L’essor de la technologie hydrogène, une opportunité pour l’utilisation de composites

14 janvier 2022, 01:00

Linde De Vriese

L'hydrogène joue un rôle important dans la transition mondiale vers une économie à faible émission de carbone. Cela signifie par la même occasion un potentiel intéressant pour les matériaux composites. Par exemple, l'utilisation de l'hydrogène dans la mobilité pourrait créer un marché de millions de réservoirs de stockage en matériaux composites (renforcés en fibres de carbone). Voici un état de l'art axé sur les possibilités et les défis des matériaux composites pour l'hydrogène dans les applications de mobilité.

L’hydrogène peut servir de carburant direct ou s’intégrer à une pile à combustible pour produire de l’électricité en ne rejetant que de l’eau et de la chaleur.

Les réservoirs en composites renforcés de fibres de carbone offrent depuis des années un moyen léger de stockage d’hydrogène sous pression. Les véhicules zéro émission alimentés par des piles à combustible disposent de réservoirs de type IV pourvus d’une enveloppe intérieure en thermoplastique recouverte de fibres de carbone et de résine époxydique. Si l’hydrogène représente depuis longtemps une source très prometteuse et durable d’énergie propre, les progrès en la matière ont été très lents jusqu’il y a peu. En dépit de leurs très grandes perspectives de croissance à l’heure actuelle, les réservoirs de type IV doivent surmonter d’énormes obstacles. Le coût des fibres de carbone fait grimper leur prix en flèche. Deuxième problème : la densité de stockage. Bien que l’hydrogène sous pression libère trois plus d’énergie par kilogramme que l’essence, il présente une densité énergétique volumique très faible. Il faut donc des cylindres volumineux pour contenir la haute pression nécessaire au stockage d’une quantité suffisante de carburant. Pour les applications mobiles, les réservoirs de type IV en CFRP ont une longueur d’avance sur les alternatives en métal en raison de leur légèreté. Le poids n’est en revanche pas un facteur déterminant en matière d’applications fixes, parmi lesquelles les stations de ravitaillement en hydrogène.

Ce gaz présente une densité plus élevée sous forme de liquide cryogénique, conservé à une température de -253°C. Les cryoréservoirs se composent traditionnellement de métal ; ceux contenant une grande quantité de matériaux composites doivent encore prouver des performances et une durée de vie en fatigue égales aux premiers, comme l’ont déjà fait les réservoirs de type IV à gaz comprimés.

Nous dressons pour vous l’état de la situation actuelle des technologies, de la direction qu’elles empruntent et du rôle que les matériaux composites joueront à cet égard.

De l’hydrogène pour les transports lourds

Le fabricant de moteurs américain Cummins travaille avec le constructeur de camions Navistar à la mise au point d'un camion capable de tracter les charges les plus lourdes et alimenté par une pile à combustible. Celui-ci sera exploité pendant un an à titre d'essai chez Werner Enterprises, société de logistique et de transport américaine. Cummins a en outre commencé à tester un moteur à combustion interne alimenté par hydrogène (le H2 brûle en effet instantanément) qui sera évalué dans différentes applications, sur et hors autoroute. À la fin de cette décennie, une telle offre se rapprochera du coût total de possession (CTP) d'un moteur diesel. Compte tenu de la tendance vers l'objectif « zéro émission », nous prévoyons que les poids lourds rouleront à l'hydrogène, aux piles à combustible ou aux batteries électriques. Fini le diesel !

La législation européenne exige que les FEO de camions atteignent une réduction moyenne de 30 % des rejets de CO2 pour leur parc de production d'ici 2030 par rapport à 2019. Autrement dit, une partie de la production de camions en Europe devra fonctionner à l'hydrogène, probablement quelque 5 %, ce qui correspond à 15.000-20.000 unités/an. Nous commencerons peut-être avec 2.000/an en 2026-2027 avant d'augmenter ce nombre progressivement. À raison de 5-7 réservoirs de type IV par véhicule, les poids lourds en auront besoin de 100.000 au cours d'une décennie, soit 6.000 tonnes de fibres de carbone.

Le secteur des transports lourds passe à la vitesse supérieure. Le H2 s'avère en effet plus pratique que les batteries pour les véhicules plus grands, car leurs dimensions plus importantes, leur poids et leur temps de recharge nécessaire à la satisfaction des exigences en matière de charge utile et de rayon d'action en font une solution peu rentable. Les producteurs de réservoirs comme Hexagon Purus s'attendent à une envolée des ventes de réservoirs de type IV, qui proviendra en majeure partie (env. 30 %) des poids lourds.

Une demande en VPC et en fibres de carbone

La société française Plastic Omnium a calculé que les réservoirs de type IV à 700 bars nécessitaient 10 kg de fibres de carbone par kilogramme de dihydrogène stocké. En considérant que les véhicules à pile à combustible (VPC) transportent au minimum 5-6 kg de H2, il faudrait ainsi produire quelque 250.000 tonnes de fibres de carbone pour les réservoirs de stockage de dihydrogène afin de pouvoir mettre en circulation les 5 millions de VPC prévus d'ici 2030. D'autres secteurs, comme l'offshore et l'aérospatial, utilisent également ce matériau. Le rapport « Hydrogen Insights » 2021 du Conseil de l'hydrogène estime le nombre de VPC prévus pour 2030 à environ 4,5 millions. Les 5 à 6 kg de H2 mentionnés précédemment s'appliquent en revanche aux voitures particulières. Les poids lourds peuvent aisément transporter chacun 35 kg de dihydrogène et représenteraient 25 % de la production annuelle de VPC.

Disposer d'un stock suffisant de fibres de carbone compte donc parmi les préoccupations majeures, car les fabricants de réservoirs de type IV ont vu leur chiffre d'affaires décupler ces dernières années. Selon eux, cette tendance persistera à l'avenir. Le secteur a besoin de fibres de carbone dans une certaine fourchette de prix et possédant une qualité et des caractéristiques spécifiques : la plupart des réservoirs de type IV se composent de fibres Toray T700 avec une résistance à la traction de 4.900 MPa, un module d'élasticité de 230 MPa ou similaire. Une fibre moins forte requiert un nombre plus important d'enroulements, ce qui alourdit le réservoir et n'est donc pas acceptable. Des fabricants comme le japonais Toray et le coréen Hyosung seraient dans tous les cas prêts à répondre à une croissance de la demande après 2023.

Véhicules légers de transport de marchandises et de passagers

Les nouveaux venus sur le marché des réservoirs de type IV Faurecia et Plastic Omnium, deux fournisseurs automobiles français de première catégorie, prévoient une production de 2 millions de véhicules alimentés à l'hydrogène par an d'ici 2030, parmi lesquels 1,5 million de poids légers et de voitures particulières. L'Asie devrait dominer les ventes de véhicules à pile à hydrogène. Les ambitions sont au rendez-vous sur ce continent et ce n'est sans doute pas un hasard si on y trouve une grande partie de la production de fibres de carbone. En Chine, la préférence se porterait plutôt vers les réservoirs de types I et III, alors que ceux de type IV étaient jusqu'à récemment interdits. Les réservoirs de type III sont destinés aux applications nécessitant 350 bar et ceux dotés d'une pression de 700 bars se trouvent dans la dernière phase de validation du test.

Train et bus

L'hydrogène a le vent en poupe dans le domaine des transports ferroviaires. Un train Coradia iLint alimenté par une pile à hydrogène a été mis en service cette année en Allemagne, dont 14 unités circulant en Basse-Saxe. 27 unités seront utilisées en 2022 dans la région Rhin-Main. Ce moyen de locomotion fait actuellement l'objet d'un test en Autriche et aux Pays-Bas. Avec une distance de 1.000 km et une vitesse de pointe de 140 km/h, l'iLint égale les trains régionaux en termes de performances. Les unités à 2 wagons fonctionnent avec 24 réservoirs de type IV, lesquels sont fixés sur les toits, aux côtés des piles à combustible. Le train dispose de réservoirs à 350 bars de 2,2 m de longueur et de 0,5 m de diamètre. Autres développements actuels en Europe : les trains à hydrogène Mireo Plus de Siemens avec deux et trois wagons qui seront testés en 2023 et 2024 sur différentes lignes régionales en Allemagne, le train Vittal One de l'espagnol Talgo, lequel sera testé en 2023, et le premier train FLIRT, qui sera fabriqué et testé en Suisse avant une mise en service en Californie en 2024.

Les développements et les essais se multiplient également en Asie. Citons notamment le cas d'un train à 2 wagons au Japon qui atteint un rayon d'action de 140 km avec une vitesse de pointe de 110 km/h et une capacité de stockage d'hydrogène de cinq réservoirs à 700 bars dans chacun des quatre compartiments dédiés, pour un total de 40 kg de H2. Autre exemple : les trams alimentés par pile à combustible en Chine destinés aux transports urbains de courte distance, avec six réservoirs à 350 bars qui renferment 4 kg d'hydrogène comprimé, pour un rayon d'action de 125 km et une vitesse de pointe de 70 km/h.

Sur le marché des trains de marchandises, l'entreprise américaine Sierra Northern Railway remplacera sa locomotive diesel par une alternative alimentée par pile à hydrogène avec 225 kg de H2. La société canadienne Pacific fait également rétrofiter une locomotive de fret diesel-électrique. Le « rétrofit » des locomotives avec une durée de vie de plus de 50 ans représente une alternative faisable et rentable pour les « hydrails » (trains à hydrogène).

Les transports ferroviaires alimentés par hydrogène, aussi bien pour des passagers que des marchandises, offrent l'avantage considérable de ne pas nécessiter d'adaptations des chemins de fer existants, contrairement aux trains électriques pour lesquels il faut installer des lignes électriques, ce qui représente un investissement conséquent.

À l'instar de l'infrastructure des trains, celle des bus joue un rôle essentiel dans l'adoption de l'hydrogène : ceux-ci rentrent tous les jours au même garage, où il serait possible d'installer des stations de ravitaillement. Le système de transport régional de Cologne RVK possède ainsi le parc d'autobus alimentés par pile à combustible le plus fourni au monde : 37 bus circulent tous les jours et 15 autres les rejoindront d'ici la fin de l'année, et ce avec seulement deux stations de ravitaillement.

Transports maritimes

Outre les transports terrestres, la voie maritime constitue une solution viable et la demande dans ce secteur croît rapidement. Les systèmes de stockage à intégrer aux navires sont en cours de développement, du tuyau de combustible au stockage et du stockage à la pile à combustible. Les composites représenteraient la solution de stockage idéale pour les applications en milieu marin par les conditions rudes et la corrosion qu'il implique.

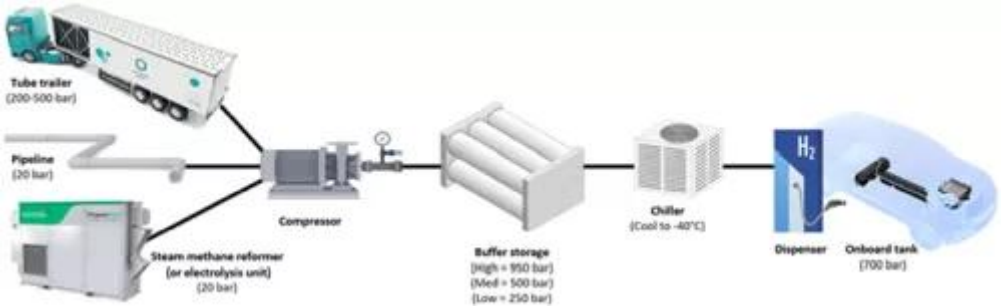
Quoiqu'il en soit, l'industrie maritime pourrait subir de grands changements à court terme, avec un nombre croissant de projets à venir d'ici 2030. Ceci s'inscrit dans le cadre des objectifs fixés en priorité par l'Organisation maritime internationale, qui stipulent que les navires nouveaux et existants puissent réduire leurs émissions de CO2 de 40 % d'ici 2030 et de 70 % d'ici 2050 par rapport à l'année de référence 2008. Il existe en outre des initiatives et des réglementations locales pour mieux gérer la transition vers les solutions alternatives.

Stockage et infrastructure

Stations de ravitaillement dihydrogène

Si on souhaite mettre concrètement en circulation des véhicules de transport de personnes et de marchandises alimentés par hydrogène, il faut construire un grand nombre de stations de ravitaillement. 107 ont été mises en service en 2020, le chiffre le plus élevé jamais atteint sur une année. À l'heure actuelle, on en compte plus de 500 opérationnelles dans le monde entier, et 225 supplémentaires sont en cours de fabrication. D'ici 2030, nous aurons besoin de quelque 10.300 stations pour atteindre les objectifs en matière de véhicules à pile à combustible.

Les réservoirs en polymères renforcés de fibres de carbone s'utilisent dans les stations d'hydrogène, notamment à La Haye et à Cologne. Ce gaz y est livré par semi-remorque à tubes, réservoir à liquide ou pipeline ou peut être généré sur site grâce à une unité de reformage du méthane à la vapeur (RMV) ou d'électrolyse. Les réservoirs de type IV en polymères renforcés de fibres de carbone (PRFC) peuvent s'employer pour les semi-remorques à tubes pour la livraison de l'hydrogène et le stockage tampon sur site. Une station pourrait produire environ 1 250 kg de H2 par jour à partir de gaz naturel à l'aide d'une unité RMV afin de recharger les véhicules à pile à combustible équipés de réservoirs à 350 et 700 bars. De telles unités de SRH doivent rester dans les limites de l'empreinte carbone des stations de ravitaillement déjà existantes pour le gazole et l'essence.



(Cliquez pour agrandir)
Aperçu schématique des différentes parties d'une station de ravitaillement dihydrogène Les cuves sous pression en composites de type IV peuvent s'utiliser dans les semi-remorques à tubes pour livrer du dihydrogène et/ou dans les réservoirs à pile pour le stockage tampon sur site.

(Source : CompositeWorld)

En ce qui concerne le coût des matériaux, le réservoir en acier revient bien moins cher que celui en composites. Il existe pourtant plusieurs applications pour lesquelles ce dernier représente une option judicieuse. À titre d'exemple, en Europe, il est arrivé que les réservoirs soient placés au-dessus du toit de la station d'hydrogène pour réduire l'empreinte carbone totale. Une prouesse permise par la masse très légère des réservoirs de type IV. Malgré un coût plus faible, ceux en métal doivent nécessairement s'installer au sol et ne peuvent s'empiler que jusqu'à une certaine hauteur en raison de leur poids. Leurs homologues en composites peuvent au contraire s'élever un peu plus, ce qui permet de gagner de la place.

Si les cylindres en composites ont un diamètre plus important ou si leur pression augmente, leur paroi s'épaissira également. C'est aussi le cas pour chaque cuve sous pression, mais rien n'empêche la technologie des composites d'utiliser des réservoirs à 700 bars d'un diamètre plus grand. Plus la pression augmente, plus les composites paraissent être une solution séduisante, mais plus le système coûte cher dans sa globalité, quel que soit le matériau, en raison d'une plus grande épaisseur requise pour les parois. On peut ici garantir une durée de vie d'au moins 15 ans et jusqu'à 10 cycles de moulage par jour, de même que les tests de fatigue prouvent la capacité des réservoirs à répondre au nombre de cycles nécessaires pour les stations de ravitaillement en dihydrogène, indépendamment de la taille du réservoir ou de la pression.

Des fibres de verre pour la distribution du H2

La distribution ou le transport de l'hydrogène (par semi-remorques), du lieu de production à la station de ravitaillement ou au site industriel, constitue un autre marché important pour les cylindres en composites. Les fabricants s'attendent à ce que la hausse du nombre de véhicules alimentés par hydrogène exige plus de stations de ravitaillement et que celles-ci dépendent du transport du carburant. De nouvelles solutions seront également proposées durant les deux prochaines années pour le secteur de la conception des cuves et des conteneurs.

Le transport du H2 dispense de l'utilisation de fibres de carbone : on produit des cylindres de type 4 qui renferment une enveloppe intérieure en thermoplastique conformément à la norme industrielle T4, laquelle est recouverte d'un mélange de fibres de verre et d'époxyde. Ils sont déjà exploitables pour les modules à 200-350 bar et le seront également en 2022 pour les réservoirs à 450-500 bars. Les réservoirs en polymères renforcés de fibres de verre (PRFV) impliquent le même niveau d'investissement que ceux en acier, mais présentent un poids 70 % plus léger.



Réservoirs de type IV en fibres de verre
(Source : Composites avancés UMOE)

Moins de frais, une plus grande capacité de stockage

L’un des obstacles des réservoirs de type IV réside dans leur densité de stockage, c’est-à-dire la quantité de H2 qui peut être stockée dans un volume donné. Le principal critère d’évaluation en la matière repose sur la gravimétrie, le rapport de poids ou le rapport de masse, que l’on définit comme la masse de l’hydrogène stocké divisée par la masse du réservoir ou du système de stockage. Selon un rapport sur les systèmes de stockage pour le dihydrogène de 2019, la densité gravimétrique pour les réservoirs de types I, II et III était respectivement de 1,7 %, 2,1 % et 4,2 %, ce qui renvoie également à la notion de densité ou d’efficacité de stockage. Toyota avait fixé la valeur de référence des réservoirs de type IV à 5,7 % en 2014 pour ses réservoirs de 700 bars grâce à une réduction de 20 % de l’utilisation des PRFC obtenue en optimisant les systèmes d’enroulement des fibres.

Il existe désormais également des réservoirs de type IV à 700 bars avec une densité de stockage de plus de 6 % et une étude est en cours pour augmenter davantage l’efficacité de stockage. Toutefois, plus le réservoir est léger, plus la précision compte et plus la tolérance aux dommages diminue. Les coûts tiennent ici une place déterminante. Leur réduction représente donc un objectif que bon nombre de programmes cherchent à atteindre. L’équipementier automobile français Faurecia entend faire baisser le coût d’un système de stockage de l’hydrogène de 75 % d’ici 2030, soit de 1.300 à 315 euros par kilogramme de gaz stocké. Plastic Omnium table sur une diminution de 30 %. La plus grande part du coût d’un réservoir provient de la proportion de fibres de carbone (soit 60 %). L’utilisation de volumes plus importants ne devrait pas faire beaucoup baisser le prix de ce matériau.

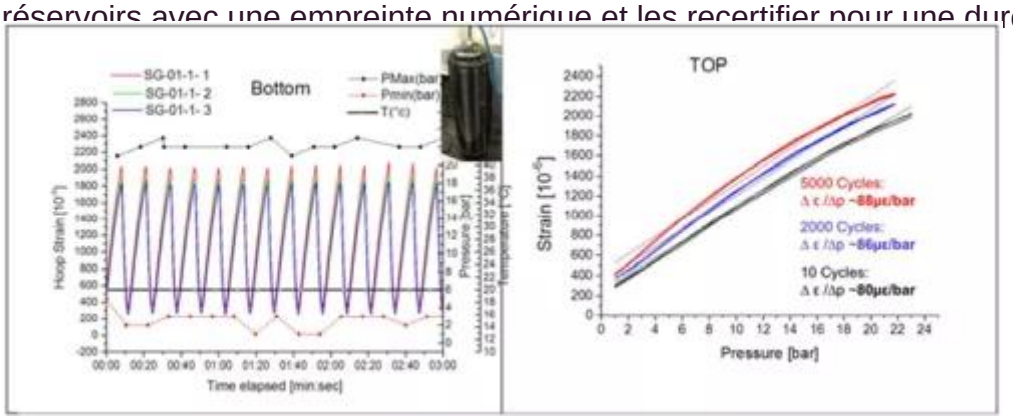
Recertification et surveillance des réservoirs

La réduction des coûts peut aussi passer par la surveillance. Hexagon propose une unité de surveillance pour inspecter les réservoirs par émissions acoustiques modales à la fin de leur durée de vie légale, et ce en analysant leur intégrité pour leur accorder du temps de fonctionnement supplémentaire et rallonger leur durée de vie. Il en résulte une réduction des frais et des émissions. L’outil utilise des éléments électroniques et des capteurs perfectionnés, mis au point pour une meilleure sensibilité et des données plus précises. Cette méthode permet ainsi de confirmer l’absence de détérioration au niveau du réservoir.

Les données revêtent une importance capitale dans l’industrie : les cuves de type IV ne font désormais l’objet d’une inspection qu’à partir de leur dixième année de service. Il reste donc légitime de s’interroger sur ce qu’il advient entre-temps de leur intégrité et sur les données qui viennent étayer cette observation. C’est pourquoi un programme européen est en cours d’exécution pour créer ces données : un grand nombre de réservoirs avaient à cette fin été équipés de différents capteurs pour déterminer l’impact de la durée de vie sur l’intégrité du réservoir en termes de température, de cycle de pression, de carburant agressif, de bonne et de mauvaise utilisation. Nous souhaitons ainsi recueillir plus de connaissances avant d’insérer les capteurs dans les matériaux composites. Nous savons de cette façon ce qu’il faut mesurer et ce qu’il faut comparer pour déterminer l’état d’une cuve sous pression.

Le spécialiste belge de la mise en œuvre des technologies de capteurs à fibres optiques Com&Sens montre comment mettre en marche des capteurs à fibres optiques FBG (réseau de Bragg sur fibre) embarqués pour optimiser la production des réservoirs en composites et pour la surveillance santé in situ. Le capteur à fibres optiques peut, en association avec le renforcement des fibres, s’intégrer au réservoir d’hydrogène par un procédé d’enroulement. Chaque fibre optique

peut mesurer 1-110 m de long et posséder jusqu'à 20 points de détection, espacés les uns des autres d'au moins 1 cm. Chaque point de détection se positionne à l'intérieur de la fibre optique de sorte de pouvoir mesurer chaque emplacement discret au sein des couches de forme circulaire ou hélicoïdale du laminé composite. La fibre optique insérée dans ce matériau détecte la redistribution de la tension au sein de ce dernier et permet de comprendre et de numériser les paramètres qui n'ont pas pu être mesurés auparavant, pour optimiser le procédé de production. En mesurant la pression, la tension et la température pendant le durcissement, les cycles de fatigue et les épreuves de rupture, et ce sur l'ensemble du système, les concepteurs pourront valider les modèles EF et, par exemple, optimiser l'utilisation des matériaux pour les projets futurs. L'application la plus prometteuse concerne la surveillance des cycles de vie et de l'intégrité structurelle pendant le fonctionnement du réservoir, ce qui contribuera à augmenter l'acceptation des technologies hydrogène et la confiance qu'on leur accorde. On pourra ainsi produire des réservoirs avec une empreinte numérique et les recertifier pour une durée d'utilisation rallongée.



(*Cliquez pour agrandir)*
Capteurs à fibres optiques pour une production, une surveillance et une conception optimisées des réservoirs
(Source : Com&Sens)

Un changement rapide en préparation

Le rapport 2021 du Conseil de l'hydrogène indique que 75 pays ont mis au point des stratégies zéro émission et que plus de 20 pays prévoient l'interdiction de la vente de véhicules à moteur à combustion pour 2035. L'hydrogène, les batteries électriques, l'énergie solaire et d'autres carburants alternatifs doivent alors faire partie des solutions requises pour atteindre ces objectifs. On observe toutefois un intérêt croissant et une aide publique de plus en plus importante pour l'hydrogène. Il faut parvenir à la neutralité énergétique d'ici 2050 si on veut empêcher une catastrophe climatique. Bon nombre de pays fournissent cependant des efforts afin d'atteindre ces objectifs pour 2040 voire avant. La situation implique de repenser l'architecture des véhicules, mais aussi le modèle d'entreprise des opérations, ce qui va de pair avec une prise de risques et de nombreux investissements.

Sources

- https://www.compositesworld.com/articles/the-potential-for-hydrogen-to-fuel-composites-growth-part-1
- https://www.compositesworld.com/articles/hydrogen-is-poised-to-fuel-composites-growth-part-2

Auteurs



Linde De Vriese