

OHÉ DE L'HYDROGÈNE RENOUVELABLE !

Ces dernières années, divers navires à propulsion électrique ont été présentés, dans lesquels l'électricité est produite par l'énergie solaire sur le navire lui-même. Cela fonctionne bien, à condition que le soleil brille. Par exemple, pour faire face aux intempéries lors de longs voyages en mer, une unité de stockage d'électricité est nécessaire. L'une des possibilités est l'installation d'un accumulateur. Une alternative intéressante est un système de stockage basé sur l'hydrogène. Un tel système énergétique a récemment reçu une certification. Le projet pilote associé, soutenu par l'Office fédéral de l'énergie, fournit la base pour l'utilisation de systèmes de stockage d'énergie à base d'H₂ dans les ferries et autres types de navires.

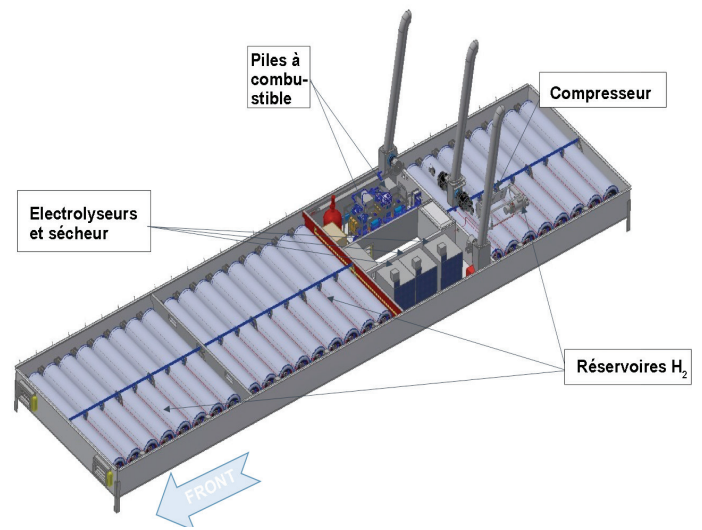


Vue du pont du catamaran à énergie renouvelables : l'énergie solaire produite à bord peut être temporairement stockée dans un système de stockage d'énergie à base d'hydrogène. Photo: Swiss Hydrogen

Le catamaran PlanetSolar, présenté en 2010, n'est pas conduit par le vent, mais par le soleil. Le bateau a alors un aspect différent de celui auquel les amateurs de voile sont habitués : Il n'y a pas de voiles, mais une propulsion électrique à la place. L'électricité des deux moteurs électriques provient de modules photovoltaïques qui couvrent la surface du bateau. Les modules PV ont une puissance de 90 kWp, ce qui équivaut à 15 systèmes de toit sur des maisons individuelles. Avec son tour du monde entre 2010 et 2012, le bateau solaire au design attrayant a été le premier véhicule fonctionnant à l'énergie solaire à porter le message de la production d'énergie durable dans le monde. En 2015, l'ancien entrepreneur lausannois Marco Simeoni a repris le catamaran solaire, lui a donné le nom de Race-for-Water (R4W en abrégé) et l'utilise depuis lors pour une campagne mondiale contre la pollution des océans par les déchets plastiques.

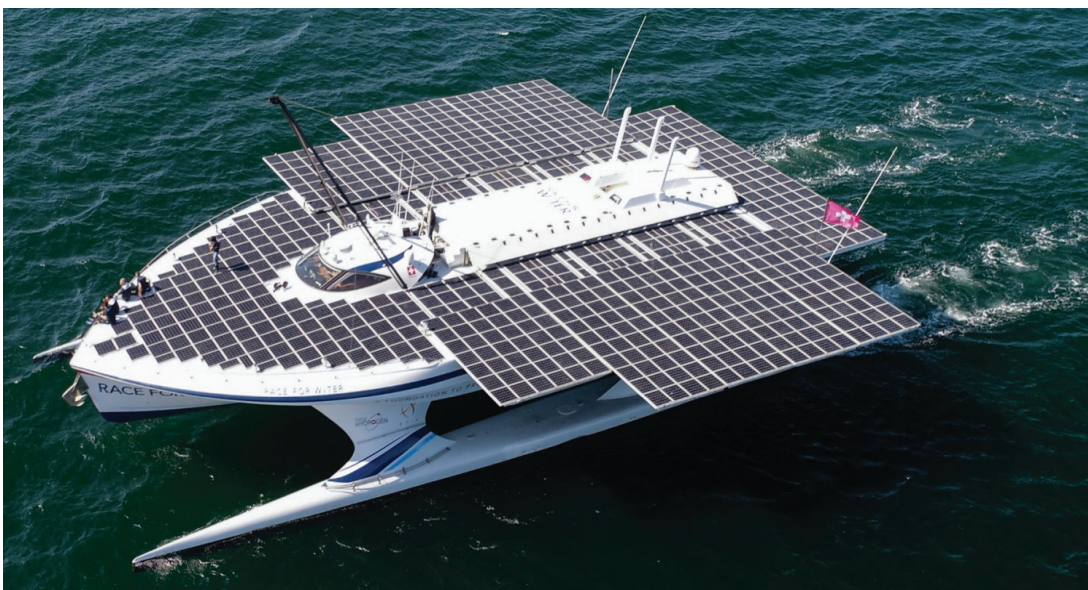
Certification après trois ans de tests pratiques

Le catamaran solaire a déjà eu beaucoup de publicité. En arrière-plan se trouvait le nouveau système de stockage basé sur l'hydrogène (H_2) et la technologie des piles à combustible, qui a été installé dans le bateau à partir de 2017 : Lorsque que le bateau est à quai et que les batteries sont pleines, l'électricité solaire qui n'est pas nécessaire aux systèmes de bord peut être stockée sous forme d'hydrogène. Pour cela, l'eau de mer est dessalée, purifiée et divisée en hydrogène et en oxygène par un électrolyseur. L'hydrogène sera stocké dans des cylindres sous pression et, lorsque nécessaire quand le bateau navigue, reconverti en électricité via deux piles à combustible (cf. encadré p.3).



Le conteneur destiné à stocker l'électricité solaire sous forme d'hydrogène mesure 15 m de long, presque 4 m de large et 1 m de haut. Il inclut aussi les 2 piles à combustibles et le système de production d'hydrogène. Graphique : Rapport final de l'OFEN

Le système de stockage de l'énergie à base d' H_2 complète le volume de stockage des batteries lithium-ion du R4W ; il augmente l'autonomie du bateau maritime de deux à 6 jours sans ensoleillement. L'installation du système s'est déroulée de février 2017 à juillet 2018, et depuis lors, les composants du système énergétique sophistiqué ont été optimisés à plusieurs reprises. En janvier 2020, le système énergétique a finalement été certifié par l'organisation DNV-GL (Det Norsk Veritas Germanischer Lloyd), une société internationale qui effectue des enquêtes techniques et des certifications dans le secteur du transport maritime et de l'énergie en général.



Le système de stockage de l'énergie à base de H_2 sur le catamaran est placé au milieu (blanc). L'air des systèmes de ventilation et l'oxygène produit par la division de l'eau dans l'électrolyseur s'échappent par les trois cheminées situées dans la partie arrière du réservoir. Photo : rapport final de l'OFEN

Aussi léger que possible, aussi compact que possible

Avec la certification, le système énergétique atteint le niveau de maturité nécessaire aux applications commerciales. Jusqu'à ce que cela devienne réalité, le système de stockage était en service sur une distance de 28'000 miles nautiques (environ 52'000 km). Pendant cette période, une grande expérience a été acquise avec la plate-forme d'essai. « Avec le R4W, nous avons montré comment une plateforme autonome de production, de stockage et de conversion d'énergie verte fonctionne de manière fiable dans les conditions spécifiques d'un bateau en état de marche », explique Alexandre Closset, co-fondateur et directeur général de la société d'ingénierie fribourgeoise Swiss Hydrogen, qui était responsable du projet.

Le stockage chimique de l'électricité sous forme d'hydrogène est pratiqué depuis longtemps. Entre-temps, la conversion de l'hydrogène en électricité à l'aide de piles à combustible a également été bien testée. Le grand défi du présent projet était de réaliser ce processus complexe en plusieurs étapes dans les conditions restrictives d'un bateau. Le système de stockage devait être aussi léger et peu encombrant que possible, et il devait résister à la mer agitée, aux températures extrêmes et à l'air salé et humide.

Concept de sécurité global

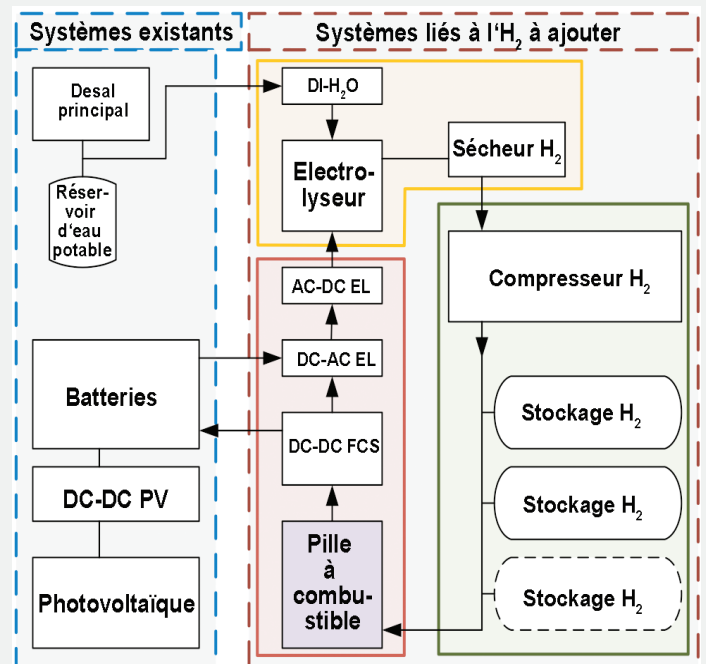
Comme un électrolyseur alcalin était trop grand, les ingénieurs ont décidé d'utiliser un électrolyseur à membranes échangeuses de protons compact. Afin de gagner du poids, les 24 réservoirs de stockage de l'hydrogène sont en fibre de

UN STOCKAGE SOLAIRE FLOTTANT

En termes simples, on pourrait dire que le système énergétique de R4W se débrouille avec l'eau de mer et le soleil. Mais la mise en œuvre technique est exigeante : l'eau de mer est d'abord dessalée et déminéralisée, puis divisée en hydrogène et en oxygène dans deux électrolyseurs à membranes échangeuses de protons (PEM), d'une capacité de 5 kW chacun, en utilisant l'électricité solaire. L'hydrogène (H_2) est séché et comprimé d'environ 45 à 350 bar avec un compresseur sans huile et stocké dans 24 cylindres sous pression.

La consommation moyenne du catamaran solaire pour l'alimentation de la propulsion et l'alimentation électrique à bord est de 20 kW à 40kW. Si l'électricité solaire actuellement produite n'est pas suffisante à cette fin et que le niveau de charge des batteries est trop bas, l'hydrogène stocké est reconverti en électricité : Cela se fait avec deux piles à combustible PEM (28 kWp chacune ; 95 V/300 A). Le courant est transformé en 400 V avec un convertisseur DC/DC. Tous les composants du système de stockage de l'hydrogène sont logés dans un conteneur de 15 x 3,8 x 1,0 m.

L'étape de conversion de l'électricité solaire en hydrogène est réalisée avec un rendement de 30%, la reconversion de l'hydrogène en électricité avec 32%. Le résultat final est qu'environ 10 % de l'énergie solaire excédentaire est utilisée pour la propulsion. « Ce chiffre est encore insatisfaisant, mais nous voyons un grand nombre de points d'amélioration pour porter les 10% à plus de 25% », déclare Alexandre Closset en regardant vers l'avenir. Il s'agit notamment de la suppression des convertisseurs inutiles, de l'utilisation de l'eau de pluie au lieu de l'eau de mer (si une telle installation devait se faire sur terre), ou d'un meilleur dimensionnement de l'électrolyseur et de la pile à combustible. BV



carbone, doublés d'un polymère à l'intérieur. Le poids total des conteneurs pourrait ainsi être limité à environ 2'500 kg. Les réservoirs peuvent contenir jusqu'à 165 kg d'hydrogène utilisable équivalent à 2.5 MWh d'énergie électrique utilisable (pour un système de pile à combustible de 45% de rendement). Tous les composants du système de stockage de l'énergie (dessalement, électrolyseurs, compresseur, séchoir à H₂, stockage d'hydrogène, système de piles à combustible), y compris le conteneur, pèsent au total 6'400 kg. À titre de comparaison : la batterie lithium-ion, qui sert également de stockage d'énergie dans la R4W, pèse environ 7'400 kg, mais ne peut stocker que 750 kWh d'électricité.

De nombreux composants du système énergétique sont des prototypes. En collaboration avec la société suédoise PowerCell, une pile à combustible à haute densité de puissance a été conçue pour la présente application. En raison de la nature explosive de l'hydrogène, des exigences de sécurité élevées s'appliquent à toute l'installation. Chacun des 24 réservoirs de stockage d'hydrogène est équipé de trois dispositifs de sécurité de type thermo fusible. Si la température ambiante dépasse 110 °C lors d'un incendie, l'hydrogène est automatiquement libéré des réservoirs. Le concept de sécurité global comprend des détecteurs de fumée et d'hydrogène, ainsi que des contrôles redondants de ventilations appropriées des divers éléments du système

Décarbonisation du transport maritime

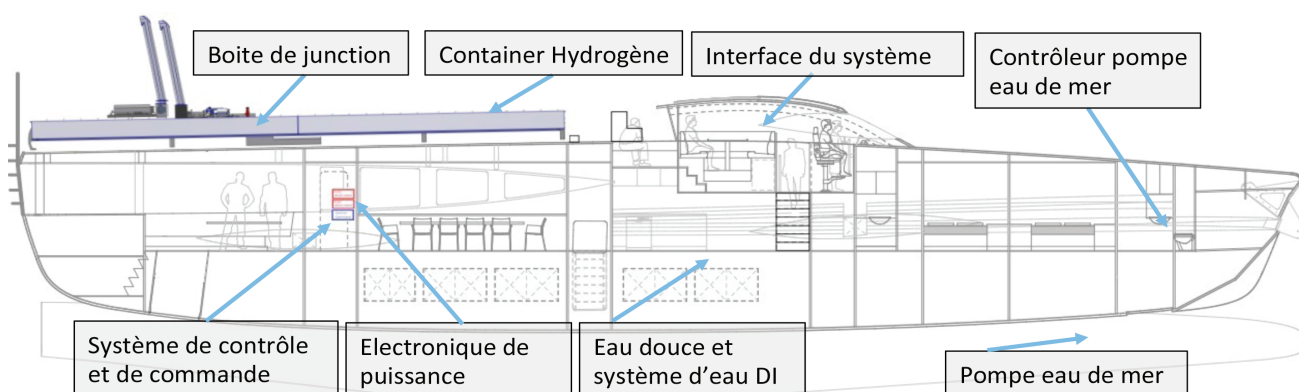
En raison de sa forte densité énergétique, l'hydrogène (produit de manière durable) est une option privilégiée pour décarboniser le secteur de la mobilité. Cela vaut pour le transport routier, mais aussi pour le transport maritime dans une perspective mondiale. Les émissions de CO₂ du transport de marchandises par mer sont considérables. Avec un milli-



Chacun des 24 réservoirs de stockage d'hydrogène est équipé de trois dispositifs de sécurité de type thermofusible (TPRD). Photo : rapport final de l'OFEN

ard de tonnes, il est 50 % plus élevé que celui du fret aérien (selon les chiffres de l'OCDE/AIE pour 2014). Les moteurs électriques alimentés par des piles à combustible à hydrogène sont une alternative possible.

R4W offre un réservoir d'expérience dans lequel de nouveaux projets peuvent puiser. L'expérience acquise est actuellement intégrée au projet MARANDA, financé par l'UE, par exemple. Dans le cadre de ce projet de quatre ans, un navire de recherche opérant dans les eaux arctiques doit être équipé d'un système hybride de piles à combustible et de batteries d'ici 2021, qui fournira l'alimentation électrique de bord et l'énergie nécessaire pour positionner le navire sans vibrations pen-



Arrangement des éléments techniques importants sur le catamaran « Race for Water ». Illustration : rapport final de l'OFEN

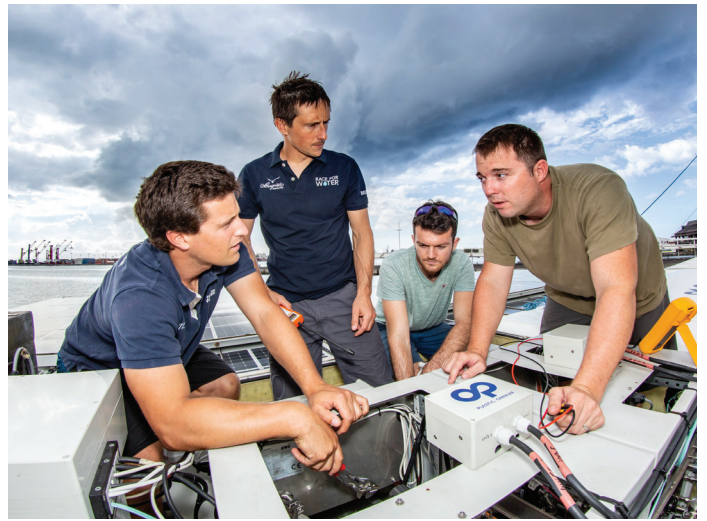
dant les mesures. Les piles à combustible de MARANDA sont trois fois plus puissantes que celles de R4W. Contrairement au R4W, l'hydrogène n'est pas produit sur le navire mais est transporté dans un container de réservoirs.

Application également aux eaux intérieures

De même, dans la plupart des autres applications, il peut être trop coûteux de produire l'hydrogène sur le bateau lui-même. L'application de l'hydrogène dans les petits ferries, les bateaux de pêche, les navires à passagers et les remorqueurs pourrait être intéressante. Ces types de navires sont utilisés de telle sorte qu'ils peuvent retourner à leur point de départ après une courte période d'exploitation et peuvent être à nouveau ravitaillés en hydrogène.

➤ **Informations** sur le projet sont disponibles auprès du Dr Stefan Oberholzer (stefan.oberholzer[at]bfe.admin.ch), responsable du programme de recherche sur l'hydrogène de l'OFEN.

➤ D'autres **articles spécialisés** sur les projets de recherche, les projets pilotes, les projets de démonstration et les projets phares dans le domaine de l'hydrogène peuvent être consultés à l'adresse suivante : www.bfe.admin.ch/ec-hydrogene.



Des ingénieurs de la fondation R4W et de Swiss Hydrogen SA avec l'équipement de production d'hydrogène. Photo: Swiss Hydrogen

PROJETS PILOTES ET DE DÉMONSTRATION DE L'OFEN

La recherche sur le système de stockage de l'énergie à base de H₂ du catamaran solaire R4W a été soutenue par le programme pilote et de démonstration de l'Office fédéral de l'énergie (OFEN). L'OFEN encourage ainsi le développement et l'expérimentation de technologies, de solutions et d'approches innovantes qui contribuent de manière significative à l'efficacité énergétique ou à l'utilisation des énergies renouvelables. Les demandes de subvention peuvent être introduites à tout moment.

➤ www.bfe.admin.ch/pilotdemonstration