



TECHNIQUES
DE L'INGÉNIEUR

LES FOCUS
TECHNIQUES DE L'INGÉNIEUR



DES MATÉRIAUX INNOVANTS POUR LA FILIÈRE HYDROGÈNE

décembre / 2022

SOMMAIRE

SOMMAIRE	2
INTRODUCTION	3
PRODUCTION ET STOCKAGE D'HYDROGÈNE : LE RÔLE ACTIF DES MATÉRIAUX	4
▪ LA PRODUCTION INDUSTRIELLE D'HYDROGÈNE VERT A BESOIN DE NOUVEAUX MATÉRIAUX	4
▪ UN NOUVEAU MATÉRIAU POUR LA PRODUCTION D'HYDROGÈNE VERT À GRANDE ÉCHELLE	6
▪ QUELS MATÉRIAUX POUR UN STOCKAGE DE L'HYDROGÈNE PLUS PERFORMANT ET ACCESSIBLE ?	9
▪ « IL FAUT ADAPTER LES MATÉRIAUX POUR DES USAGES À TEMPÉRATURE AMBIANTE » POUR STOCKER L'HYDROGÈNE	11
POUR ALLER PLUS LOIN	14
▪ UNE MEMBRANE RÉVOLUTIONNAIRE POUR PURIFIER L'HYDROGÈNE ?	14
▪ STOCKER L'HYDROGÈNE PAR VOIE CHIMIQUE GRÂCE AU PROCÉDÉ LOHC	16
▪ AIDER LES INDUSTRIELS DE LA MÉCANIQUE EN FRANCE AU PASSAGE À L'HYDROGÈNE	18
▪ UNE SECONDE CAVITÉ SALINE EXPÉRIMENTÉE POUR STOCKER DE L'HYDROGÈNE EN FRANCE	20
▪ UNE FLAMME PROPRE À BASE D'HYDROGÈNE AFIN DE DÉCARBONER LA COMBUSTION	22
▪ UNE PYROLYSE PAR PLASMAS FROIDS NANOSECONDES PULSÉS POUR CONVERTIR LE MÉTHANE EN HYDROGÈNE	24
▪ LES ATOUTS DU STOCKAGE « SOLIDE » DE L'HYDROGÈNE	26
▪ LES THÈSES DU MOIS : MATÉRIAUX INNOVANTS POUR PRODUIRE ET STOCKER L'HYDROGÈNE	27

INTRODUCTION

La France et l'Europe ont misé gros sur l'hydrogène. A travers le plan France 2030, l'hexagone veut devenir un leader sur la filière de production et de stockage de cet élément chimique. Au niveau continental, l'Europe a débloqué des investissements massifs pour, notamment, développer quatre gigafactories d'électrolyseurs, des sites de production de réservoirs à hydrogène, des piles à combustibles pour la mobilité durable, des trains et véhicules utilitaires à hydrogène, ou encore les matériaux nécessaires à la production de ces équipements.

Tout est donc mis en place pour faire de l'hydrogène le pivot de la transition énergétique en Europe. En effet, de par sa capacité à être stocké sous plusieurs formes, l'hydrogène est un parfait vecteur énergétique.

C'est sur l'électrolyse que se concentrent de nombreuses recherches pour améliorer les performances de l'hydrogène, et coupler la réaction avec une électricité d'origine renouvelable. Sur ce point, des matériaux sont développés pour développer une électrolyse « verte », et produire de l'hydrogène décarboné. Coupler un électrolyseur avec un panneau solaire ou une éolienne, voire une centrale nucléaire, est possible. Possible mais extrêmement complexe. C'est pour cela que les chercheurs tentent de trouver des alternatives. Ainsi, des matériaux innovants sont développés pour simplifier le couplage entre une production renouvelable et un électrolyseur, pour produire de l'hydrogène. Evidemment, il faut que ces matériaux soient le moins coûteux possible à produire, pour que la solution développée soit industrialisable.

Côté stockage, les matériaux innovants vont jouer un rôle important dans le développement de solutions technologiques de stockage performantes et adaptées aux enjeux. Sachant que l'hydrogène peut être stocké sous plusieurs formes, les solutions possibles sont nombreuses, mais la recherche a plutôt tendance à travailler sur des matériaux aux propriétés déjà connues, pour adapter leurs performances à des conditions de température et de pression proches de celles de notre environnement.

PRODUCTION ET STOCKAGE D'HYDROGÈNE : LE RÔLE ACTIF DES MATÉRIAUX

LA PRODUCTION INDUSTRIELLE D'HYDROGÈNE VERT A BESOIN DE NOUVEAUX MATÉRIAUX

Au sein de la transition écologique dans laquelle s'est engagée la France et au-delà l'Europe, l'hydrogène occupe une place centrale. De nombreuses technologies innovantes sont aujourd'hui à l'étude, notamment via l'usage de nouveaux matériaux.

Le plan [France 2030](#) a consacré la stratégie française et européenne visant à faire des technologies hydrogène un pivot de la transition énergétique, tant sur le volet de la production que du stockage.

En effet, les [usages](#) de l'[hydrogène](#) sont nombreux : production de chaleur, carburant, vecteur énergétique pour produire de l'électricité... mais pour le secteur de la chimie : raffinage d'hydrocarbures, production d'engrais, production de gaz de synthèse. Si l'on s'en fie aux objectifs français, d'ici 2030, la France doit devenir leader sur le volet de la production et le [stockage](#) d'hydrogène vert, notamment via la construction d'au moins deux gigafactories d'[électrolyseurs](#), qui permettront à l'hexagone de produire massivement la molécule hydrogène, de façon décarbonée.

[Au niveau européen, le PIIEC](#) (projet important d'intérêt européen commun) consacré à l'hydrogène a permis à 41 projets, portés par 15 Etats, d'être retenus pour être subventionnés et développés. Parmi eux, 10 projets sont français, et profiteront d'une partie des quelque 5 milliards d'euros débloqués par l'UE sur ce thème.

Les projets couronnés vont permettre, dans les années qui viennent, de voir émerger sur le territoire national une véritable industrie de [production d'hydrogène décarboné](#), à travers la construction de :

- quatre gigafactories d'électrolyseurs ;
- sites de production de réservoirs à hydrogène ;
- piles à combustibles pour la mobilité durable ;

- trains et véhicules utilitaires à hydrogène ;
- matériaux nécessaires à la production de ces équipements.

Côté production, aujourd'hui il existe deux solutions pour obtenir de l'hydrogène : le vaporeformage et l'électrolyse. Le vaporeformage du méthane permet d'obtenir de l'hydrogène. Il s'agit aujourd'hui de la méthode la plus utilisée au niveau mondial, car c'est la plus économique. Au niveau chimique, le [vaporeformage](#) dégage 12 tonnes de CO2 par tonne d'hydrogène produite. Écologiquement parlant, cette technique est donc polluante. Des projets de séparation des gaz, afin de pouvoir séquestrer le CO2 et améliorer le bilan environnemental de cette méthode de production ont été et sont toujours développés, mais [les coûts associés à ces démarches sont très élevés](#), laissant planer le doute sur la possibilité de les développer à grande échelle.

La seconde méthode pour produire de l'hydrogène est l'électrolyse de l'eau, qui consiste à séparer l'oxygène et le dihydrogène grâce à un courant électrique. Cette méthode est aujourd'hui encore peu employée, et l'électricité nécessaire à l'électrolyse doit être d'origine renouvelable pour présenter un bilan écologique compatible avec les ambitions tricolores en matière énergétique. L'électrolyse présente pour les industriels un potentiel important, et les méthodes pour la coupler avec [une solution technique à base d'électricité renouvelable](#) se multiplient. En effet, la production d'hydrogène par électrolyse peut être alimentée par des énergies éoliennes, solaires, voire nucléaires. Ces technologies permettent d'obtenir de l'hydrogène décarboné.

L'innovation technologique nécessaire pour développer une électrolyse « verte » de l'eau passe nécessairement par l'utilisation d'une électricité renouvelable. Mais le déve-

veloppement de nouveaux matériaux doit aussi permettre d'améliorer le rendement de ces technologies, et leur potentiel d'industrialisation.

Ainsi, aujourd'hui, des matériaux innovants sont testés, pour améliorer le rendement des électrolyseurs, et pour faciliter le couplage de l'électrolyse à une source renouvelable.

Des chercheurs de l'Institut de Physique de Rennes développent par exemple un matériau semiconducteur/métallique, qui permet à ces cellules solaires de **produire directement de l'hydrogène par électrolyse**, à faible coût.

Côté électrolyse, il s'agit de mettre au point des matériaux capables d'améliorer le rendement de la réaction, à un coût modéré. **Des chercheurs de l'Université de Varsovie** ont développé une solution à base de disulfure d'ammonium, qui permet de mettre au point des électrolyseurs sans utiliser de platine, un matériau rare et extrêmement cher.

Si le développement et la recherche permettent de mettre au point de nouveaux matériaux performants améliorant la chaîne de production d'hydrogène décarboné, il est nécessaire que ces derniers s'inscrivent dans un processus d'industrialisation, en étant abondants et peu chers à produire. Pour espérer constituer le futur socle de la filière hydrogène tricolore.

12/12/2022

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 CO₂. On part donc avec du méthane, et on produit de l'hydrogène et du CO₂, 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 H₂ 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'H₂ 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

« IL FAUT ADAPTER LES MATÉRIAUX POUR DES USAGES À TEMPÉRATURE AMBIANTE » POUR STOCKER L'HYDROGÈNE

Le stockage de l'hydrogène est réalisable de différentes manières, notamment car l'hydrogène peut être stocké sous plusieurs états.

Fermin Cuevas est chercheur à l'[Institut de Chimie et des Matériaux Paris Est \(ICMPE\)](#), responsable de la thématique Interaction hydrogène matière au sein du département Métallurgie et Matériaux inorganiques.

Ses recherches portent sur la synthèse, les propriétés structurales et physico-chimiques des composés intermétalliques et des hydrures : elles visent le développement de nouveaux matériaux pour des applications concernant le stockage de l'énergie, en particulier le stockage d'hydrogène, les batteries Ni-MH et les batteries Li-ion.

Le plan d'investissement France 2030 ambitionne, notamment à travers le [PEPR hydrogène](#), de faire de la France un leader sur le marché de l'hydrogène dans les années à venir. Au niveau continental également, l'Europe investit et a sélectionné de nombreux projets, dans 15 pays de l'UE, pour soutenir le développement des technologies hydrogène. Tout est mis en place pour faire de la molécule hydrogène le vecteur énergétique à côté de l'électricité, pour la transition à venir.

Les recherches actuelles sur l'[hydrogène](#) visent à améliorer les performances de la chaîne hydrogène-énergie, tant sur les volets production et usage que sur le volet stockage. Sur ce dernier point, le développement de nouveaux matériaux pourraient permettre d'utiliser massivement l'hydrogène en tant que moyen de stockage de l'énergie. Pour que les technologies développées puissent connaître

un usage massif, il est important que les matériaux développés puissent être produits à un coût économiquement viable. Une contrainte nécessaire que les chercheurs intègrent à leurs travaux.

Fermin Cuevas a répondu aux questions de Techniques de l'Ingénieur, concernant le potentiel de nouveaux matériaux pour le stockage de l'hydrogène, et plus généralement sur le développement de la filière dans l'hexagone et en Europe.

Techniques de l'Ingénieur : Quelles sont les différentes méthodes pour stocker de l'hydrogène ?

Fermin Cuevas : Il y a aujourd'hui trois méthodes principales pour stocker l'hydrogène. On peut le stocker à l'état gazeux, à très haute pression. On peut aussi stocker l'hydrogène à l'état liquide à très basse température. C'est ce que l'on fait pour les fusées par exemple.

La troisième possibilité, que je connais bien puisque c'est sur celle-ci que je travaille, est de stocker l'hydrogène sous forme solide.

Du point de vue applicatif, nous nous concentrons sur du stockage stationnaire, pour une question de poids.

Quels sont les matériaux sur lesquels vous travaillez ?

Nous pouvons diviser les matériaux sur lesquels nous travaillons en deux grandes catégories. Il y a toute une famille de matériaux que nous connaissons déjà, et qui sont employés pour stocker de l'hydrogène. Leurs propriétés sont connues. Parmi eux, il y a par exemple les [composés intermétalliques](#), qui sont constitués d'une association de

plusieurs métaux, titane et fer par exemple. Nous savons les synthétiser, modéliser leurs propriétés chimiques, et nous connaissons leur potentiel en ce qui concerne le stockage de l'hydrogène. De plus ces **matériaux** sont réversibles à pression atmosphérique et à température ambiante, ce qui est un avantage pour imaginer des systèmes de stockage et de déstockage de l'énergie performants.

Parmi les matériaux que l'on connaît déjà, nous pouvons également citer les composés intermétalliques contenant des terres rares et des métaux de transition, des composés à base de magnésium ou encore des alliages de vanadium.

Ces matériaux permettent de stocker l'hydrogène réversiblement, l'objet des recherches actuelles est d'améliorer leurs performances en les optimisant pour des applications bien précises.

Quelle est la seconde catégorie de matériaux sur lesquels vous travaillez ?

La seconde catégorie va regrouper les matériaux prospectifs, dont le potentiel n'est pas encore bien établi. C'est l'autre aspect de nos travaux. Il s'agit plus de recherche fondamentale, sur des matériaux légers ayant un potentiel certain en termes de stockage de l'hydrogène, mais présentant des caractéristiques contraignantes. Cela peut être une température trop élevée pour libérer l'hydrogène ou la décomposition non réversible du matériau au cours de la réaction.

Le budget alloué par l'Etat pour développer la filière hydrogène est majoritairement orienté aujourd'hui vers la recherche appliquée pour mettre au point des démonstrateurs. Ceci favorise l'amélioration de matériaux dont les propriétés pour le stockage de l'hydrogène sont déjà connues. La recherche fondamentale bénéficie d'investissements plus limités, mais déjà significativement importants pour trouver des matériaux totalement nouveaux.

Quelles vont être les caractéristiques recherchées chez les matériaux que vous testez ?

Aujourd'hui beaucoup de matériaux sont développés pour le stockage stationnaire de l'hydrogène. L'intérêt est que

l'on travaille sur des matériaux qui fonctionnent à température ambiante. C'est à la fois énergétiquement plus efficace et sécuritaire pour envisager des applications proches du public.

Ensuite, il y a toute une gamme de matériaux qui permettent de stocker l'hydrogène avec une grande capacité et donc potentiellement adaptées à la mobilité, mais à l'heure actuelle ces matériaux fonctionnent dans des zones de température ou de pression trop éloignées des constantes qui constituent notre environnement. Les chercheurs qui étudient ces matériaux essaient de les adapter pour des usages aux conditions normales de pression et de température. Cela est nécessaire pour imaginer de nouvelles applications industrielles nécessitant du stockage de l'hydrogène avec ces matériaux.

Quels sont les pays les plus avancés sur les technologies hydrogène ?

Le Japon, du point de vue technologique, et l'Allemagne, qui est très avancée sur l'usage de certaines technologies renouvelables, me paraissent en avance sur la France pour le moment sur le développement d'une filière hydrogène.

L'Australie possède une grande quantité de lithium et des métaux de transition dans son sous-sol. C'est un avantage pour produire des batteries, et est en plus très largement ensoleillé. Selon moi, le pays semble réunir des atouts très importants pour devenir un acteur important de l'hydrogène.

Propos recueillis par Pierre Thouverez

15/12/2022

POUR ALLER PLUS LOIN

UNE MEMBRANE RÉVOLUTIONNAIRE POUR PURIFIER L'HYDROGÈNE ?

La start-up singapourienne DiviGas annonce une levée de fonds de 3,6 millions de dollars pour construire la première usine de fabrication d'une membrane polymère de séparation d'hydrogène de nouvelle génération. Techniques de l'Ingénieur s'est entretenu avec son cofondateur André Lorenceau.

Selon la start-up [DiviGas](#), chaque année, 110 milliards de dollars d'[hydrogène](#) gazeux sont générés dans les raffineries, les usines chimiques et les usines d'engrais. Sur ce total, environ 15 %, représentant 16 milliards de dollars, sont perdus à cause du [torchage](#). La membrane développée par DiviGas, pourrait recycler cet hydrogène gazeux auparavant non récupérable, rapportant à la raffinerie en moyenne 3 à 6 millions de dollars par an avec un retour sur investissement de 2 à 3. Entretien avec son PDG et cofondateur André Lorenceau.

Techniques de l'Ingénieur : Vous lancez une nouvelle membrane, présentée comme révolutionnaire pour purifier l'hydrogène. À quoi sert-elle ?

André Lorenceau : Aujourd'hui, la quasi-totalité de l'hydrogène produit dans le monde – 73 millions de tonnes chaque année – l'est à partir de charbon ou de gaz naturel. Lors de cette production, on obtient environ 75 % d'hydrogène et 25 % de [CO2](#). Cet hydrogène est majoritairement utilisé dans les raffineries pour fabriquer les carburants dérivés du pétrole et pour produire de l'ammoniac, des fertilisants ou des explosifs.

Avant d'utiliser l'hydrogène, il faut le purifier. Cela peut se faire soit par séparation chimique, un procédé assez toxique qui existe depuis 90 ans, soit avec des membranes. Ce second type de procédé est plus récent, mais les membranes ont généralement du mal à tolérer cer-

taines molécules, particulièrement les acides, les hexanes et les sulfites. Ces molécules ont tendance à dégrader la structure polymérique des membranes. Il y a un autre problème : les molécules avec de grandes chaînes carbonées se condensent facilement et bouchent les filtres. Une solution serait de monter la température dans la membrane, mais les molécules ne tolèrent pas les températures au-delà de 50°C-60°C.

Qu'est-ce que votre membrane a de plus que les autres ?

Notre membrane est beaucoup plus résistante aux hautes températures et aux acides. Ce qui fait son efficacité, c'est sa structure, les matériaux utilisés et le procédé de fabrication. Elle résiste ainsi aux acides jusqu'à 150°C, ce qui ouvre des possibilités dans les raffineries, mais aussi dans plusieurs industries nouvelles. C'est notamment le cas du stockage souterrain de l'hydrogène vert dans les nappes phréatiques et les mines de sel ou pour la gazéification de biomasse.

Comment fonctionne votre membrane ?

Notre membrane renferme des fibres polymères radicalement nouvelles. Chaque module est un tube contenant environ 300 km de fibres creuses polymériques. Si l'on veut s'imaginer ces fibres, on peut les comparer à des spaghettis pas cuits.

La membrane repose sur un processus mécanique. Le gaz est poussé à travers ces fibres. La pression mène à une séparation moléculaire de l'hydrogène. L'hydrogène pur sort à une pression légèrement inférieure à la pression initiale, les autres gaz à une pression identique. On obtient ainsi d'un côté l'hydrogène pur et de l'autre les autres gaz.

Où en êtes-vous de votre développement ?

Nous avons levé 3,5 millions de dollars pour fabriquer notre première usine pilote à Melbourne, en Australie. Elle devrait être opérationnelle en mars 2022 et nous pourrions livrer nos premiers produits en juillet 2022. Cette usine permettra de fabriquer 70 modules par an, c'est un début. En effet, les besoins dans cette industrie sont énormes. Certains de nos clients ont besoin de 5 à 30 modules par an, d'autres jusqu'à 5 000 unités.

Dès que notre usine pilote aura permis de montrer l'efficacité de notre membrane sur le terrain, nous ferons une nouvelle levée de fonds de quelques dizaines de millions de dollars pour construire plusieurs usines beaucoup plus grosses un peu partout dans le monde.

Votre prochain développement est une membrane à purifier le CO₂, pour quel marché ?

D'ici 2023, nous espérons développer une membrane à purifier le CO₂. Elle servirait à capter les émissions dans les centrales électriques au charbon et au gaz, dans les cimenteries et les aciéries.

Lorsqu'on utilise une membrane, l'avantage est que le CO₂ garde sa pression, alors qu'il la perd avec la séparation chimique. Si l'on veut capturer et stocker le CO₂, il faut donc forcément passer par une membrane, car re-pressuriser le CO₂ est prohibitif économiquement.

Un système de captage et de stockage de CO₂ comprend 4 étapes : la séparation, la compression, le transport et le stockage. Les étapes de séparation et compression représentent jusqu'à 75 % du coût du système. Avec une membrane, on pourrait aider à abaisser les coûts globaux des systèmes de captage et de stockage de CO₂ et ainsi participer à développer ce secteur dans le cadre de la lutte contre le réchauffement climatique.

09/12/2021

STOCKER L'HYDROGÈNE PAR VOIE CHIMIQUE GRÂCE AU PROCÉDÉ LOHC

L'hydrogène sous haute pression ou liquide sont les deux principales méthodes de stockage de ce gaz. Une autre technique, nommée LOHC (Liquid organic hydrogen carrier), connaît un regain d'intérêt et consiste à l'héberger au milieu de molécules de liquides organiques porteurs d'hydrogène.

L'hydrogène est un gaz extrêmement léger qui possède une très faible densité volumique à la pression atmosphérique. Deux techniques sont principalement utilisées pour réduire son volume et le stocker efficacement. La première, la plus courante, consiste à le comprimer à 700 bar, et la seconde à le transformer en liquide en le refroidissant à très basse température (-252,87°C). Depuis quelques années, une autre méthode, par voie chimique, connaît un regain d'intérêt et consiste à héberger le gaz au milieu de molécules de liquides organiques porteurs d'hydrogène. D'abord appelé Organic Liquid Hybrides, ce procédé est à présent plus connu sous le nom de LOHC pour Liquid Organic Hydrogen Carrier.

Avec Valérie Meille, sa collègue de IRCELYON (Institut de recherches sur la catalyse de Lyon), Isabelle Pitault, chercheuse au LAGEPP (Laboratoire d'automatique, de génie des procédés et de génie pharmaceutique) travaille sur cette technologie depuis une quinzaine d'années. « *Le stockage de l'hydrogène sous pression ou liquide nécessite de fabriquer des réservoirs spéciaux, très coûteux et qui ne sont pas encore complètement fiables aujourd'hui, analyse la chercheuse. Les molécules d'hydrogène ont la particularité de se diffuser dans tous les matériaux et on n'a pas encore réussi à concevoir des matériaux totalement étanches. À long terme, il peut se produire des pertes si on laisse de l'hydrogène sous pression ou liquide dans un*

réservoir. L'avantage du procédé LOHC est qu'il est possible d'utiliser toutes les infrastructures pétrolières déjà existantes pour le stockage, car les molécules porteuses de l'hydrogène ont les mêmes propriétés que le pétrole. »

Une réaction d'hydrogénation pour stocker l'hydrogène

Le couple de molécules toluène/méthylcyclohexane a longtemps été utilisé pour mettre en œuvre ce procédé. Concrètement, le toluène est la molécule de départ, que l'on associe à de l'hydrogène grâce à une réaction d'hydrogénation, dans des conditions que l'on peut qualifier de douces puisque l'hydrogène est comprimé à 30 bar, à des températures comprises entre 90 et 150 degrés. Cette réaction donne naissance à une molécule de stockage appelée méthylcyclohexane et a la particularité d'être exothermique. L'énergie libérée peut ainsi être valorisée en couplant cette première étape avec par exemple un réseau de chaleur. Pour « déstocker » l'hydrogène emprisonné, une réaction chimique de déshydrogénation est nécessaire. Celle-ci se déroule à pression atmosphérique, mais nécessite une température très élevée de 320 degrés.

« *Il faut beaucoup d'énergie pour libérer l'hydrogène, c'est pour cela que ce procédé ne s'est pas développé, explique Isabelle Pitault. Si vous avez de l'énergie disponible à proximité avec la présence d'une aciérie ou d'un cimentier, cette contrainte peut être levée. Sinon, il est nécessaire de brûler une partie de l'hydrogène, ce qui représente une consommation de 25 % de ce gaz. Mais si l'on compare ce besoin énergétique avec les deux autres méthodes, cette consommation est presque équivalente puisque la compression de l'hydrogène nécessite 20 % de l'énergie interne mobilisée et celle pour fabriquer de l'hydrogène liquide 30 %. Une*

différence se situe au niveau de l'étape durant laquelle ce besoin énergétique est nécessaire. Pour l'hydrogène sous pression ou liquide, ce besoin se situe au moment du stockage tandis que pour le LOHC, c'est au déstockage. »

Pendant de nombreuses années, ce procédé a fait l'objet de critiques, car les molécules utilisées sont dérivées du pétrole. Aujourd'hui, ces critiques n'ont plus lieu puisque plusieurs études démontrent qu'il est possible de synthétiser le toluène à partir de la biomasse, notamment la lignine. Par ailleurs, les molécules utilisées ne sont pas détruites à chaque stockage/déstockage, car elles servent uniquement de réservoirs pour accueillir l'hydrogène. *« On peut prendre l'image d'une batterie ; vous n'allez pas la jeter après la première décharge, s'exclame la chercheuse. Certes, certaines molécules utilisées ont tendance à se dégrader au fur et à mesure des cycles, mais il est possible de les resynthétiser en usine sans avoir besoin de s'approvisionner à nouveau. Le cycle peut donc être vertueux. »*

Des usines en construction en Allemagne et aux Pays-Bas

À partir du début des années 2000, un autre couple de molécules est fréquemment utilisé, notamment par l'entreprise allemande Hydrogenious : le dibenzyltoluène/perhydrodibenzyltoluène. Ces molécules sont fabriquées par de grands groupes chimiques tels que Sasol et Arkema et sont issues du toluène. Elles servent à fabriquer des fluides caloporteurs capables d'assurer des échanges de chaleur, mais peuvent aussi être utilisées pour le procédé LOHC. Le couple toluène/méthylcyclohexane présente l'inconvénient de devoir réaliser une réaction en phase gazeuse lors de l'étape de déshydrogénation, puis la mise en œuvre d'un système de séparation et de purification de l'hydrogène, qui se révèle gourmand en énergie. L'intérêt du couple dibenzyltoluène/perhydrodibenzyltoluène réside dans le fait que l'étape de déshydrogénation n'est pas confrontée à cette problématique puisque la molécule conserve en permanence son état liquide.

Depuis le début des années 2010, le procédé LOHC connaît un nouvel essor en Europe, surtout à travers la

société Hydrogenious. L'entreprise construit en ce moment des usines à Hambourg et aux Pays-Bas dans le port de Rotterdam afin de stocker de l'hydrogène saisonnier issu d'énergies intermittentes (photovoltaïque, éolien). En Asie, la société japonaise Chiyoda se sert de ce système depuis plusieurs années pour transporter de l'hydrogène entre le Japon et Brunei. En Chine, la société Hynertech dépose de multiples brevets et a pour ambition d'alimenter des voitures équipées de piles à combustible. *« Le point négatif de leur projet est que l'étape d'hydrogénation est réalisée dans une usine et celle de déshydrogénation dans des stations-service, ajoute Isabelle Pitault. Ceci nécessite de nombreux transports en camion entre les différents sites. »*

La chercheuse considère que le procédé LOHC a de l'avenir pour le stockage stationnaire de l'hydrogène et la mobilité de type camion. S'agissant des voitures, les constructeurs se sont déjà engagés sur la voie des moteurs électriques et le stockage en batterie. *« Selon moi, il est plus avantageux d'installer un électrolyseur dans une station-service pour produire de l'hydrogène puis de réaliser la réaction d'hydrogénation sur place. La chaleur dégagée lors de cette première étape peut alors servir à alimenter un quartier en chauffage. La réaction de déshydrogénation est ensuite réalisée dans le véhicule. Il convient alors de l'équiper de deux réservoirs, l'un accueillant les molécules chargées en hydrogène et l'autre permettant de les récupérer après le déstockage. Si le véhicule est équipé d'un moteur thermique à hydrogène, la chaleur nécessaire lors de la déshydrogénation peut provenir du moteur. Un tiers de la chaleur produite par ce dernier suffit à cette réaction. Par contre, si le véhicule est équipé de piles à combustible, il est alors nécessaire de brûler environ 25 % de l'hydrogène pour réaliser la réaction de déshydrogénation. »*

11/10/2021

AIDER LES INDUSTRIELS DE LA MÉCANIQUE EN FRANCE AU PASSAGE À L'HYDROGÈNE

Avec le projet HyMEET, le Cetim (Centre technique des industries mécaniques) a pour objectif d'accompagner la filière mécanicienne française à la maîtrise technologique des changements qu'impose l'utilisation de l'hydrogène. Un nouveau centre d'ingénierie et d'essais sera construit dans les Pays de la Loire.

Électrolyseurs, pompes, tuyaux, compresseurs, détendeurs, réservoirs... de nombreux équipements sont concernés par la fabrication, le transport, le stockage et l'utilisation de l'hydrogène, dont les volumes sont amenés à fortement augmenter à la faveur de la transition énergétique pour décarboner l'économie. À la demande de la filière mécanicienne française, le Cetim (Centre technique des industries mécaniques) lance le projet HyMEET (Hydrogen Material and Equipment Engineering and Testing Center) afin d'accompagner les industriels de ce secteur à la maîtrise technologique des changements qu'impose l'utilisation de l'hydrogène.

« Le Cetim représente de très nombreux industriels mécaniciens, notamment ceux présents dans la motorisation automobile, explique Christophe Champenois, directeur du projet HyMEET. Dans ce secteur par exemple, le passage aux véhicules électriques est susceptible de faire disparaître des métiers. L'idée du projet est née des risques vécus et anticipés par la filière qui souhaite passer d'un risque à une opportunité et réinventer ses métiers. Un déclic s'est également produit et a favorisé le lancement de ce projet lorsque Airbus a annoncé vouloir mettre en service le premier avion commercial à hydrogène en 2035. Il s'agit là d'une véritable rupture technologique, dans un temps très court, qui demande de transférer une technolo-

gie utilisée dans le spatial vers un avion civil. »

Les objectifs du projet HyMEET sont d'aider à mieux comprendre et à caractériser la molécule d'hydrogène, ses usages, ses risques ainsi que les normes associées et les réglementations en vigueur en fonction des différentes applications de ce gaz. Deux formes principales d'utilisation de l'hydrogène sont envisagées, la première sous la forme gazeuse grâce à sa compression à environ 700 bar afin d'atteindre des capacités suffisantes d'emport. La deuxième, sous la forme cryogénique, à -253 degrés, pour obtenir une densité énergétique encore plus importante pour un volume donné.

Faire monter en compétences les équipes et acheter de nouveaux équipements

Une première enveloppe budgétaire de 11 millions d'euros a déjà été actée pour mettre en œuvre ce projet, et une deuxième tranche de 14 millions devrait être votée en avril. Dans un premier temps, ces montants doivent bénéficier à plusieurs laboratoires situés à Nantes et sa périphérie, notamment celui sur les essais mécaniques des matériaux métalliques et des surfaces, un autre sur les matériaux composites et polymères et un dernier spécialisé sur la fonction d'étanchéité. Il est par exemple prévu de faire monter en compétences les équipes en place, mais aussi d'acquérir de nouveaux équipements pour réaliser, entre autres, des essais de fatigue, de fluage(1) ainsi que des essais physico-chimiques de matériaux.

Le Cetim va également construire un centre d'ingénierie et d'essais capable d'appréhender les matériaux classiques, les alliages métalliques, les matériaux polymères, les composites, voire les céramiques si nécessaire. L'idée étant de

parvenir à les caractériser lorsqu'ils sont utilisés dans des environnements complexes à base d'hydrogène gazeux ou cryogénique, et de créer des bases de données pour concevoir des produits compatibles en termes de performance et de durée de vie. Ce centre devrait être situé dans la périphérie de Nantes ou à La Roche-sur-Yon, sur un ancien site de Michelin.

« Notre ambition est qu'il devienne un véritable centre de référence européen, poursuit Christophe Champenois. *Le Cetim a déjà une expérience de l'hydrogène, puisque nous avons déjà travaillé sur ce sujet avec l'industrie spatiale, notamment autour d'Ariane. Notre volonté à présent est d'apporter des solutions d'industrialisation et d'optimisation permettant à ce vecteur énergétique de répondre aux enjeux de la [décarbonation de la mobilité et de l'industrie](#).* »

(1) La déformation d'un matériau induite pendant le maintien constant de la température et de la contrainte

08/03/2022

UNE SECONDE CAVITÉ SALINE EXPÉRIMENTÉE POUR STOCKER DE L'HYDROGÈNE EN FRANCE

HDF (Hydrogène de France) et Teréga ont débuté des tests pour stocker de l'hydrogène dans une cavité saline située dans les Pyrénées-Atlantiques, en partenariat avec le BRGM (Bureau de recherches géologiques et minières). Leur ambition est d'initier le déploiement d'une nouvelle filière de stockage massif d'hydrogène.

Après [Étrez dans l'Ain](#), une seconde cavité saline située en France, à Carresse-Cassaber dans les Pyrénées-Atlantiques, fait actuellement l'objet d'études dans le but d'y stocker de l'hydrogène. L'initiative est cette fois-ci portée par HDF (Hydrogène de France) et Teréga, dont l'ambition est d'initier le déploiement d'une nouvelle filière de stockage massif d'[hydrogène](#). Celui-ci sera issu d'énergies renouvelables, de types panneaux solaires et éoliens, et sera produit par [électrolyse de l'eau](#). Une première phase a débuté afin d'étudier la préfaisabilité de ce stockage géologique, en partenariat avec le BRGM (Bureau de recherches géologiques et minières). Baptisé Hygéó, ce projet fait l'objet d'un soutien et d'un cofinancement de la région Nouvelle-Aquitaine.

La cavité a la caractéristique d'être de faible dimension. Elle ne mesure que quelques milliers de m³ alors qu'en général, les volumes de ce type de stockage souterrain font plusieurs millions de m³. La cavité a aussi pour particularité d'être fermée depuis le milieu des années 2010 et n'a jamais accueilli d'hydrocarbures. Située à 700 mètres de profondeur, elle servait auparavant de stockage temporaire de saumure, avant qu'il ne soit réinjecté dans d'autres cavités accueillant du propane, afin de les maintenir en pression. « *Nous avons dû reprendre toutes nos connaissances*

de ce site, depuis sa création dans les années 60 jusqu'à sa fermeture définitive » déclare Anne-Gaëlle Bader, cheffe de projets à la direction des géoressources du BRGM.

Avec son expertise en [prévention des risques sur ce type de site](#), le service géologique national va devoir s'assurer que le puits et la cavité n'ont pas souffert pendant la période de fermeture. Pour cela, une panoplie d'outils va être descendue sous terre : sonars, caméras, capteurs, instruments de mesure d'ondes soniques... « *Nous voulons par exemple être sûrs que le tube à l'intérieur du puits est bien cimenté, et qu'il n'y a pas de vide entre celui-ci et le terrain* », ajoute l'experte du BGRM.

Anticiper les changements de pression à l'intérieur de la cavité

Les données issues de ces différents outils permettront de réaliser des travaux de modélisation numérique, couplant écoulement, réactivité mécanique et microbiologie, pour garantir la sécurité et la performance du site de stockage. Un travail qui devrait permettre notamment d'anticiper les changements de pression, lorsque l'hydrogène sera introduit dans la cavité. « *L'une des difficultés avec l'hydrogène est que la molécule est beaucoup plus petite et donc plus mobile que celle de propane*, analyse Anne-Gaëlle Bader. *Étant donné que c'est un gaz inflammable, nous devons être très conservateurs dans nos mesures et nos tests. C'est au cours de l'étude que nous pourrons déterminer à quelle pression maximum l'hydrogène pourra être stocké sans endommager la cavité.* »

Si les résultats de cette première phase sont concluants, des tests d'étanchéité seront réalisés en introduisant de la saumure dans la cavité pour évaluer si celle-ci et le puits

répondent bien aux montées en pression, puis de l'azote, un gaz inerte et donc non dangereux et dans un troisième temps de l'hydrogène. À la suite de cette seconde phase, des études d'ingénierie et de construction pourraient ensuite être menées et une exploitation commerciale envisagée à l'horizon 2026. Cette cavité permettrait alors de stocker 1,5 GWh d'énergie, ce qui représente l'équivalent de la consommation annuelle de 400 foyers.

Quatre sites de stockage d'hydrogène en cavités salines sont actuellement recensés dans le monde, dont trois aux États-Unis et un en Angleterre. Ce dernier site est le plus ancien et fonctionne depuis les années 70. « *Nous disposons déjà d'un retour d'expérience sur ce type de stockage, et aucun souci majeur n'a eu lieu, c'est-à-dire qu'il ne s'est jamais produit d'accident* », précise la cheffe de projets du BRGM.

01/02/2022

UNE FLAMME PROPRE À BASE D'HYDROGÈNE AFIN DE DÉCARBONER LA COMBUSTION

La start-up Bulane a développé une gamme d'électrolyseurs pour produire une flamme à très haute température, sans dégagement de CO₂, à destination de l'industrie. Nicolas Jerez, le président et fondateur de l'entreprise, nous parle de sa technologie et de ses applications.

Créée en 2009, la start-up [Bulane](#) est issue des incubateurs technologiques de la région Occitanie. Elle a développé une technologie permettant de produire une flamme à très haute température sans dégagement de CO₂ à destination de l'industrie. Le procédé fonctionne grâce à la combustion de l'[hydrogène](#), à partir de l'électrolyse de l'eau, et a été mis au point avec deux laboratoires de recherche : l'ICGM (Institut Charles Gerhardt Montpellier) et l'IMFT (Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse). Aujourd'hui, l'entreprise souhaite étendre sa technologie afin de décarboner les chaudières dans les bâtiments. Entretien avec Nicolas Jerez, le président et fondateur de Bulane.

Techniques de l'Ingénieur : Quelle a été votre motivation au départ, avant de créer votre entreprise ?

Nicolas Jerez : Nous sommes partis du constat qu'environ 80 % des émissions de [CO₂](#) proviennent de la combustion de combustibles fossiles. Cette consommation se retrouve dans trois grands domaines : les transports, le bâtiment et l'industrie. Dans ce dernier secteur, les besoins en combustibles sont présents dans de nombreux procédés industriels : le soudage, le brasage, la finition des métaux, la fabrication de verre, la chauffe dans diverses entreprises agroalimentaires... Les principaux gaz de chauffe utilisés

sont le butane, le propane, l'acétylène et le gaz naturel. Or, ces gaz rejettent tous du CO₂. Nous avons donc souhaité offrir une alternative aux industriels et développé une flamme propre à base d'hydrogène afin de décarboner la combustion.

Comment fonctionne votre technologie ?

Nous avons développé une technologie d'[électrolyse](#) de l'eau qui la particularité d'être destinée à alimenter des combustions. Comparée à des électrolyseurs standard, cette spécificité nous a obligés à innover. Le point le plus important de notre cahier des charges a été l'aspect sécuritaire de l'appareil. Sur le plan de la mécanique et de la fluïdique, notre système a été conçu pour éviter tout retour de flamme. Ensuite, un électrolyseur est à la base un équipement plutôt encombrant et lourd. Nous avons réalisé de gros efforts pour miniaturiser le nôtre.

Le plus petit de notre gamme Dyomix ne pèse qu'une trentaine de kg pour une puissance de 2 400 W et se déplace sur des roulettes. Cette compacité nous a demandé de repousser les limites technologiques dans différents domaines que sont les matériaux, la fluïdique et la thermodynamique afin de faire passer beaucoup de puissance dans peu d'encombrement. Enfin, un dernier élément porte sur le rendement de notre technologie qui peut dépasser 90 % selon l'usage, alors qu'il est plutôt situé autour de 70 % généralement pour un électrolyseur standard. Cette performance a pu être atteinte grâce à la mise au point d'une cogénération thermique à l'intérieur de l'appareil. Cette chaleur récupérée peut ainsi être mise à disposition de nos clients et représente jusqu'à 20 % du rendement

global.

À qui commercialisez-vous vos appareils ?

Depuis 2015, nous commercialisons une première gamme d'appareils dans le domaine du chalumeau pour des applications industrielles de soudage. Nous avons vendu plus de 1 200 électrolyseurs pour une puissance totale électrique installée d'environ 4 MW. Ce volume représente plusieurs dizaines de milliers de tonnes de CO₂ économisés. Depuis un an, nous étendons notre technologie à d'autres procédés industriels. Par exemple, nous travaillons avec certains industriels pour remplacer les gaz de chauffe utilisés en distillation par de l'hydrogène. Les applications potentielles de notre technologie sont très importantes. Tous les jours, des milliers de brûleurs consomment des énergies fossiles et l'hydrogène peut être efficace pour les décarboner.

Certes, la combustion de l'hydrogène n'émet pas de CO₂, mais cela implique également que l'électricité soit décarbonée.

Évidemment, nous travaillons avec des offres électriques vertes de façon à garantir une combustion finale décarbonée. D'une manière plus globale, nous ciblons uniquement des procédés de production qui ne sont pas électrifiables, c'est-à-dire là où on ne peut pas remplacer la flamme par une résistance électrique. L'hydrogène est le seul gaz qui, lorsqu'il brûle, ne dégage pas de CO₂. L'avantage de notre technologie est que ce gaz est produit localement, sans stockage et sans transport. On peut dire qu'avec notre technologie, nous procédons à une électrification du procédé de combustion. Il faut savoir que la combustion de l'hydrogène est très performante, et permet d'atteindre des températures supérieures à 2 800 degrés.

Votre technologie peut-elle avoir d'autres applications ?

Depuis plus d'un an, nous travaillons également à la décarbonation de l'énergie de chauffage dans les bâtiments. Nous souhaitons connecter nos électrolyseurs miniaturisés à des chaudières afin d'intégrer l'hydrogène dans la combustion finale. Ce projet s'appelle LP2H pour Local Power

to Heat et nous avons déjà fait la démonstration de notre concept sur le plan expérimental. Il est lauréat du concours d'innovations i-Nov 2020 du SGPI (Secrétariat général pour l'investissement) et de l'Ademe et nous a permis d'obtenir un soutien financé du Programme d'Investissements d'Avenir (PIA). Là encore, le marché potentiel est très important et l'hydrogène peut jouer un rôle majeur pour décarboner massivement les bâtiments.

Crédit photo Une : Bulane

18/10/2021

UNE PYROLYSE PAR PLASMAS FROIDS NANOSECONDES PULSÉS POUR CONVERTIR LE MÉTHANE EN HYDROGÈNE

La start-up Spark Cleantech développe une technologie particulière de pyrolyse du méthane pour produire de l'hydrogène sans émission de CO2. Grâce à un contrôle fin de la température, le procédé est peu énergivore. Entretien avec Erwan Pannier, le cofondateur de l'entreprise.

Le plasma est un gaz ionisé qui peut être généré par des impulsions électriques. La start-up Spark Cleantech a développé une technologie particulière de pyrolyse par plasmas froids pour dissocier le méthane afin de produire de l'hydrogène. Plus précisément, le procédé repose sur des plasmas froids nanosecondes pulsés, permettant un contrôle fin de la température et de l'énergie des électrons, et donc une optimisation du procédé énergétique. La pyrolyse permet de produire de l'hydrogène sans émission de CO2, y compris si le gaz intrant est d'origine fossile, car le carbone est rejeté sous la forme solide. Erwan Pannier, l'inventeur de ce procédé et le cofondateur de la société, nous parle de cette technologie.

Techniques de l'Ingénieur : Quelle est la technologie développée par votre entreprise ?

Erwan Pannier : Nous développons une technologie de plasmas froids nanosecondes pulsés pour convertir le méthane en hydrogène. Elle fonctionne grâce à des impulsions électriques de très courte durée, à haute tension et à très haute fréquence. L'énergie est déposée en environ 10 nanosecondes, à une fréquence de 10 à 100 kilohertz, donc toutes les 10 à 100 microsecondes. Autre-

ment dit, l'apport d'énergie est réalisé tous les 1/100ème à 1/1000ème du temps. Nous parvenons ainsi à créer un plasma avec une densité d'électrons importante et des électrons beaucoup plus énergétiques que le gaz. C'est ce qu'on appelle l'état hors-équilibre : nos électrons ont une énergie moyenne correspondant à une température de plus de 20 000°C, alors que les molécules de gaz sont maintenues à une température de 700 à 1 000°C. Dans un plasma classique à l'équilibre, que l'on appelle plasma thermique, il aurait fallu chauffer l'ensemble du gaz à plusieurs dizaines de milliers de degrés pour obtenir des électrons aussi énergétiques.

Quels sont les avantages de votre procédé ?

La pyrolyse par plasma permet de produire de l'hydrogène décarboné avec 3 à 4 fois moins d'électricité qu'un électrolyseur. Un électrolyseur industriel actuel nécessite plus de 50 kWh/kg H2 (kWh pour produire un kilogramme d'hydrogène) à partir de l'eau, et un électrolyseur idéal nécessitera toujours au moins 39 kWh/kg H2. L'eau est une molécule très stable et difficile à casser. Par comparaison, notre procédé ne nécessite en théorie que 5 kWh/kg H2, donc 8 fois moins. En pratique, nous visons 10 kWh/kg H2, donc 4 fois moins qu'un électrolyseur idéal.

La pyrolyse [plasma par voie thermique](#) est aujourd'hui la voie la plus mûre, mais se révèle très contraignante pour les matériaux, en particulier au niveau des électrodes qui sont en contact avec un arc électrique pouvant avoisiner les 20 000°C. Cela entraîne nécessairement une ablation importante, car même le graphite ou le tungstène fondent au-delà de 3 500 °C. Grâce à la température nettement plus

basse de notre procédé de plasmas pulsés, les matériaux du réacteur sont beaucoup moins sollicités, nous supprimons les problèmes d'ablation des électrodes, et les pertes thermiques au niveau du système sont également moins importantes. Cela rend les réacteurs plasma froids plus faciles à industrialiser.

D'où vient le méthane pour produire de l'hydrogène ?

Il peut être issu de la méthanisation des déchets organiques, appelé **biométhane**, mais provient surtout du gaz naturel, c'est-à-dire du gaz fossile. Avec le procédé de pyrolyse, quelle que soit la provenance du méthane, il n'est jamais oxydé et donc l'hydrogène est produit sans émission de CO₂.

Quant au carbone solide produit, il peut être utilisé comme un nouveau matériau à valeur ajoutée ou stocké dans les sols, notamment sous la forme de biochar qui facilite la rétention d'eau et se dégrade très lentement, donc stocke du carbone pendant des siècles.

Par comparaison, stocker le CO₂ issu de la production d'hydrogène actuelle, par oxydation du méthane, pose un problème logistique complexe qui nécessite d'injecter le CO₂, c'est-à-dire un gaz, dont chaque molécule est 3,6 fois plus massique que le carbone initial, dans des formations géologiques ou des cavités salines. En traitant directement le carbone, on gère directement un solide, avec bien moins de masse, ce qui facilite beaucoup la logistique.

À qui s'adresse votre technologie ?

Nous cibons les industriels consommateurs d'hydrogène, dont les besoins sont inférieurs à 1 000 Nm³/h (norme mètre cube par heure) d'hydrogène, soit 2 000 kg/jour, et qui veulent s'alimenter en hydrogène décarboné, et réduire leurs coûts en le produisant sur place. Pour cela, il leur suffit d'être connectés au réseau gazier et à celui d'électricité. Ces industriels peuvent ainsi s'affranchir du conditionnement, du transport et du stockage, qui représentent jusqu'à 70 % du coût final de l'hydrogène.

Quel est le stade de maturité de votre procédé ?

Nous développons notre technologie dans les laboratoires

de CentraleSupélec grâce à un programme de maturation financé par la SATT (Société d'Accélération de Transfert Technologique) Paris-Saclay. Nous avons fait la preuve de concept d'une brique élémentaire capable de produire 1 m³/heure d'hydrogène. Ce prototype sera notre unité de base et sera ensuite monté en parallèle, car nous développons un concept modulaire. Concrètement, pour une installation de 200 kW, nous installerons 200 unités de 1 kW. En 2023, nous allons installer un premier démonstrateur d'environ de 30 kW sur un site industriel, avec en objectif la commercialisation du procédé à l'horizon 2025.

03/02/2022

LES ATOUTS DU STOCKAGE « SOLIDE » DE L'HYDROGÈNE

Dans le contexte environnemental et énergétique actuel, l'hydrogène pourrait devenir un vecteur d'énergie propre afin de réaliser la décarbonation de l'économie et assurer une croissance écologique de l'industrie. Parmi les défis à relever liés au déploiement de l'hydrogène décarboné (production, distribution et transport, usage), le stockage compact, sûr et efficace reste une technique à développer en vue d'applications pratiques.

Un extrait de [Nouveaux matériaux pour le stockage de l'hydrogène – Alliages métalliques multi-élémentaires hydrurables](#) par Claudia ZLOTEA

Une simple comparaison entre les trois grands types de [stockage d'hydrogène](#) (hyperbare ou liquide, cryoadsorption et absorption dans divers hydrures) nous indique que la dernière méthode dite « solide » est la plus prometteuse. Ainsi, les principaux avantages des [hydrures](#) consistent d'abord dans leurs importantes densités volumiques, supérieures à celles de l'hydrogène. Ensuite, ces composés possèdent de grandes capacités massiques de stockage et permettent une pression d'hydrogène délivré ajustable en fonction de son utilisation finale. Enfin, la sécurité d'utilisation des hydrures est supérieure à celle des réservoirs sous haute pression du fait des pressions modestes lors de la phase d'absorption de l'hydrogène. De plus, grâce à une réaction de désorption endothermique, en cas de fuite accidentelle la température du réservoir chute rapidement, ce qui stoppe le dégagement d'[hydrogène](#).

Des hydrures aux nouveaux matériaux

En fonction du type de liaison avec l'hydrogène, on distingue les hydrures métalliques, ioniques ou complexes. Comme l'indique leur nom, dans les hydrures métalliques l'[hydrogène](#) est directement lié aux atomes de métal via une liaison métallique. Malgré un effort de recherche soutenu

depuis de nombreuses années, les capacités de stockage atteignables à la température ambiante restent de l'ordre de 1,5, 1,8 ou 2,0 % en masse. Les hydrures ioniques, quant à eux, sont des composés qui se forment entre l'hydrogène et les métaux alcalins et alcalino-terreux. Cette fois, l'hydrogène agit comme l'ion hydrure (H^-) et se lie à des atomes métalliques électropositifs. Le cas de l'hydrure de Mg, MgH_2 , est un cas emblématique grâce à ses excellentes capacités massiques (7,6 %). Néanmoins, ses propriétés thermodynamiques défavorables pénalisent son utilisation... Dans les hydrures complexes, l'hydrogène forme des liaisons covalentes avec des métaux ou d'autres éléments non métalliques en constituant des anions. Ces complexes anioniques sont liés aux cations des métaux, afin de former un hydrure complexe réunissant des liaisons covalentes et ioniques au sein du même matériau. Cependant, ces hydrures possèdent des cinétiques de réaction multi-étapes lentes et des thermodynamiques défavorables qui limitent drastiquement leur application pratique. Finalement, afin de répondre simultanément aux trois critères clés tels que la compacité, la sûreté et l'efficacité, la méthode de stockage sous forme « solide » dans des matériaux métalliques hydrurables (formant des hydrures) est très avantageuse. Cependant, aucun matériau étudié jusqu'à maintenant ne réunit tous les critères (capacité, cinétique, thermodynamique, cyclage, coût, etc.) pour un stockage stationnaire ou mobile. C'est pourquoi des nouveaux matériaux doivent être impérativement explorés.

Exclusif ! L'article complet dans les ressources documentaires en accès libre jusqu'au 29 décembre 2022 !

[Nouveaux matériaux pour le stockage de l'hydrogène – Alliages métalliques multi-élémentaires hydrurables](#), par Claudia ZLOTEA

15/12/2022

LES THÈSES DU MOIS : MATÉRIAUX INNOVANTS POUR PRODUIRE ET STOCKER L'HYDROGÈNE

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 de décembre, "Matériaux innovants pour produire et stocker l'hydrogène", 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](#).

Borane compounds for chemical hydrogen storage and carbon dioxide capture Carlos Castilla Martínez Thèse de doctorat en Chimie et Physico-Chimie des Matériaux, soutenue le 19-02-2021 Institut Européen des membranes

Matériaux pour conversion et stockage simultanés de l'énergie Jeremy Sum Thèse de doctorat en Chimie, soutenue le 20-01-2022 Chimie de la matière condensée de Paris

Synthèse haute pression et haute température d'hydrures à structure pérovskite à base d'éléments légers pour le stockage d'hydrogène Julius Andrew Nunez Thèse de doctorat en Matériaux, mécanique, génie civil, électrochimie, soutenue le 29-03-2022 Institut Néel

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 Technologies

Matériaux nanostructurés à base d'hydrures métalliques pour le stockage d'hydrogène dédiés aux véhicules électriques équipés de pile à combustible Mohamed Amine Lahlou-Nabi Thèse de doctorat en Matériaux, soutenue le 08-12-2021 Laboratoire Interdisciplinaire Carnot de Bourgogne

Synthèse et caractérisation de nouveaux composés bidimensionnels, les MXènes, pour le stockage et la conversion de l'énergie Mohamed Benchakar Thèse de doctorat en Chimie théorique, physique, analytique, soutenue le 20-10-2020 Institut de chimie des milieux et matériaux de Poitiers

Matériaux nanoporeux à haute surface spécifique pour le stockage et la compression de l'hydrogène Pamela Ramirez Vida Thèse de doctorat en Science des Matériaux, soutenue le 09-11-2021 Institut Jean Lamour

Etude des propriétés de déshydrogénation des borohydrures métalliques pour le stockage de l'hydrogène Parviz Hajiyev Thèse de doctorat en Physique de

la matière condensée et du rayonnement, soutenue le 22-01-2020 *Laboratoire d'innovation pour les technologies des énergies nouvelles et les nanomatériaux*

Refractory high entropy alloys for hydrogen storage-
Jorge Montero Banuelos Thèse de doctorat en Chimie, soutenue le 15-12-2020 *Institut de Chimie et des Matériaux Paris-Est*

Matériaux à haute surface et haute densité pour le stockage de l'hydrogène *Laura Jimenez lopez* Projet de thèse en Science des Matériaux, depuis le 01-10-2022 *Institut Jean Lamour*

15/12/2022

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



RÉDIGÉE ET VALIDÉE
PAR DES EXPERTS




MISE À JOUR
PERMANENTE



100 % COMPATIBLE
SUR TOUS SUPPORTS
NUMÉRIQUES



SERVICES INCLUS
DANS CHAQUE OFFRE

- > + de 340 000 utilisateurs chaque mois
- > + de 10 000 articles de référence et fiches pratiques
- > Des Quiz interactifs pour valider la compréhension 

SERVICES ET OUTILS PRATIQUES



Questions aux experts*

Les meilleurs experts techniques et scientifiques vous répondent



Articles Découverte

La possibilité de consulter des articles en dehors de votre offre



Dictionnaire technique multilingue

45 000 termes en français, anglais, espagnol et allemand



Archives

Technologies anciennes et versions antérieures des articles



Info parution

Recevez par email toutes les nouveautés de vos ressources documentaires

*Questions aux experts est un service réservé aux entreprises, non proposé dans les offres écoles, universités ou pour tout autre organisme de formation.

Les offres Techniques de l'Ingénieur

INNOVATION

- Éco-conception et innovation responsable
- Nanosciences et nanotechnologies
- Innovations technologiques
- Management et ingénierie de l'innovation
- Smart city – Ville intelligente

MATÉRIAUX

- Bois et papiers
- Verres et céramiques
- Textiles
- Corrosion – Vieillessement
- Études et propriétés des métaux
- Mise en forme des métaux et fonderie
- Matériaux fonctionnels. Matériaux biosourcés
- Traitements des métaux
- Élaboration et recyclage des métaux
- Plastiques et composites

MÉCANIQUE

- Frottement, usure et lubrification
- Fonctions et composants mécaniques
- Travail des matériaux – Assemblage
- Machines hydrauliques, aérodynamiques et thermiques
- Fabrication additive – Impression 3D

ENVIRONNEMENT – SÉCURITÉ

- Sécurité et gestion des risques
- Environnement
- Génie écologique
- Technologies de l'eau
- Bruit et vibrations
- Métier : Responsable risque chimique
- Métier : Responsable environnement

ÉNERGIES

- Hydrogène
- Ressources énergétiques et stockage
- Froid industriel
- Physique énergétique
- Thermique industrielle
- Génie nucléaire
- Conversion de l'énergie électrique
- Réseaux électriques et applications

GÉNIE INDUSTRIEL

- Industrie du futur
- Management industriel
- Conception et production
- Logistique
- Métier : Responsable qualité
- Emballages
- Maintenance
- Traçabilité
- Métier : Responsable bureau d'étude / conception

ÉLECTRONIQUE – PHOTONIQUE

- Électronique
- Technologies radars et applications
- Optique – Photonique

TECHNOLOGIES DE L'INFORMATION

- Sécurité des systèmes d'information
- Réseaux Télécommunications
- Le traitement du signal et ses applications
- Technologies logicielles – Architectures des systèmes
- Sécurité des systèmes d'information

AUTOMATIQUE – ROBOTIQUE

- Automatique et ingénierie système
- Robotique

INGÉNIERIE DES TRANSPORTS

- Véhicule et mobilité du futur
- Systèmes aéronautiques et spatiaux
- Systèmes ferroviaires
- Transport fluvial et maritime

MESURES – ANALYSES

- Instrumentation et méthodes de mesure
- Mesures et tests électroniques
- Mesures mécaniques et dimensionnelles
- Qualité et sécurité au laboratoire
- Mesures physiques
- Techniques d'analyse
- Contrôle non destructif

PROCÉDÉS CHIMIE – BIO – AGRO

- Formulation
- Bioprocédés et bioproductions
- Chimie verte
- Opérations unitaires. Génie de la réaction chimique
- Agroalimentaire

SCIENCES FONDAMENTALES

- Mathématiques
- Physique Chimie
- Constantes physico-chimiques
- Caractérisation et propriétés de la matière

BIOMÉDICAL – PHARMA

- Technologies biomédicales
- Médicaments et produits pharmaceutiques

CONSTRUCTION ET TRAVAUX PUBLICS

- Droit et organisation générale de la construction
- La construction responsable
- Les superstructures du bâtiment
- Le second œuvre et l'équipement du bâtiment
- Vieillessement, pathologies et réhabilitation du bâtiment
- Travaux publics et infrastructures
- Mécanique des sols et géotechnique
- Préparer la construction
- L'enveloppe du bâtiment
- Le second œuvre et les lots techniques

OFFRE



Chimie verte

De nouveaux procédés chimiques pour améliorer les rendements tout en respectant l'environnement
Ref : TIP142WEB

PRÉSENTATION

Les principes de la chimie pour un développement durable: comment veiller à l'équilibre économique, social et environnemental du milieu dans lequel elle s'insère,
Les nouvelles voies de synthèse qui favorisent l'économie de matières premières, d'énergie consommée et d'étapes réactionnelles,
Eau, liquides ioniques ou supercritiques: des solvants alternatifs avec un faible impact sur l'environnement pour remplacer les solvants classiques,
La valorisation des produits issus de la biomasse: sucres et autres glucides, acides gras, etc.

VOTRE COMMANDE :

Référence	Titre de l'ouvrage	Prix unitaire H.T	Qté	Prix total H.T
TIP142WEB	Chimie verte	1 355 €	1	1 355 €
Total H.T en €				1 355 €
T.V.A : 5,5%				74,53 €
Total TTC en €				1 429,53 €

VOS COORDONNÉES :

Civilité M. Mme
Prénom _____
Nom _____
Fonction _____
E-mail _____
Raison sociale _____
Adresse _____
Code postal _____
Ville _____
Pays _____

Date :

Signature et cachet obligatoire

CONDITIONS GÉNÉRALES DE VENTE

Conditions générales de vente détaillées sur simple demande ou sur www.technique-ingenieur.fr

Si vous n'êtes pas totalement satisfait, vous disposeriez d'un délai de 15 jours à compter de la réception de l'ouvrage pour le retourner à vos frais par voie postale. Livraison sous 30 jours maximum.