HAL
open science

L'hydrogène au long cours

Jan Mertens, Caroline Hillegeer, Hélène Lepaumier, Camel Makhloufi, Laurent Baraton, Isabelle Moretti

To cite this version:

Jan Mertens, Caroline Hillegeer, Hélène Lepaumier, Camel Makhloufi, Laurent Baraton, et al.. L'hydrogène au long cours. 2018. hal-02191054

HAL Id: hal-02191054

https://univ-pau.hal.science/hal-02191054

Submitted on 23 Jul 2019

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

L'hydrogène au long cours

© Kawasaki Heavy Industries

1. Le groupe Kawasaki, en collaboration avec l'Australie et le groupe Shell, construit un navire de transport pour l'hydrogène liquide. Ce type de navires remplacera-t-il les méthaniers ?

Comment transporter les énergies renouvelables ? En les convertissant en hydrogène vert, un composé que l'on peut ensuite embarquer, par exemple, dans des bateaux. Sous quelle forme convertir cet hydrogène ?

LES AUTEURS

JAN MERTENS, CAROLINE HILLEGEER, HÉLÈNE LEPAUMIER, CAMEL MAKHLOUFI, LAURENT BARATON ET ISABELLE MORETTI
ENGIE DRT,
ENGIE Lab LABORELEC,
ENGIE Lab CRIGEN

À en croire la base de données officielle, plus de 25 000 tankers sillonnent les océans du monde. La plupart transportent du pétrole, mais quelques centaines sont emplis de butane ou de méthane liquéfiés. On compte également des vraquiers spécialisés dans le charbon. Avec ces navires, les énergies fossiles sont acheminées sur de longues distances depuis les zones de production vers celles où se concentrent les consommateurs. Qu'en est-il des énergies renouvelables ?

On sait que la quantité d'énergie pouvant être extraite du Soleil, du vent ou des sources hydrologiques pourrait suffire à répondre à la demande mondiale. Néanmoins, ces sources sont pour la plupart intermittentes et toutes les régions de la planète n'ont pas le même potentiel. La question du transport de ce type d'énergie se pose alors de façon aiguë. Comment y remédier ? Grâce à l'hydrogène.

En effet, ce composé (H_2) est un élément important de la nouvelle donne énergétique pour les applications mobiles, car l'hydrogène est un combustible propre et à haute densité énergétique, de l'ordre de 33 kilowattheure par kilogramme (kWh/kg), soit près de trois fois plus que l'essence. Néanmoins, sa densité volumique est faible, car l'hydrogène est peu dense. Même à une pression de 700 bars, la densité énergétique n'est que de 1,3 kilowattheure par litre (kWh/l), soit environ sept fois moins qu'un litre d'essence (vers 9,5 kWh/l). En conséquence, le transport de l'hydrogène nécessite de véhiculer des volumes considérables, bien supérieurs à ceux du pétrole.

Un deuxième écueil réside dans la taille de la molécule H_2. Extrêmement petite, elle passe facilement à travers de nombreux matériaux. En d'autres termes, sa mise en bouteille n'est pas aisée. Ces deux enjeux sont représentés sur la figure 2 qui montre la densité d'énergie en fonction du mode de transport et de la nature de l'hydrogène. Toutes les solutions envisagées cherchent à augmenter cette densité énergétique, mais aucune ne parvient à s'approcher de celle de l'essence. Le défi du contenant apparaît clairement : même en passant par l'H_2 liquide, seul 20% du poids transporté est de l'hydrogène…

Parmi les différents modes présentés, l'hydrogène liquéfié (LH_2) ou sous la forme de liquides organiques porteurs d'hydrogène (LOHC, pour *Liquid Organic Hydrogen Carriers*) sont les méthodes les plus matures. Outre ces deux solutions, on peut également imaginer une conversion chimique complète de l'hydrogène : en réagissant avec de l'azote N_2, l'hydrogène produit de l'ammoniac (NH_3) ; avec du dioxyde de carbone CO_2, il produit du méthane CH_4 ou du méthanol CH_3OH. Nous avons comparé ces quatre modes de transport.

LE KAWASAKI DES MERS

La solution de l'hydrogène liquide est celle qui a le vent en poupe. Ainsi, le groupe japonais Kawasaki construit actuellement un premier bateau, attendu pour 2020 (*voir la figure 1*), équipé pour en transporter. La principale difficulté est la température requise pour la liquéfaction de l'hydrogène, – 253 °C, qui doit être maintenue durant tout le transport. L'étape de liquéfaction serait la plus gourmande en énergie et, quels que soient les progrès, cette transformation absorbera à elle seule entre 20 et 30% de l'énergie de l'hydrogène.

Les LOHC consistent à charger une molécule organique avec l'H_2 sur le site de production et la décharger dans la zone de consommation. L'intérêt de cette méthode est que les liquides organiques sont facilement transportables (les tankers peuvent s'y prêter) et que leurs propriétés sont bien connues. Les défis résident ici dans la performance des réactions d'hydrogénation et de déshydrogénation.

La première est exothermique (elle libère de la chaleur) dans les conditions habituelles (une pression de 10 à 50 bars et une température entre 100 et 250 °C) avec des catalyseurs à base de ruthénium ou de nickel. À l'inverse, la déshydrogénation est endothermique à plus faible pression (de 1 à 10 bars) et à plus haute température (entre 150 et 400 °C) avec une perte d'énergie de l'ordre de 10 kWh/kg d'hydrogène. La valorisation de la chaleur libérée sur le site d'hydrogénation ainsi qu'un accès à une source de chaleur sur le lieu de déshydrogénation rendraient le procédé plus attractif, mais c'est peu probable. Là où l'énergie solaire est abondante et où serait produit l'hydrogène, la chaleur est aussi largement disponible et peu chère. Au contraire, trouver de la chaleur gratuite entre 150 et 400 °C sur les sites de déshydrogénation est irréaliste.

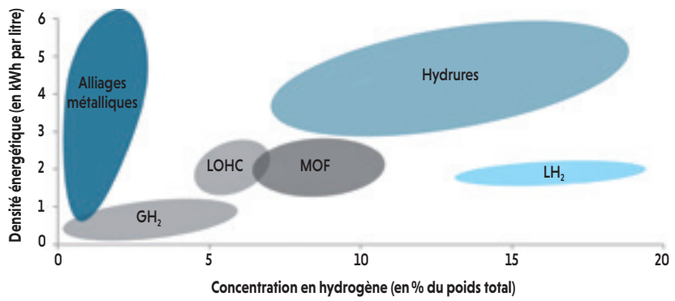
La conversion de l'hydrogène en ammoniac, dont le transport est bien maîtrisé, nécessite un électrolyseur, qui fournit l'hydrogène, ainsi qu'un séparateur pour extraire l'azote de l'air. Les options méthanol et méthane imposent la mise en place d'un dispositif de capture du CO_2 libéré au moment de la déshydrogénation. On peut aussi imaginer qu'il soit recyclé, ce qui implique son retour vers les lieux de production d'hydrogène. Les méthodes de capture de CO_2 sont déjà disponibles, ainsi que celles pour la méthanation du CO_2. De même, les technologies et les infrastructures pour le transport de gaz naturel liquéfié (LNG) ou de méthanol sur de grandes distances sont bien établies.

Que ce soit avec de l'azote ou du CO_2, de l'énergie est aussi générée pendant la phase d'hydrogénation. Elle pourrait être utilisée pour la séparation de l'air ou la capture de CO_2. Pour le craquage des molécules (le cassage en éléments plus petits) sur le site de consommation, là encore de la chaleur est nécessaire pour obtenir de l'hydrogène pur. Ce craquage est un obstacle à surmonter. À partir de l'ammoniac, on obtient assez facilement un mélange de 75% d'hydrogène et 25% d'azote. Arriver à 100% d'hydrogène reste néanmoins un défi pour lequel diverses technologies (catalyse, membrane…) sont à l'étude.

Avec le méthane comme vecteur, le vaporeformage, ou SMR, pour *Steam Methane Reforming* ($CH_4 + H_2O \rightarrow CO + 3H_2$) est, elle, une technologie tout à fait mature. Un système de transport qui demanderait de la chaleur pour l'hydrogénation et libérerait de l'énergie durant la déshydrogénation serait une alternative plus intéressante.

Le transport de l'hydrogène comporte-t-il des risques ? Ce composé étant peu toxique, il n'y a pas d'enjeu de ce point de vue, mais il est très inflammable, ce qui pose des questions de sécurité. En revanche, certains systèmes LOHC et NH_3 peuvent présenter des risques en termes de toxicité environnementale et humaine. Pour la solution CO_2, l'impact de l'hydrogénation et celui de la déshydrogénation doivent être étudiés. Deux pistes sont possibles pour rendre l'ensemble du processus plus écologique. La première consiste en la capture du CO_2 à partir de sources naturelles ou de l'air ambiant de façon à alimenter les réactions d'hydrogénation. De la sorte, le bilan carbone est nul. La seconde piste, nous l'avons vu, serait de capturer le CO_2 sur le site de déshydrogénation et de le recycler.

En fin de compte, bien que distincts, les quatre moyens de transport que nous avons décrits sont assez énergivores et d'une efficacité globale inférieure à 50%. Qui plus est, pour les technologies présentées, seuls de petits pilotes existent. Des expériences à grande échelle sont impératives, et urgentes. Une analyse du cycle de vie pour chacune d'elles est aussi nécessaire. Une alternative pour espérer un jour voir diminuer le nombre de supertankers croisant au large de nos côtes. ■



© D'après M. Reuß *et al.*, 2017

2. Comparaison des propriétés des différentes formes de l'hydrogène pour le transport : sous la forme de liquides organiques porteurs d'hydrogène (LOHC, pour *Liquid Organic Hydrogen Carriers*) ; de réseaux moléculaires métallo-organiques (MOF, pour *Metal Organic Frameworks*) ; d'hydrogène gazeux (GH_2) ; liquéfiée (LH_2) ; d'alliage métallique ; d'hydrures (l'anion hydrogène H^-).

RÉFÉRENCES

M. Reuß *et al.*, **Seasonal storage and alternative carriers : A flexible hydrogen supply chain model,** *Applied Energy*, vol. 200, pp. 290-302, 2017.

M. Markiewicz *et al.*, **Environmental and health impact assessment of Liquid Organic Hydrogen Carrier (LOHC) systems – challenges and preliminary results,** *Energy Environ. Sci.*, vol. 8, pp. 1035-1045, 2015.

© POUR LA SCIENCE - Mars 2018
© POUR LA SCIENCE - Mars 2018