

HYDROGÈNE

LE NOUVEL ÉLÉMENT ESSENTIEL DU BÂTIMENT DÉCARBONÉ

TEXTE : PASCAL POGGI
PHOTOS : BALLARD
POWER SYSTEMS, BDR
THERMEA, HDF, LHYFE,
MCPHY, PASCAL POGGI/
AQC, SYMBIO, TOTAL

Les annonces de production d'hydrogène vert se multiplient, tout comme les projets de mobilité utilisant l'hydrogène comme carburant. Poussés par des financements publics et privés, les projets d'utilisation stationnaire de l'hydrogène dans les bâtiments profitent de ces développements et devraient croître rapidement.

Photo © HDF

Hydrogène de France développe une solution de centrale électrique utilisant exclusivement des énergies renouvelables, avec production d'hydrogène sur site par électrolyse et stockage d'hydrogène.

On ne parle plus que d'hydrogène. Le 8 septembre 2020, le plan France Relance apportait 2 milliards d'euros au développement de l'hydrogène. Le lendemain, les ministres Barbara Pompili et Bruno Le Maire présentaient la stratégie nationale pour le développement de l'hydrogène décarboné en France devant l'Association française pour l'hydrogène et les piles à combustible (Afhyprac) (1), ajoutant 5 milliards d'euros. Présentée en juillet 2020 et confirmée en décembre, la Stratégie européenne pour l'hydrogène déroule un plan jusqu'en 2030 pour :

- d'ici 2024, installer 6 GW d'électrolyseurs et atteindre une production annuelle de 1 Mt d'hydrogène décarboné (la production actuelle mondiale d'hydrogène non décarboné atteint environ 58 Mt/an) ;
- entre 2025 et 2030, passer à 40 GW de puissance d'électrolyseurs et atteindre une production d'au moins 10 Mt/an d'hydrogène ;
- à partir de 2030, déployer massivement une infrastructure de production/distribution d'hydrogène au bénéfice des secteurs économiques à décarboner.

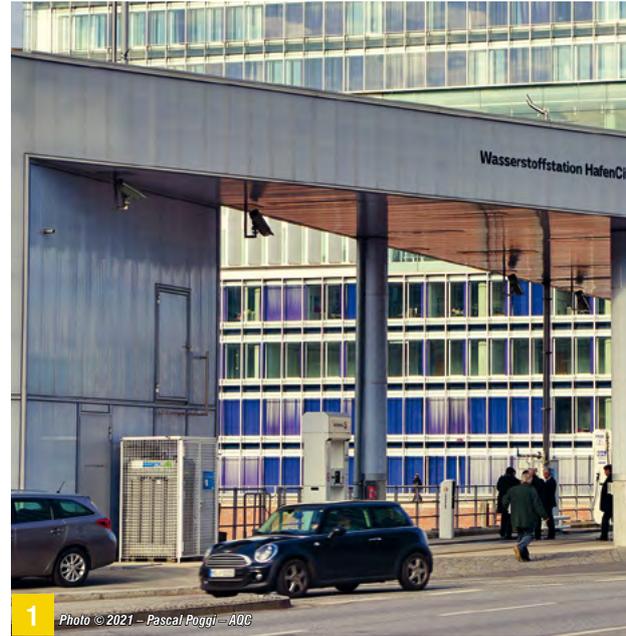
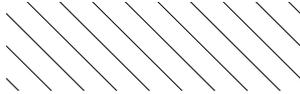
Pour aider au déploiement de cette stratégie, la Commission européenne a suscité la création de la «European Clean Hydrogen Alliance», qui a établi un plan d'investissement de 430 milliards d'euros à mettre en œuvre d'ici 2030. Elle est chargée d'encourager l'investissement privé à l'aide de fonds publics européens. L'alliance compte déjà plus de 800 membres industriels, dont quelques Français (Air Liquide, BDR Thermea, EDF, Hydrogène de France, Michelin, Mitsubishi France SAS, Total...). Bref, l'enthousiasme semble à son comble, les idées ne manquent pas, les ressources financières pour les développer non plus.

L'hydrogène vert est en effet le couteau suisse de la transition énergétique vers une économie décarbonée. L'un de ses atouts est son caractère inépuisable



1 L'essentiel des efforts en faveur du développement de l'hydrogène en Europe porte sur la mobilité. L'hydrogène, associé à des piles à combustible embarquées, produisant de l'électricité, est vu comme une solution alternative aux véhicules tout électriques avec batteries.

2 Outre les piles à combustible, l'un des éléments clef du développement de l'hydrogène est l'électrolyseur. Plusieurs projets industriels en France, soutenus par le plan France Relance, visent à développer une fabrication d'électrolyseurs de diverses puissances.



1 Photo © 2021 - Pascal Poggi - AOC

(1) L'Afhyprac, rebaptisée France Hydrogène fin 2020, rassemble près de 250 acteurs de la filière hydrogène en France.

Voir www.afhyprac.org.

(2) Fuel cells and hydrogen joint undertaking (FCH JU).

car il est le principal composant de l'univers. Il peut être directement utilisé comme carburant pour véhicules, remplacer la traction diesel dans les trains, participer à l'équilibrage du réseau électrique face à l'instabilité induite par le rapide développement des sources renouvelables de production d'électricité, se substituer au gaz naturel en utilisant l'infrastructure de réseau existante, assurer le chauffage des locaux et la production d'une partie de leurs besoins en électricité, devenir l'énergie principale de la production de chaleur haute température dans l'industrie...

Selon une étude réalisée par un partenariat public-privé européen (2), l'emploi massif de l'hydrogène permettra, de manière relativement simple du point



MASSHYLIA, LE PLUS GRAND SITE DE PRODUCTION D'HYDROGÈNE RENOUVELABLE DE FRANCE

Photo © Total

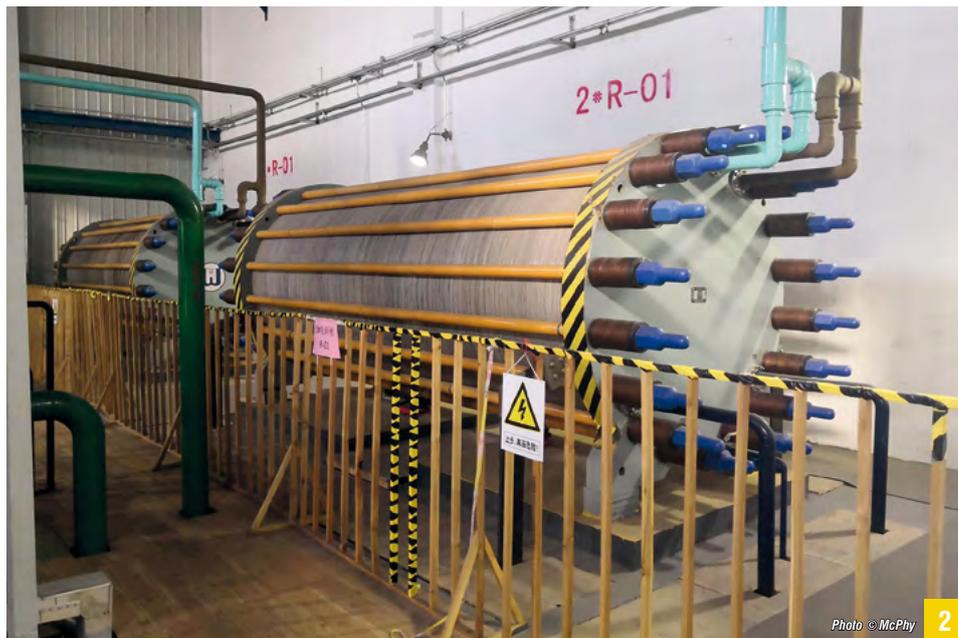


Photo © McPhy

2

de vue technique, de réduire de 80 % la charge carbone de l'économie européenne. À une condition toutefois : l'hydrogène doit être vert ou encore décarboné, c'est-à-dire produit de manière renouvelable et non polluante.

Produire de l'hydrogène vert

Selon la Banque des Territoires, la production d'hydrogène décarboné par électrolyse revient aujourd'hui entre 4 à 9 €/kg, contre 1 à 2 €/kg pour la méthode classique qui extrait l'hydrogène de divers hydrocarbures. En l'absence d'un signal fort de taxe du CO₂ qui permettrait de rendre la production d'hydrogène décarbonée compétitive par rapport à

une production émettrice de gaz à effets de serre, un soutien public est nécessaire pour le déploiement de l'hydrogène renouvelable et bas carbone.

Le plan français en faveur du développement de l'hydrogène décarboné, avec son financement de 7 milliards d'euros, vise plusieurs objectifs :

- décarboner l'industrie en faisant émerger une filière de l'électrolyse, la technologie retenue pour massifier la production d'hydrogène en France. «*Le marché de la production d'hydrogène décarboné par électrolyse doit évoluer vers des projets de plus grande taille et de plus importante capacité. La France se fixe ainsi un objectif de 6,5 GW d'électrolyseurs installés en 2030*», indique le plan français;



Total et Engie ont signé un accord de coopération pour concevoir, développer, construire et exploiter le projet Masshylia, le plus grand site de production d'hydrogène renouvelable de France à Châteauneuf-les-Martigues (13), au bord de l'Étang de Berre.

Situé au cœur de la bioraffinerie de Total et alimenté par des fermes solaires d'une capacité globale de plus de 100 MW, l'électrolyseur de 40 MW produira 5 tonnes d'hydrogène vert par jour dans un premier temps pour répondre aux besoins du processus de production de biocarburants de la bioraffinerie, évitant 15 000 tonnes d'émissions de CO₂ par an. La capacité de production de l'électrolyseur sera de 15 t/jour, ouvrant la possibilité d'autres

utilisations par la suite si de nouvelles fermes photovoltaïques sont développées par les partenaires du projet.

Le projet intègre ainsi la mise en œuvre de 5 innovations qui préfigurent les solutions de décarbonation de l'industrie, sans aucun précédent en Europe :

- un système de pilotage digital de la fourniture d'hydrogène en continu avec une gestion en temps réel de la production d'électricité solaire ;
- l'optimisation de l'intégration de plusieurs fermes photovoltaïques alimentant l'électrolyseur pour minimiser les pertes d'énergie et limiter les congestions du réseau ;
- un stockage d'hydrogène de grande ampleur pour équilibrer production

d'électricité intermittente et consommation d'hydrogène continue ;

- une connexion directe en courant continu entre une ferme photovoltaïque et l'électrolyseur pour améliorer le bilan énergétique ;
- une sécurité industrielle renforcée grâce à l'utilisation de modèles numériques 3D pour chaque composant de l'installation.

Le calendrier prévoit un début de construction des installations en 2022 en vue d'une production en 2024, sous réserve de la mise en place des soutiens financiers et autorisations publiques nécessaires. Le projet a déjà déposé des demandes de subventions auprès des autorités françaises et européennes. ■

- développer une offre de mobilité lourde à l'hydrogène, ce qui suppose de susciter en même temps une offre de distribution d'hydrogène, l'apparition de stations-services proposant de l'hydrogène à la pompe, etc. ;
- poursuivre l'effort de R&D dans le domaine de l'hydrogène et rester à la pointe au niveau international, la France possédant une recherche de premier plan dans ce domaine, et soutenir l'innovation en faveur de l'industrialisation de nouvelles technologies.

L'objectif du plan français, outre la décarbonation de l'économie, est de créer entre 50 000 et 150 000 emplois directs et indirects en France grâce au développement de la filière hydrogène. Le Gouvernement veut engager au moins la moitié des 7 milliards d'euros prévus par le plan hydrogène d'ici 2023.

Annoncée en octobre 2020, une usine de production d'électrolyseurs du franco-belge John Cockerill Energy devrait voir le jour en Alsace sur le site d'Aspach-Michelbach (68). Initialement, 20 M€ sont consacrés à la transformation du site existant pour lancer fin 2021 la production d'électrolyseurs de 5 MW. L'objectif est de démarrer avec une capacité annuelle de 100 MW, puis d'augmenter en fonction de la demande. L'investissement total pourrait atteindre 100 M€. L'énergie déployée dans tous ces électrolyseurs sera naturellement de l'électricité d'origine renouvelable ou décarbonée, ce qui ouvre la possibilité d'utiliser l'électricité nucléaire pour la production d'hydrogène, lorsque la demande de courant électrique est faible au plan national.

Air Liquide, l'un des tous premiers producteurs mondiaux d'hydrogène, réoriente son outil industriel vers la production d'hydrogène décarboné. Mi-janvier 2021, Air Liquide a pris une participation de 40 % dans le capital de la société française H2V Normandy, filiale de H2V Product. Le but est de construire une usine de production d'hydrogène par électrolyse d'une puissance de 200 MW. Ce projet devrait voir le jour dans la zone industrielle de Port-Jérôme (76) en Normandie.

Le groupe Engie mobilise de nombreuses entités pour produire, distribuer et utiliser de l'hydrogène vert. Engie et Air Liquide sont d'ailleurs associés, aux côtés de l'Agglomération Durance-Luberon-Verdon (DLVA) pour développer le projet HyGreen Provence qui produira chaque année 1 300 GWh d'électricité photovoltaïque, dont une partie sera consacrée à la production d'hydrogène par électrolyse à échelle industrielle. À terme, ce projet vise la production de plusieurs dizaines de milliers de tonnes d'hydrogène vert par an.

De son côté, la start-up Lhyfe (3) fondée en 2017 envisage de multiplier les installations de production d'hydrogène vert. L'entreprise a développé une solution d'électrolyse modulaire qui se connecte directement aux ressources en énergies renouvelables locales (éolien, photovoltaïque, hydraulique, biomasse solide, biogaz, géothermie profonde...) capables de produire de l'électricité décarbonée. Un module Lhyfe produit plusieurs centaines de kilogrammes d'hydrogène par jour, livrés à des stations-services, à des dépôts locaux. La production est plutôt orientée vers des usages industriels ou liés à la mobilité. L'entreprise a signé un accord avec le norvégien Nel, spécialiste



3 Photo © Lhyfe



4 Photo © Symbio

des électrolyseurs, pour construire 20 unités de production d'hydrogène vert en Europe. La première unité pilote, alimentée par le parc éolien de Bouin, devrait être opérationnelle mi-2021 et produire 400 kg/jour d'hydrogène vert. Le site de Bouin, géré par EDF Énergies nouvelles et par Vendée Énergies, comporte 8 éoliennes de 62 m de hauteur à l'axe du rotor, pour une puissance totale de 19,5 MW et une production annuelle de 40 millions de kWh.

En Moselle, le projet EMIL'HY, initié en octobre 2020 et conduit par Storengy, filiale d'Engie, va convertir d'ici 2023 le site d'une centrale électrique à charbon près de Saint-Avold en site de production d'hydrogène par électrolyse d'une capacité de 5 MW. L'hydrogène produit servira notamment à alimenter les 15 bus de

(3) <https://lhyfe.com>



Photo © HDF

5

la Communauté d'agglomération. À partir de 2025, la capacité d'électrolyse sera portée entre 50 et 100 MW. L'hydrogène pourrait alimenter les besoins accrus en mobilité, l'industrie et, à travers une infrastructure de distribution dédiée (l'initiative MosaHyc), constituer un territoire hydrogène allant jusqu'au Luxembourg et en Allemagne.

Le développement des usages stationnaires de l'hydrogène

L'essentiel du plan français, outre la production d'hydrogène décarboné, porte sur le développement de la mobilité par l'hydrogène. Les applications stationnaires à travers des piles à combustibles ou des chaudières à hydrogène ne sont pas mentionnées. Le déroulement de la stratégie française ne peut cependant que servir le développement des applications stationnaires en réglant la question de la production, du stockage et de la distribution de l'hydrogène. Dès 2021, la France envisage de consacrer 1,5 milliard d'euros au développement d'un projet important d'intérêt européen commun pour provoquer l'émergence de projets industriels dans la filière hydrogène. En septembre 2019, l'équipementier automobile Faurecia et Michelin annonçaient la création de l'entité Symbio pour proposer une gamme complète de piles à combustible dédiées à la mobilité (voitures individuelles, camions et trains). Rien ne ressemble plus à une pile à combustible embarquée sur un train qu'une pile à combustible stationnaire produisant chaleur et électricité dans un bâtiment. L'un des inconvénients à ce jour des piles à combustibles est leur prix élevé, mais une augmentation significative de leur production devrait conduire à une baisse des prix.



3 La start-up Lhyfe développe des modules de production d'hydrogène vert, qu'elle s'approprie à installer à travers l'Europe. Ils peuvent être installés en mer ou sur terre. L'hydrogène produit est livré à des stations-services locales. La première unité pilote de production sera alimentée par le parc éolien de Bouin.

4 La production de piles à combustible se développe en France. Michelin et Faurecia ont fondé Symbio pour concevoir et fabriquer des piles à combustible destinées à la mobilité, avant tout.



5 Pour ses centrales électriques *Renewstable*, Hydrogène de France développe des piles à combustible de forte puissance de 1 MW. C'est un créneau de marché tout à fait nouveau. HDF utilise pour cela des stacks – le cœur des piles à combustible – fabriqués par Ballard Power Systems.

(4) www.hdf-energy.com/fr

En France, même si le plan hydrogène ne s'y intéresse pas encore, les usages stationnaires de l'hydrogène se développent, timidement mais sous au moins trois formes : les centrales électriques mixtes associant fermes photovoltaïques et électrolyse ; la combinaison sur un même site d'une production d'électricité renouvelable, d'électrolyse pour la production d'hydrogène, de stockage d'hydrogène, de piles à combustibles pour la production d'électricité et de chaleur ; l'installation, à titre de test, de chaudière à hydrogène.

La première forme, le développement de centrales électriques mixtes, est notamment portée par Hydrogène de France (HDF) (4), une entreprise créée en 2012. HDF veut développer le stockage d'énergie renouvelable à grande échelle grâce à l'hydrogène. Sous la marque HDF Energy, l'entreprise développe depuis 2016, le concept *Renewstable* : une centrale électrique fonctionnant exclusivement à l'aide d'ENR, 24h/24 et 7j/7, en associant photovoltaïque, batteries de stockage, électrolyse de l'eau pour la production d'hydrogène sur site, stockage de l'hydrogène et réutilisation dans des piles à combustible. Dès 2017, HDF a concrétisé une partie du concept *Renewstable* en Martinique, où Sara (Société anonyme de raffinerie des Antilles) les a sollicités pour l'installation dans une raffinerie de piles à combustible de forte puissance, afin de couvrir une partie des besoins en électricité de l'usine tout en alimentant le réseau électrique martiniquais. HDF Energy s'est rapproché du canadien Ballard Power Systems, fabricant de piles à combustible et des éléments (dits stacks) qui, associés les uns aux autres, constituent le cœur des piles à combustible. En 2017, Ballard Power Systems et HDF Energy ont étudié puis fabriqué >>>

des piles à combustible de 500 kW_e de puissance électrique unitaire. En 2018, la CRE (Commission de régulation de l'énergie) a validé le prix de vente de l'électricité produit par ces piles à combustible pour le réseau martiniquais. L'installation est en fonctionnement depuis décembre 2019 pour une durée de vie prévue de 15 ans. Du coup, les deux entreprises vont développer trois piles à combustibles de 1 MWe pour une installation en Guyane française. Cette nouvelle installation baptisée Ceog sera la première démonstration du concept *Renewstable* complet: une ferme photovoltaïque de 60 MW_c fournira de l'électricité pour une part directement au réseau et pour une autre part à un électrolyseur qui produira de l'hydrogène sur site. Un stockage de 6 tonnes d'hydrogène alimentera les piles à combustibles, soit pour augmenter la puissance de la centrale et passer les pointes de demande, soit la nuit pour fournir une puissance de base avec le secours de batteries de stockage au lithium-ion. HDF développe par ailleurs un stockage d'hydrogène de 140 MWh à Mana, dans l'ouest de la Guyane française. Il sera associé à un parc photovoltaïque de 55 MW_c, à des piles à combustible et à un stockage d'électricité en batteries de 13 MWh: ce nouveau projet *Renewstable* d'un coût évalué à 90 M€ fournira une puissance électrique de 10 MW dans la journée et de 3 MW durant la nuit.

Dans un second temps, Ballard Power Systems transférera sa technologie à HDF pour que celle-ci assemble directement des piles à combustible de 1 à 1,5 MWe de puissance, dans une nouvelle usine dont la construction est prévue dans le Bordelais. Elle devrait produire 50 MWe de piles à combustible en 2025, puis 300 MWe en 2028. Ces piles à combustible de forte puissance sont conçues pour de longues durées de fonctionnement qui conviennent parfaitement à des usages stationnaires en bâtiment ou en îlots. En attendant, en juillet 2020, HDF et Teréga, spécialiste du transport et du stockage de gaz, ont signé un accord pour produire de l'hydrogène vert par électrolyse et le stocker dans des cavités souterraines. Un projet pilote, baptisé HyGéo, devrait utiliser une cavité sous la commune de Carresse-Cassaber (64) en Nouvelle-Aquitaine. L'étude de faisabilité, subventionnée par la Région Nouvelle-Aquitaine, a commencé. L'ingénierie et les travaux devraient se dérouler en 2022, pour une mise en exploitation en 2024.

L'hydrogène pour des bâtiments autonomes en énergie

La deuxième forme de développement de l'hydrogène pour des usages stationnaires combine photovoltaïque, stockage en batteries, électrolyse, stockage d'hydrogène sur site, production d'électricité et de chaleur dans des piles à combustible. Sans le dire tout à fait, les acteurs de ce développement sont engagés dans la mise au point de solutions capables de rendre les bâtiments autonomes en énergie. En France, PowiDian, une spin-off d'Airbus, s'est lancée dans ce développement. En octobre 2020, l'entreprise a ouvert son capital à Bouygues Construction, à travers sa filiale Bouygues Énergies & Services. PowiDian a mis au point une station autonome baptisée SAGES. Elle combine production d'électricité



6 Ballard est l'un des leaders mondiaux de la production de piles à combustible et de stacks, leur composant de base.

7 Cœur d'une pile à combustible, ces plaques que l'on empile pour former des stacks (piles) et sur lesquelles se produit la réaction de transformation de l'hydrogène et de l'oxygène en chaleur, eau et courant électrique. Les spécialistes mondiaux de la conception et fabrication de ces plaques sont Ballard Power Systems et les japonais Panasonic, Toshiba et Toyota.

“La deuxième forme de développement de l'hydrogène pour des usages stationnaires combine photovoltaïque, stockage en batteries, électrolyse, stockage d'hydrogène sur site, production d'électricité et de chaleur dans des piles à combustible”

(5) www.homepowersolutions.de/en



6

Photo © Ballard Power Systems

renouvelable de diverses origines selon les sites, des batteries lithium-ion, un ou plusieurs électrolyseurs, un stockage d'hydrogène et une ou plusieurs piles à combustibles fournies par Ballard Power Systems. L'entreprise a déjà à son actif l'équipement de l'immeuble Delta Green à Saint-Herblain (44), près de Nantes. Dans ce bâtiment de bureaux de 4 608 m² (certifié Passivhaus, lauréat de la Pyramide d'Argent 2017), une station SAGES avec des panneaux PV fournit une puissance électrique utile de 7,5 kW à l'aide d'un stockage d'hydrogène de 5 kg. Delta Green est un bâtiment à énergie positive, produisant 520 MWh d'électricité par an avec une consommation tous usages de 476 MWh. La station SAGES a pour seule mission d'écarter la puissance en pointe, de manière à réduire l'abonnement souscrit auprès du distributeur d'électricité. Ce n'est donc pas un bâtiment autonome en énergie. Mais il a permis de démontrer la fiabilité de la station SAGES et laisse augurer des déploiements de puissances plus importantes, susceptibles de conduire à une autonomie énergétique. En Allemagne, le berlinois HPS (Home power solutions) (5) commercialise déjà une solution d'autonomie énergétique pour les maisons individuelles et le petit collectif. Le système *Picea* fait appel à un électrolyseur, à une pile à combustible de Ballard Power Systems, à une production photovoltaïque sur site, à des batteries de stockage d'électricité et à un stockage d'hydrogène en bonbonnes d'une capacité de 1 MWh. L'importance du stockage garantit l'autonomie énergétique d'une maison individuelle en lui permettant de fonctionner sans production d'électricité photovoltaïque pendant plusieurs jours. *Picea* contient aussi un caisson de ventilation double flux. Depuis début 2019, à Zumarhausen en Allemagne, une maison est équipée d'un système *Picea*: 16,9 kW_c de panneaux photovoltaïques, 3000 kWh de stockage d'énergie >>>

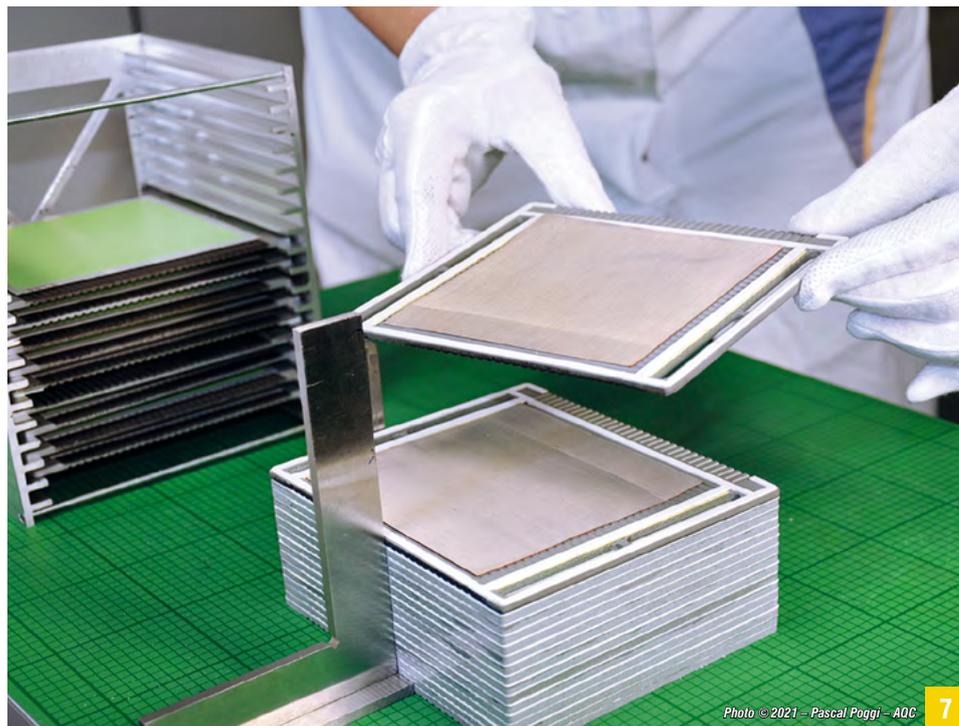


Photo © 2021 - Pascal Poggi - AOC

7

UN PROJET D'ORDONNANCE SUR L'HYDROGÈNE

En août 2020, la Commission de régulation de l'énergie a été saisie par le Gouvernement d'un projet d'ordonnance sur l'hydrogène. Le projet, mis en consultation publique le 8 janvier 2021 (1), définit différents types d'hydrogène – renouvelable, bas carbone ou fossile – et prévoit un système de traçabilité de l'hydrogène pour attester de son caractère bas carbone ou renouvelable :

- lorsque la traçabilité physique de l'hydrogène est possible et que la garantie de son caractère vertueux est vendue en même temps que l'hydrogène, le gaz pourra bénéficier d'une garantie de traçabilité pour que son caractère renouvelable ou bas carbone puisse être valorisé par le producteur et connu de l'acheteur ;
- lorsque la garantie pourra être cédée indépendamment de l'hydrogène ou que celui-ci est mélangé au cours

du transport à un autre type d'hydrogène, l'hydrogène bénéficiera d'une garantie d'origine, qui affichera le soutien effectif de l'acheteur à une filière vertueuse.

Les garanties d'origine et de traçabilité seront gérées par un organisme indépendant, sur le modèle de celui qui existe déjà pour les garanties de l'électricité renouvelable ou du biométhane. Ce système doit également pouvoir accueillir les garanties délivrées par nos voisins européens. L'ordonnance prévoit aussi la mise en place d'un mécanisme de soutien pour les filières produisant de l'hydrogène renouvelable ou bas carbone produit par électrolyse de l'eau. Il consistera en l'organisation d'appels d'offres pour ce type d'installations, les lauréats pouvant bénéficier d'un contrat octroyant une aide financière à l'investissement et le cas échéant une aide au fonctionnement.

Le projet d'ordonnance introduit plusieurs dispositions relatives à l'injection d'hydrogène dans les réseaux de gaz naturel. D'une part, en cas d'injection, les gestionnaires de ces réseaux de transport et de distribution devront mettre en œuvre les dispositions nécessaires pour assurer le bon fonctionnement et l'équilibrage des réseaux, la continuité du service d'acheminement et de livraison du gaz naturel et la sécurité des biens et des personnes. D'autre part, il est proposé la mise en place de garanties d'origine « gaz renouvelable injecté dans le réseau de gaz naturel » qui seraient, à ce stade, uniquement utilisées pour l'hydrogène renouvelable injecté dans le réseau de gaz naturel, en application de la Directive énergies renouvelables. Enfin, ce projet prévoit une modification du Code minier visant à étendre le régime légal applicable au stockage souterrain à l'hydrogène. ■

(1) www.consultations-publiques.developpement-durable.gouv.fr/projet-d-ordonnance-relative-a-l-hydrogene-prise-a-2285.html



8 Photo © BDR Thermea

▲ 8 Le groupe BDR Thermea est en pointe dans le développement de chaudières murales fonctionnant 100 % à l'hydrogène. Après en avoir installé plusieurs en Hollande, l'entreprise a fourni la première chaudière H2 installée en France à Châteauneuf dans la Loire. Ce sont des chaudières de 23 kW, utilisant un brûleur mis au point par BDR Thermea.

LES CARACTÉRISTIQUES THERMIQUES DE L'HYDROGÈNE

Le Pouvoir calorifique inférieur (PCI) de l'hydrogène (H2) est très élevé, il atteint 33,33 kWh/kg (12,78 kWh/kg pour le propane), et le Pouvoir calorifique supérieur (PCS) de l'hydrogène gazeux est de 39,41 kWh/kg (13,8 kWh/kg pour le propane).

Après l'hydrogène, le propane est d'ailleurs le combustible possédant le Pouvoir calorifique inférieur et supérieur le plus élevé. Mélangé à l'air, l'hydrogène brûle quand le mélange H2/air se situe dans sa plage d'explosibilité de 4 à 75 %, à pression et température ambiantes. La flamme de combustion de l'hydrogène dans l'air est pratiquement invisible et parvient à des températures particulièrement élevées, de l'ordre de 2045 °C (soit 2318 K contre 2148 K pour le gaz naturel) (1).

Cette température de flamme élevée aboutit à la production d'oxydes d'azote (NOx) par combinaison avec l'azote naturellement contenu dans l'air lors de la combustion du mélange H2/air. Les NOx apparaissent dès que la température de combustion atteint 1400 °C. Ils contribuent à l'effet de serre et constituent par ailleurs des polluants nocifs pour la santé humaine. Tout l'enjeu du développement de la combustion de l'hydrogène consiste donc à réduire la température de flamme pour réduire fortement ou même supprimer la production de NOx. Si la combustion de l'hydrogène est maîtrisée, elle ne produit que de la chaleur et de l'eau. ■

(1) www.afhyprac.org/documentation/tout-savoir/

seulement, une pile à combustible de 1,5 kWe et un électrolyseur de 500 NL/h (Normo-litres). Cette maison fonctionne en autarcie énergétique depuis.

Le lent développement des chaudières à hydrogène

La combustion, dernière forme de développement de l'hydrogène en utilisation stationnaire, se développe lentement. Pour l'industrie, Bosch Thermotechnologie propose plusieurs chaudières de plus de 10 MWet sent une lente augmentation de la demande. Toyota a développé un brûleur industriel supprimant la création de NOx lors de la combustion d'hydrogène. D'autres spécialistes des brûleurs industriels, comme Zantingh, proposent en Europe des brûleurs que l'on peut régler pour fonctionner avec un taux de mélange précis de gaz naturel et d'hydrogène. Côté équipements domestiques, en petit collectif et en tertiaire, le plus avancé est le groupe BDR Thermea. Il développe une chaudière murale dotée d'un brûleur hydrogène spécifique mis au point dans son centre de recherche. BDR Thermea a installé ses premières chaudières murales 100 % H2 à Rzenbourg en Hollande en juin 2019. Lors du salon virtuel ISH 2021 à Francfort, le groupe devrait présenter, sous la marque Remeha, une combinaison 100 % H2 associant une pile à combustible fournie par Panasonic, un ballon d'eau chaude et sa chaudière murale hydrogène.

En France, les premières chaudières BDR Thermea à hydrogène viennent d'être installées fin 2020 à Châteauneuf (42). Depuis 2015, la ville développe un projet d'autoconsommation d'énergie dans un parc de 24 ha qui lui appartient et abrite un bâtiment loué à plusieurs entreprises. Au début, la municipalité a installé des panneaux PV, puis un stockage d'électricité en batteries, mais qui ne répondaient pas à ses besoins de stockage d'énergie à long terme. Depuis cinq ans, la municipalité a lancé un vrai projet structuré, baptisé ILOT@GE (Intégration locale de la transition énergétique). Il s'agit d'une production d'hydrogène par électrolyse (électrolyseur de marque HIAT) et stockage sur site dans 4 racks de 16 bouteilles stockant 70,5 kg de H2 à 350 bar (soit 3400 kWh) et une cuve contenant 6 kg de H2 à 500 bar (soit 200 kWh). L'hydrogène des racks alimente une pile à combustible pour la production d'électricité. L'hydrogène de la cuve alimente une borne de charge de véhicules couvrant une gamme de pression de 30 à 1 000 bar. Il est aussi injecté dans un court réseau spécifique pour être brûlé dans une chaudière H2 de 23 kW afin de couvrir les besoins en chauffage du bâtiment. Il s'agit là de la première installation d'une chaudière H2 murale en France. Elle est montée en cascade avec une autre chaudière De Dietrich murale fonctionnant au gaz naturel et d'une puissance de 90 kW.

Voici, en janvier 2021, l'état du développement de l'hydrogène pour des usages stationnaires en France. De nouveaux projets de production d'hydrogène vert, de fabrication d'électrolyseurs, de piles à combustible, de brûleurs domestiques (chez Sermeta, par exemple) apparaissent chaque semaine. ■