à peine plus élevé que celui de leurs homologues diesel.

Si des concurrents tels que le constructeur français Manitou ont eux aussi révélé s'atteler au développement de

moteurs à combustion interne alimenté à l'hydrogène, JCB semble en tout cas pouvoir se targuer d'être le premier à avoir pleinement relevé le défi. Un pari à 100 millions de livres sterling lancé – l'histoire le retiendra sans doute – en pleine crise sanitaire mondiale.

*[1] Troisième constructeur mondial en volume, numéro un sur le segment des chargeurs télescopiques et des chargeuses-pelleteuses.*

05/01/2023

# UN NOUVEAU MATÉRIAU POUR LA PRODUCTION D'HYDROGÈNE VERT À GRANDE ÉCHELLE

*La transition énergétique dans laquelle sont engagés l'ensemble des pays de la planète doit nous conduire, à l'horizon 2050, à une économie décarbonée. Pour cela, il faut développer des moyens de production et de stockage d'énergie décarbonés. Des chercheurs cherchent, partout dans le monde, à développer des technologies innovantes pour produire de l'énergie la plus décarbonée possible.*

Parmi les solutions existantes, l'[hydrogène](#), qui n'existe pas tel quel sur Terre, fait l'objet de nombreuses recherches. Pour en produire, on utilise aujourd'hui très massivement le [vaporeformage](#), qui consomme du méthane, pour produire de l'hydrogène et du dioxyde de carbone : un procédé économiquement intéressant mais écologiquement inefficace pour réduire la concentration atmosphérique de gaz à effet de serre.

Une équipe du [CNRS](#), dirigée par Charles Cornet, professeur des Universités à l'Institut fonctions optiques pour les technologies de l'information ([Institut FOTON](#), CNRS/INSA Rennes/Université Rennes 1), développe une photo-électrode pour produire, à partir d'énergie solaire, de l'hydrogène par [électrolyse](#). Ces travaux sont menés en étroite collaboration avec des chercheurs de l'[Institut des Sciences Chimiques de Rennes](#) (ISCR-CNRS). A l'heure où l'Etat et les acteurs privés investissent beaucoup pour développer des méthodes de production massive d'hydrogène décarboné, il s'agit pour Charles Cornet et son équipe de montrer que leur procédé peut produire de l'hydrogène, de manière décarbonée, et à un prix compétitif pour être économiquement viable.

Charles Cornet a répondu aux questions des Techniques de l'Ingénieur.

**Techniques de l'Ingénieur : Quelles sont les solutions permettant aujourd'hui de produire de l'hydrogène ?**

**Charles Cornet :** L'hydrogène n'est pas disponible sur Terre, il faut le produire. Deux voies principales existent pour cela. D'abord l'électrolyse de l'eau, que tous les collégiens connaissent. Le principe consiste à plonger deux électrodes dans un bac d'eau : on fait passer dans ce bac un courant électrique qui va venir casser les molécules d'eau et séparer l'hydrogène et l'oxygène. La problématique aujourd'hui par rapport à l'électrolyse est l'origine de l'énergie nécessaire à la réaction chimique : selon que cette énergie est carbonée ou décarbonée, le processus de production de l'hydrogène est plus ou moins pertinent, écologiquement parlant.

L'autre technologie est le vaporeformage. On va utiliser du méthane et le combiner à de la vapeur d'eau très chaude, pour former de l'hydrogène. Cette réaction produit également du CO<sub>2</sub>. On part donc avec du méthane, et on produit de l'hydrogène et du CO<sub>2</sub>, puissant gaz à effet de serre. D'un point de vue environnemental, le vaporeformage n'a donc pas d'intérêt. Ceci dit, il s'agit aujourd'hui du procédé le plus économique, et 95% de l'hydrogène produit aujourd'hui à travers le monde l'est par reformage.

**Quelles sont les solutions existantes pour produire de l'hydrogène décarboné ?**

L'enjeu aujourd'hui autour de l'hydrogène est de coupler sa production avec l'utilisation d'énergies renouvelables, en développant des technologies viables économiquement, pour qu'elles puissent être mises en place à grande échelle.

L'utilisation d'énergies renouvelables pour produire de l'hydrogène pousse à se concentrer sur l'électrolyse, pas sur

le reformage. L'idéal serait de pouvoir produire de l'hydrogène et de l'oxygène sans avoir à passer par les énergies fossiles. Cela peut se faire par exemple en connectant des panneaux solaires à un électrolyseur. Plusieurs démonstrateurs de ce type existent déjà. On peut aussi connecter l'électrolyseur à une éolienne, cela a été testé également et fonctionne très bien. Le problème avec ces couplages est la complexité des installations, et leur coût important.

### **Comment avez-vous orienté vos recherches pour produire « écologiquement » de l'hydrogène ?**

Nous avons choisi une approche qui permet d'utiliser l'énergie solaire, sans passer par un ensemble "panneau solaire / électrolyseur". Notamment parce que les électrodes sont souvent produites à base de matériaux extrêmement chers, comme le platine.

Nous développons actuellement des photo-électrodes, sortes de panneaux solaires, qui trempent directement dans l'eau. Les rayons du soleil vont être absorbés pour produire des charges électriques, qui vont être directement rejetées dans l'eau pour « casser » les molécules d'eau et produire de l'hydrogène et de l'oxygène.

Ce mécanisme a plusieurs avantages. Déjà, le panneau solaire produit directement l'hydrogène dans l'eau, ce qui simplifie beaucoup le processus. Nous avons combiné une fine couche d'un matériau, appelé semi-conducteur III-V, qui absorbe très bien la lumière, avec une couche épaisse de silicium. Or, le silicium est un élément chimique extrêmement abondant sur Terre et peu cher. Nous avons donc réussi à montrer que l'utilisation de photo-électrodes à base de silicium permettait d'obtenir d'excellents résultats. C'est un élément déterminant pour évaluer le potentiel de notre procédé à être utilisé à grande échelle.

### **A quel stade de recherche vous trouvez-vous actuellement ?**

Pour le moment, nous observons des photo-électrodes individuelles : soit des photos-anodes, soit des photocathodes. Les performances sont très intéressantes, si on les met en rapport avec le faible coût des matériaux utilisés.

Il nous faut passer désormais au démonstrateur. Nous avons à ce propos été lauréats récemment d'un appel à projet (projet NAUTILUS), lié aux investissements [France 2030](#) sur le volet des Programmes et Équipements Prioritaires de Recherche (PEPR) dédiés à l'hydrogène décarboné. Nous allons donc pouvoir commencer à développer, à partir du mois de janvier 2023, un démonstrateur dans lequel nous allons associer les photos-anodes et les photocathodes. Ce démonstrateur sera donc constitué d'une cellule entière, que l'on pourra exposer au soleil et qui produira de l'hydrogène. L'étude du rendement de ce démonstrateur permettra de déterminer si notre approche a le potentiel suffisant pour que le procédé soit industrialisé.

### **Les investissements publics et privés pour développer une production « verte » d'hydrogène permettent de mener de nombreux projets de recherche. Où vous situez-vous par rapport à cette effervescence ?**

En effet nous sommes très loin d'être les seuls à développer des solutions pour la production d'hydrogène décarboné. Beaucoup d'équipes de recherches travaillent sur tout un tas de solutions et de technologies, et beaucoup d'argent est investi pour créer une filière hydrogène compétitive et décarbonée, en France, en Europe, et même au niveau mondial. Il est très difficile de prévoir aujourd'hui quel procédé sera le plus compétitif sur le moyen terme. Chaque technologie a ses contraintes. Par exemple, nos cellules ont besoin de soleil pour fonctionner, ce qui rend potentiellement leur utilisation contrainte sur le plan géographique. Chaque technologie a ses avantages et ses inconvénients.

### **Qu'est-ce qui va faire pencher la balance pour telle ou telle technologie ?**

Il faut à la fois de la performance, un prix bas, et une durée de vie du produit la plus longue possible. Nos cellules solaires photo-électro-chimiques baignent dans l'eau et cela ajoute des risques, en termes de corrosion par exemple. Ces risques doivent être déterminés et pris en compte, ce que nous faisons dans nos recherches. En ce qui concerne la durée de vie de nos cellules, nous pouvons ajouter une fine couche protectrice pour préserver les cel-

lules de la corrosion. Cela entraîne forcément une baisse de rendement, il faut donc optimiser l'ensemble pour obtenir un matériel performant et résistant dans le temps. C'est ce sur quoi nous travaillons actuellement. Un fois que cela sera fait, le rendement déterminera le prix de revient de l'hydrogène produit, et donc l'intérêt industriel de nos photos-électrodes.

**Peut-on imaginer d'autres applications pour ce matériau, en plus du procédé que vous développez ?**

Je travaille actuellement sur un projet (projet ANR PIANIST) destiné à mieux comprendre l'ensemble des propriétés de ces matériaux qui se révèlent assez originales, notamment en ce qui concerne leur manière de conduire le courant ou de récupérer l'énergie solaire. Ces propriétés laissent imaginer que ces matériaux pourraient être performants et permettre le développement de nouvelles cellules photovoltaïques, mais aussi de nouveaux transistors... ces matériaux pourraient même intervenir dans le développement des technologies quantiques.

**Propos recueillis par Pierre Thouverez**

14/12/2022

# QUELS MATÉRIAUX POUR UN STOCKAGE DE L'HYDROGÈNE PLUS PERFORMANT ET ACCESSIBLE ?

*La molécule hydrogène est au centre des attentions, en France comme en Europe. Pressenti pour être un vecteur énergétique fondamental de la transition énergétique, son stockage fait l'objet de nombreuses recherches, au sein desquelles de nouveaux matériaux pourraient jouer un rôle fondamental.*

Une des caractéristiques de l'hydrogène est sa légèreté. Cet aspect de sa chimie en fait un **élément chimique compliqué à stocker**, et un défi technologique pour les chercheurs. A l'heure actuelle, le stockage à haute pression et à basse température est celui qui fait l'objet de nombreuses applications. Depuis l'annonce du **plan France 2030**, l'**hydrogène** a été désigné comme vecteur énergétique de la transition à venir. Il est vrai que stocker l'hydrogène peut présenter de nombreux avantages, notamment celui de pouvoir intégrer des énergies renouvelables plus facilement dans le mix énergétique ainsi obtenu. Depuis, c'est toute l'Europe qui s'est lancée dans une course à l'innovation pour faire du continent un leader sur le marché de l'hydrogène. Cependant, pour être en mesure d'établir l'hydrogène en tant que fondement de la transition énergétique, les industriels et les chercheurs vont devoir mettre au point des solutions techniques pour stocker la fameuse molécule dans des conditions physico-chimiques compatibles avec les constantes naturelles, en termes de pression et de température. **Ce qui n'est pas gagné.**

## **Stockage liquide, gazeux ou solide ?**

L'hydrogène est **onze fois plus léger que l'air que nous respirons**. En conséquence, ce gaz occupe beaucoup plus de place, si on le stocke à pression ambiante. Aujourd'hui, l'hydrogène peut être industriellement stocké à 700 bars de pression, ou 350 bars pour la mobilité.

De nouveaux matériaux sont testés et développés pour améliorer les **performances du stockage hydrogène** : ainsi, les recherches menées concernent notamment la forme même de l'hydrogène stocké. Car la molécule H peut être stockée sous toutes les formes.

Le stockage liquide de l'hydrogène s'effectue à **très basse température**, car cela permet de diminuer sa masse volumique et de lui faire prendre moins de place. Mais ce type de stockage est pour le moment limité à des usages très spécifiques, comme le remplissage des moteurs de fusée par exemple. La contrainte principale du stockage liquide est le besoin d'une haute pression : L'hydrogène liquide a tendance à se gazéifier quand la température augmente, ce qui oblige à faire fuiter une partie du gaz du réservoir. Ce qui, bien sûr, impacte très négativement le rendement de ce type de technologies. Les **innovations vont donc consister à développer des matériaux isolants** (composés non tissés de verre, films en aluminium) pour maintenir l'hydrogène à l'état liquide, et permettre d'utiliser ce type de stockage pour la mobilité.

L'hydrogène peut également être **stocké sous forme gazeuse**, à haute pression. Cela permet de stocker le H<sub>2</sub> dans des réservoirs, dans des bouteilles, pour le transport notamment. L'hydrogène gazeux peut également être utilisé pour alimenter une pile à combustible et générer de l'électricité, et faire fonctionner un véhicule à hydrogène. Enfin, la molécule d'H<sub>2</sub> à l'état gazeux peut aussi être stockée massivement en sous-sol. En termes de matériaux, il s'agit là de mettre au point des structures supportant la pression de l'hydrogène dans le temps.

Enfin, et c'est la méthode qui cristallise l'innovation actuellement, il est possible de stocker l'hydrogène **sous forme**

**solide**. Par exemple sous forme de poudre, en piégeant l'hydrogène dans de la poudre de nitrure de bore. Dès lors, l'hydrogène est stable, et peut être stocké et transporté facilement, en grandes quantités si besoin. La recherche appliquée, en France et en Europe, s'échine donc à mettre au point des démonstrateurs, pour valider l'intérêt du **stockage de l'hydrogène** sous forme solide et son utilisation à grande échelle.

13/12/2022

# LE VÉRITABLE COÛT DE L'HYDROGÈNE VERT

*La conférence de Paris tenue en 2015 a abouti à des accords visant à réduire les relâchements de gaz à effet de serre dans le monde entier. L'un des principaux axes stratégiques permettant d'atteindre les objectifs consiste à remplacer progressivement les carburants fossiles par de l'hydrogène vert. Une évolution qui a déjà commencé...*

*Un extrait de [Applications mobiles et stationnaires de l'hydrogène dans la transition énergétique](#) par André RAHIER*

Le coût du dihydrogène obtenu par [vaporeformage](#) du méthane varie entre 1,5 et 2,5 €/kg. Il passe au moins à 3,5 €/kg lorsqu'on utilise de l'électricité nucléaire pour électrolyser de l'eau. Il s'accroît encore à plus de 5 €/kg si l'électricité est d'origine éolienne ou photovoltaïque. Les contraintes environnementales et, principalement, les objectifs de réduction des relâchements de gaz à effet de serre (CO<sub>2</sub>) obligent toutefois à viser la production d'[hydrogène vert](#) par électrolyse de l'eau en utilisant des énergies renouvelables. Cette transition devra inévitablement passer par une diminution du prix du kg d'hydrogène vert, quoiqu'en parallèle, le coût réel des énergies actuellement exploitées ne cesse d'augmenter lorsqu'on prend en compte l'impact sur l'environnement.

## **Hydrogène : vers une production à grande échelle ?**

Selon l'Association française pour l'hydrogène et les [piles à combustible](#), la production mondiale de dihydrogène était de 60 Mt/an en 2014 et serait passée à 74 Mt/an en 2018. Ces chiffres restent des estimations qui varient d'ailleurs très légèrement selon les sources d'information. On peut affirmer avec certitude qu'en 2020, le dihydrogène était soit produit à la demande en vue de réaliser la synthèse d'autres agents chimiques (ammoniac, méthanol, hydrocarbures légers), soit obtenu en tant que sous-produit de la synthèse de la soude et du chlore ou de la gazéification

du charbon. La production d'hydrogène par électrolyse de l'eau reste actuellement très marginale et ne représente que 4 % de la production totale.

Pour couvrir la consommation actuelle à l'aide d'hydrogène, la production annuelle mondiale de ce nouveau vecteur énergétique devrait être portée à 880 Mt/an, soit environ 15 fois plus que la capacité de production mondiale totale actuelle, et 367 fois plus que la capacité mondiale actuelle de production par électrolyse de l'eau. Quant à la puissance électrique nécessaire, en supposant que le rendement de l'électrolyse est d'au moins 70 %, on serait amené à consommer 4,8 TW, soit approximativement 13 fois la puissance électrique nucléaire installée dans le monde en 2015. Ces chiffres sont même très optimistes, car ils ne tiennent pas compte de l'évolution démographique et de la demande énergétique qui aura lieu pendant la période nécessaire pour réaliser la transition. À titre informatif, en 2019, la puissance électrique photovoltaïque exploitée dans le monde était estimée à 0,06 TW...

Exclusif ! L'article complet dans les ressources documentaires en accès libre jusqu'au 11 mai 2023 !

[Applications mobiles et stationnaires de l'hydrogène dans la transition énergétique](#), par André RAHIER

27/04/2023

# LES THÈSES DU MOIS : LE PARI DE L'HYDROGÈNE VERT

Pour vous accompagner et vous fournir une information toujours plus riche, Techniques de l'Ingénieur s'associe au Réseau National des Ecoles Doctorales - Sciences Pour l'Ingénieur (REDOC SPI). Chaque mois, notre partenaire sélectionne des thèses en lien avec notre dossier mensuel afin de vous permettre de creuser plus loin les thématiques développées dans le dossier.

Pour notre dossier d'avril, "Le pari de l'hydrogène vert", voici les thèses sélectionnées par le REDOC SPI. Retrouvez le résumé de ces thèses ainsi que les thèses des mois précédents sur [le site de notre partenaire](#).

**Le rôle de l'hydrogène dans la transition énergétique-**  
*Sai Bravo Melgarejo* Thèse de doctorat en Sciences économiques, soutenue le 17-12-2021. *Transitions Énergétiques et Environnementales*

**Tidal stream energy integration with green hydrogen production : energy management and system optimisation**  
*Ansu Alex* Thèse de doctorat en Mécanique des fluides, énergétique, thermique, combustion, acoustique soutenue le 24-06-2022. *Laboratoire universitaire des sciences appliquées de Cherbourg*

**Multiphysics modelling for online diagnosis and efficiency tracking : application to green H2 production**  
*Somit Sood* Thèse de doctorat en Automatique, productique, Soutenue le 07-12-2021. *Centre de recherche en informatique, signal et automatique de Lille*

**Recycling of high temperature solid oxide electrolyzers**

**or fuel cells and recovery of waste materials**  
*Gudaysew Tsegaye Yenesew* Thèse de doctorat en Chimie des matériaux, Soutenue le 16-12-2022. *Institut des Matériaux Jean Rouxel*

**Sustainable Hydrogen Production on PGM-free Electrocatalytic Materials in Anion Exchange Membrane Water Electrolyzer (AEMWE)**  
*Carlos Victor Mendonca Inocencio* Thèse de doctorat en Chimie théorique, physique, analytique, Soutenue le 08-12-2022. *Institut de Chimie des Milieux et Matériaux de Poitiers*

**Étude expérimentale d'une cellule d'électrolyseur à membrane échangeuse de protons (PEMWE) : contribution à l'optimisation d'une Pile A Combustible Réversible (PAC-R), pour le stockage d'énergie solaire**  
*Sébastien Boulevard* Thèse de doctorat en Énergétique, Soutenue le 28-05-2021. *SLaboratoire d'énergétique, d'électronique et procédés*

**Élaboration, caractérisation et évaluation photocatalytique de matériaux de type TiO<sub>2</sub> dopé – graphène**  
*Hamza El Marouazi* Thèse de doctorat en Chimie physique, Soutenue le 13-12-2021 *Institut de chimie et procédés pour l'énergie, l'environnement et la santé*

**Stockage solide réversible de l'hydrogène : Étude et modélisation du comportement de la particule isolée de composés intermétalliques lors de l'absorption**  
*Ludovic Bebon* Thèse de doctorat en Mécanique, soutenue le 02-07-2021 *FEMTO-ST : Franche-Comté Electronique Mécanique, Thermique et Optique - Sciences et Techno-*



*logies*

**Nanomatériaux pyroélectriques pour la production d'hydrogène vert** *Salma Touili* Projet de thèse en Physique Physique de la Matière Condensée, depuis le 01-09-2022 *Laboratoire de physique de la matière condensée*

**Optimisation de la production d'hydrogène vert sous incertitudes** Projet de thèse en Informatique mathématique, depuis le 01-03-2023

27/04/2023

## Gagnez du temps et sécurisez vos projets en utilisant une source actualisée et fiable !

### 15 DOMAINES D'EXPERTISE

- ✓ Automatique - Robotique
- ✓ Biomédical - Pharma
- ✓ Construction et travaux publics
- ✓ Électronique - Photonique
- ✓ Énergies
- ✓ Environnement - Sécurité
- ✓ Génie industriel
- ✓ Ingénierie des transports
- ✓ Innovation
- ✓ Matériaux
- ✓ Mécanique
- ✓ Mesures - Analyses
- ✓ Procédés chimie - bio - agro
- ✓ Sciences fondamentales
- ✓ Technologies de l'information



Articles de référence  
disponibles en français  
et en anglais.

Détails des offres et sommaires  
à retrouver sur le site

[www.techniques-ingenieur.fr](http://www.techniques-ingenieur.fr)

Les offres Techniques de l'Ingénieur permettent d'accéder à une **base complète et actualisée d'articles** rédigés par les meilleurs experts et validés par des comités scientifiques, avec :

+ de 10 000 articles de référence et 1 000 fiches pratiques opérationnelles.

3 000 quiz dans + de 1 000 articles interactifs.

+ de 550 bases documentaires, + de 30 Parcours Pratiques répartis dans plus de 90 offres.

1 280 auteurs contribuent chaque année à enrichir cette ressource.

Service de Questions aux experts.

Les Archives, technologies anciennes et versions antérieures des articles.

+ de 300 000 utilisateurs de [techniques-ingenieur.fr](http://techniques-ingenieur.fr) chaque mois !

NOS ÉQUIPES SONT  
À VOTRE DISPOSITION

Par téléphone  
 33 (0)1 53 35 20 20

Par email  
 [infos.clients@teching.com](mailto:infos.clients@teching.com)