



HYDROGÈNE

Une filière en phase d'industrialisation
et en quête de compétitivité pour l'avenir

HYDROGÈNE

Une filière en phase d'industrialisation et en quête de compétitivité pour l'avenir

Produit à partir d'énergies fossiles et utilisé dans le secteur chimique et pétrolier, l'hydrogène va changer de statut au cours des prochaines années. Ses caractéristiques énergétiques et ses nombreux moyens d'application en font l'un des moteurs de la transition écologique. Utile au secteur des transports, de l'énergie ou de l'industrie, ce gaz pourrait devenir le pétrole de demain. Le marché français est en mesure d'atteindre 40 milliards d'euros en 2050.

Cette évolution implique une transformation majeure de la filière. Les producteurs d'hydrogène doivent s'engager dans une nouvelle voie, celle de l'hydrogène vert, et augmenter les volumes de production afin d'amorcer l'industrialisation du secteur. Les équipementiers sont amenés à améliorer les capacités de leurs machines, tandis que les start-up arrivent en soutien en développant des débouchés novateurs.

Portés par la diversification des applications de ce gaz, de nouveaux acteurs participent également à son développement. Les spécialistes du transport se tournent vers l'hydrogène pour leurs futures flottes de camions, bus ou voitures. Le train à hydrogène devient une composante de la décarbonation du secteur ferroviaire. Parallèlement, le secteur de l'énergie voit dans l'hydrogène un moyen efficace de stocker le surplus d'électricité renouvelable, pour le réinsérer ensuite dans le réseau de gaz ou le retransformer en électricité grâce aux piles à combustible. L'ensemble de ces nouvelles applications offre ainsi au marché des perspectives d'avenir prometteuses sur le long terme.



DANS CE DOSSIER

POINTS-CLÉS ET ENJEUX	4
LE DÉFI DE L'HYDROGÈNE VERT	8
Une production à verdir	8
L'essor de l'hydrogène porté par une multitude de facteurs	10
Des initiatives industrielles de plus en plus nombreuses dans l'hydrogène vert	16
Un écosystème en pleine transformation, notamment en France	22
S'APPUYER SUR LE TRANSPORT POUR S'INDUSTRIALISER	24
Automobile, des initiatives, mais un potentiel encore restreint	24
Transports routier, urbain et ferroviaire, des opportunités à grande échelle	30
Transports maritime et aérien, des segments à développer	38
Les stations de recharge, véritable enjeu pour le transport à l'hydrogène	42
DE NOUVEAUX USAGES LIÉS AUX ÉNERGIES RENOUVELABLES	46
L'hydrogène s'immisce dans le réseau gazier grâce au power-to-gas	47
Le power-to-power : recréer de l'électricité grâce aux piles à combustible	50
Parfaire le stockage de l'hydrogène, un enjeu primordial	54
AMÉLIORER LA COMPÉTITIVITÉ DE LA FILIÈRE	57
Faire baisser les coûts de l'hydrogène vert, une étape indispensable	57
Créer des synergies entre les acteurs et sur les territoires	62
L'HYDROGÈNE S'ENGAGE SUR LE LONG TERME	68
LES FORCES EN PRÉSENCE	70
Entreprises et organismes cités dans l'étude	70
Classement des grands groupes français actifs dans la filière de l'hydrogène selon leur chiffre d'affaires	75
Classement des ETI, PME et start-up actives dans la chaîne de valeur de l'hydrogène selon leur chiffre d'affaires	76
Activités et coordonnées des ETI, PME et start-up	78
SOURCES UTILISÉES	82
LEXIQUE	89

Un gaz destiné à prendre de l'ampleur sous sa forme décarbonée

À l'heure de la transition écologique, l'hydrogène va **entrer dans une nouvelle ère**. Son fort pouvoir énergétique et l'absence d'émissions néfastes pour l'environnement lorsqu'il est brûlé représentent deux atouts majeurs. Principalement utilisé dans l'industrie chimique et pétrochimique jusqu'à aujourd'hui, l'hydrogène va ainsi pouvoir **diversifier ses domaines d'application**. Le transport le considère comme une nouvelle source d'énergie, l'électricité renouvelable peut s'en servir comme moyen de stockage. Face à cette multiplication des usages, le marché français pourrait s'envoler et **atteindre 40 milliards d'euros en 2050**.

Ces opportunités croissantes pour la filière s'accompagnent toutefois de nombreux défis. Ces projections ne s'accompliront que si les stratégies et les investissements sont **pensés sur le long terme et dans une logique verte**. Actuellement, 95 % de la production de ce gaz dépend toujours d'énergies fossiles (gaz naturel, pétrole, charbon). Or, l'avenir prometteur de l'hydrogène n'a de sens que si sa production devient décarbonée. Pour les fournisseurs d'hydrogène, cette transformation s'avère décisive. Ils doivent augmenter la part d'hydrogène vert dans leur production afin qu'elle prenne peu à peu le pas sur l'hydrogène gris. En dégageant d'importants volumes, ils se positionneront comme les moteurs de la filière et **inciteront leurs clients à avoir recours à ce gaz décarboné**. Les industriels chimiques, sidérurgistes et autres spécialistes de la raffinerie, principaux consommateurs d'hydrogène gris, ne peuvent en effet pas rester inactifs face aux thématiques environnementales. Pointés du doigt pour leur activité polluante, ils ont l'occasion

d'améliorer leur bilan carbone en se tournant vers l'hydrogène vert. Leur consommation massive encouragerait également la filière à intensifier ses efforts pour augmenter les quantités d'hydrogène décarboné disponibles, selon un cercle vertueux bénéficiant à tous.

Derrière les producteurs d'hydrogène, les équipementiers se retrouvent également en position favorable. Il est temps pour les fabricants d'électrolyseurs (équipement servant à mener à bien l'électrolyse de l'eau, technique principale de production d'hydrogène vert) de se mobiliser pleinement. Jugées matures, les technologies d'électrolyse peuvent encore être optimisées. En améliorant le rendement de leurs machines ou leurs capacités de production, les équipementiers se positionnent ainsi comme **les partenaires directs des producteurs dans l'objectif de massifier les volumes**. L'ouverture d'usines de fabrication sur le sol français constitue un autre moyen de renforcer la filière nationale tout en créant de l'emploi sur le territoire. Afin d'accélérer le développement du secteur, les start-up ont aussi un rôle à jouer. Leurs idées et leurs produits novateurs attirent les investisseurs et l'attention des grands groupes. Le **recours aux partenariats industriels devient alors une solution pertinente** pour chaque partie engagée et permet d'améliorer encore les procédés de production. D'autres collaborations sont également envisageables avec des laboratoires et des centres de recherche afin de trouver de nouveaux moyens de générer davantage d'hydrogène vert, le tout pour un coût inférieur.

Le transport, un secteur essentiel au développement de l'hydrogène

Couplé à une pile à combustible, l'hydrogène est transformé en électricité, qui peut ensuite alimenter un moteur. Cette forme d'alimentation trouve un **écho fort dans le secteur des transports**, lui aussi contraint à se transformer pour répondre aux exigences écologiques. Inquiets face à la fin programmée des véhicules thermiques, **les constructeurs et les équipementiers voient dans l'hydrogène une nouvelle piste d'avenir**. Les avantages de l'hydrogène par rapport aux modèles électriques à batterie (plus grande autonomie, temps de recharge moins long, moteur plus léger) constituent autant d'atouts en sa faveur. Néanmoins, la vigilance doit rester de mise face à un marché encore naissant. Les constructeurs ont d'abord intérêt à **se concentrer sur les segments du transport routier de marchandises et du transport urbain**. Leur demande en hydrogène apparaît comme conséquente et planifiable, ce qui aidera la filière à se structurer. Il semble donc plus opportun de se tourner vers la conception de véhicules à hydrogène pour les constructeurs de camions ou de bus en priorité. Les transporteurs routiers et les collectivités locales, leurs principaux clients, doivent rester attentifs à ces évolutions pour effectuer leur transition au moment propice. À côté de ces deux premiers segments, **le ferroviaire s'impose comme la troisième voie prioritaire** pour le développement de l'hydrogène dans le domaine des transports. Les opérateurs ferroviaires nationaux peuvent s'appuyer sur l'hydrogène afin de décarboner le réseau et d'éliminer les trains diesel. Plusieurs modèles de ce type circulent déjà en Allemagne. Les premiers essais devraient avoir lieu en France durant la première moitié de la décennie 2020. Les acteurs de l'industrie ferroviaire, qui représentent des clients

majeurs pour la filière, semblent avoir compris les enjeux de l'hydrogène. L'importante quantité de gaz dont ils auront besoin s'inscrit dans **la stratégie de massification nécessaire à la progression de la production**.

Concernant l'automobile, les perspectives existent mais restent émergentes. La filière de l'hydrogène est encore trop jeune pour que les voitures individuelles, toujours très onéreuses, y occupent une place centrale à court terme. Pour autant, les constructeurs ne doivent pas négliger ce segment car il pourrait décoller d'ici quelques années, à la suite des véhicules utilitaires. L'amélioration des technologies implantées dans les camions et les bus se répercutera ensuite sur les voitures. Le nombre de stations d'avitaillement implantées sur les territoires ne cesse d'augmenter, levant ainsi progressivement l'un des obstacles majeurs à la percée de l'hydrogène sur la route. Associées dans ces projets aux producteurs d'hydrogène et aux équipementiers de la filière, les collectivités doivent **prendre conscience de l'importance des points de ravitaillement**. Les flottes de véhicules à hydrogène ne se développeront que si les infrastructures connexes sont en place. Faire émerger ces réseaux de stations, via la constitution de flottes captives, constitue une opportunité majeure pour **pénétrer les territoires et inciter l'industrie du transport à choisir l'hydrogène**. Pour les constructeurs, la relative faiblesse de l'offre actuelle ne représente donc pas un signal d'alerte. Il est cependant capital qu'ils poursuivent leurs investissements et leurs recherches sur la voiture à hydrogène pour **être prêts à la déployer** lorsque la disponibilité et la présence de ce gaz dans les territoires se seront suffisamment amplifiées.

Une ressource décisive aux côtés de l'électricité verte

Via le procédé d'électrolyse, il est possible d'utiliser l'électricité verte pour obtenir de l'hydrogène vert. Ce dernier devient ainsi **un moyen de stockage afin de ne pas gaspiller l'électricité en surplus** générée par les panneaux photovoltaïques, les éoliennes et autres barrages. Cette possibilité supplémentaire pousse **les spécialistes de l'énergie et les équipementiers à s'impliquer dans le développement de la filière**. L'hydrogène devient une ressource propre et exploitable. Il est possible d'en tirer profit pour mettre au point de nouvelles applications, diversifier son activité et s'engager dans la transition écologique.

Les fabricants de piles à combustible profitent ainsi d'une autre voie de développement en parallèle du secteur automobile. Leur produit prend une importance critique pour développer le power-to-power, **la transformation de l'électricité en hydrogène puis à nouveau en électricité grâce à une pile à combustible**. Le marché mondial devrait atteindre 2 milliards d'euros dès 2020, soit dix fois plus qu'en 2017. Le nombre de clients intéressés va augmenter tant les domaines d'application d'un tel procédé paraissent nombreux : indépendance énergétique d'un territoire, d'un bâtiment, équipements mobiles permettant de produire de l'électricité propre sans polluer, etc. Pour les grands industriels, l'enjeu consiste à **étendre leurs gammes** afin de proposer des piles de tailles et de puissances diverses, utiles pour plusieurs types d'utilisation. Pour les start-up prêtes à investir ce segment, la clé semble plutôt être de **se tourner vers les nouveaux usages** de la pile à combustible afin de se démarquer et de créer des moyens d'utilisation inédits.

La filière du gaz s'occupe de son côté du power-to-gas, la transformation de l'électricité en gaz, sous forme d'hydrogène. Celui-ci peut ensuite **être injecté directement dans le réseau ou servir à fabriquer du biogaz**. Pour les spécialistes du secteur, le power-to-gas se présente à la fois comme une opportunité et un challenge. L'injection d'un gaz vert dans le réseau s'avère bénéfique d'un point de vue écologique. Mais cette opération s'accompagne inévitablement de tests et de démonstrateurs industriels destinés à prouver l'efficacité de ces nouveaux procédés. S'ils donnent l'occasion de créer des collaborations pour diminuer les coûts et mutualiser les compétences, ils rappellent également **l'importance de la recherche et développement pour l'avenir de la filière**. Les spécialistes du gaz doivent s'assurer de la rentabilité économique et énergétique du power-to-gas. Les fabricants de piles à combustible sont amenés à élaborer des piles moins onéreuses mais aussi plus puissantes. Les énergéticiens et les producteurs d'hydrogène ont l'obligation de réfléchir au stockage de ce gaz, problématique fondamentale étant donné la hausse future des volumes. L'hydrogène apporte de nombreuses opportunités énergétiques : il demeure donc primordial que les entreprises identifient les axes d'amélioration de leurs technologies. Les enjeux consistent à **optimiser les rendements, réduire les coûts et massifier les volumes de production**. De cette manière, l'industrialisation sera lancée et la filière pourra se tourner sereinement vers le long terme, où le plein potentiel de l'hydrogène fera sens au fil des années.

POINTS-CLÉS ET ENJEUX

Ce qu'il faut retenir

LES MOTEURS

- Le contexte de transition écologique et énergétique
- La diversité des acteurs engagés dans le développement de la filière : spécialistes du gaz et de l'énergie, constructeurs automobiles, collectivités, etc.
- La complémentarité de l'hydrogène avec d'autres marchés destinés à croître, comme l'électricité verte ou le biogaz
- La diversification des usages de l'hydrogène générée par la recherche et développement des industriels et les start-up
- Une dynamique présente au niveau mondial

LE MARCHÉ DE L'HYDROGÈNE

LES FREINS

- Le soutien limité de l'État comparé à d'autres filières écologiques ou technologiques
- La prédominance actuelle de l'hydrogène gris
- Un réseau de stations d'avitaillement encore peu développé dans les territoires
- La concurrence des véhicules électriques à batterie dans le secteur automobile, qui mobilisent déjà les investissements des constructeurs
- Un essor qui doit être envisagé sur le long terme (horizon 2050)

LE DÉFI DE L'HYDROGÈNE VERT

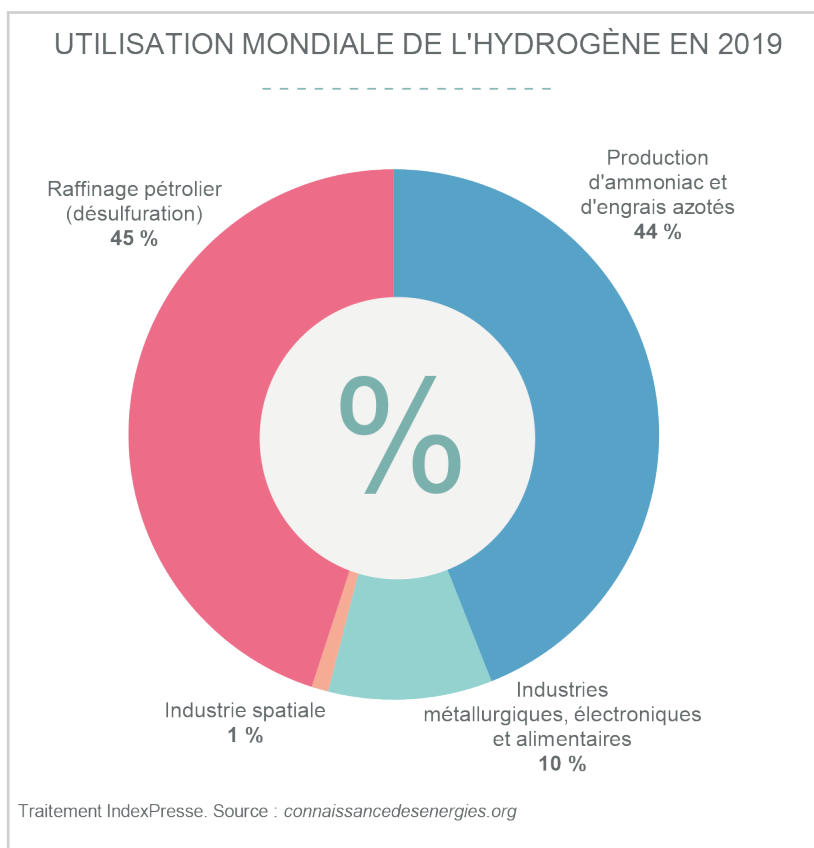
Une production à verdir

Chaque année, 75 millions de tonnes d'hydrogène sont produites dans le monde. Elles alimentent principalement l'industrie chimique, dans le cadre du raffinage pétrolier et de la pétrochimie, ainsi que pour la production d'ammoniac et d'engrais azotés. Les industries métallurgiques, électroniques, alimentaires et spatiales comptent également parmi les clients de ce gaz, dans des proportions moindres.

Les plus grands producteurs planétaires d'hydrogène sont les États-Unis et la Chine, avec près de 10 millions de tonnes par an. Selon *Industrie & Technologies*, **la France atteint une production de 900 000 tonnes annuelles, soit environ 1,5 % de la production mondiale.** La consommation

d'hydrogène dans l'Hexagone s'oriente ensuite principalement vers le raffinage et la pétrochimie (59 %), puis vers la production d'ammoniac et d'engrais azotés (26 %).

Quelle que soit l'échelle de production, près de **95 % de l'hydrogène généré provient d'énergies fossiles**. Ce gaz demeure en effet rare à l'état naturel, et difficilement accessible : la plupart des sources découvertes se situent dans les fonds marins, loin des côtes et à des profondeurs importantes. Certaines émanations existent sur terre, mais dans des contextes écologiques très précis. Pour l'organisme de recherche IFP Énergies nouvelles, "la route est longue avant d'envisager une exploitation rentable" de ces sources naturelles.



En France, 41,1 % de la production est obtenue à partir du vaporeformage de gaz naturel, 39,6 % grâce à l'oxydation du pétrole, et 13,8 % via la gazéification du charbon. Ces techniques se révèlent particulièrement néfastes pour l'environnement puisque pour chaque kilo d'hydrogène produit, entre 10 et 20 kg de CO₂ sont rejetés dans l'atmosphère. Tous les ans, la production de cet hydrogène dit "gris" (ou noir) provoque ainsi la dispersion de 650 à 700 millions de tonnes de CO₂. C'est "l'équivalent des émissions de l'Allemagne ou de l'ensemble du transport aérien mondial", constate Pascal Mauberger, dirigeant de l'équipementier français McPhy, spécialiste de l'hydrogène.

Seulement 5,5 % de l'hydrogène est produit grâce à **l'électrolyse de l'eau, une technologie "efficace et mature, la seule sans émission"**, précise le magazine *L'Usine Nouvelle*. Il s'agit de séparer les molécules d'hydrogène et d'oxygène contenues dans l'eau en utilisant un courant électrique. L'hydrogène ainsi obtenu est considéré comme décarboné. L'appellation "hydrogène vert" s'applique si l'électricité utilisée dans l'opération découle d'une énergie renouvelable, comme le solaire, l'éolien ou l'hydraulique.

À l'heure de la transition énergétique, cet hydrogène décarboné s'impose comme **un nouveau marché essentiel pour relever le défi écologique**. "L'hydrogène est le chaînon manquant pour viser des systèmes énergétiques 100 % renouvelables, l'objectif de nombreux pays", avance Michèle Azalbert, responsable de la Business Unit Hydrogène d'Engie. D'après l'Association française pour l'hydrogène et les piles à combustibles (Afhyac) et le cabinet de conseil McKinsey, **la filière française de l'hydrogène décarboné et des piles à combustible pourrait représenter 8,5 milliards d'euros et créer 40 000 emplois dès 2030**. En 2050, le marché est évalué à 40 milliards d'euros pour 150 000 nouveaux postes. **L'hydrogène décarboné répondrait alors à 20 % de la demande d'énergie nationale**, et serait porteur de perspectives d'exportations estimées à 6 milliards d'euros par an. Parallèlement, les émissions de CO₂ seraient réduites de près de 55 millions de tonnes, soit un tiers de l'objectif du Plan Climat français. Développer la production d'hydrogène décarboné, et plus spécifiquement vert, est nécessaire sur les plans écologique et économique. Ce contexte couplé aux initiatives du gouvernement et des entreprises laissent espérer une explosion de la filière dans les prochaines années.

DIFFÉRENTS TYPES D'HYDROGÈNE SELON LEUR MODE DE PRODUCTION

Type d'hydrogène	Particularité
Noir	Produit à partir de charbon
Brun	Produit à partir de lignite (charbon naturel fossile)
Gris	Produit à partir de gaz ou de pétrole, sans captage du CO ₂ généré
Bleu	Produit à partir de gaz ou de pétrole, avec captage du CO ₂ généré
Vert	Produit à partir d'électrolyse de l'eau, en utilisant de l'électricité renouvelable

Traitement IndexPresse. Source : *L'Usine Nouvelle*

L'essor de l'hydrogène porté par une multitude de facteurs

L'urgence climatique et la maturité technologique incitent le marché à prendre de l'ampleur

Présenté comme un candidat énergétique sérieux depuis les années 1970, l'hydrogène a finalement changé de statut durant la décennie 2010. "Le moment est venu d'exploiter son potentiel pour jouer un rôle clé dans un environnement propre, sûr et sécuritaire", préconise l'Agence internationale de l'énergie à propos de ce gaz décrit par *L'Usine Nouvelle* comme **alliant les vertus de l'électricité et du pétrole**. L'hydrogène présente en effet plusieurs caractéristiques très utiles dans le cadre environnemental. Il dispose par exemple d'un **fort potentiel énergétique**, puisque la combustion d'un kilo d'hydrogène libère trois fois plus d'énergie que celle d'un kilo d'essence. Cette opération ne rejette que de l'eau, et aucun gaz ou particule néfaste dans l'atmosphère. Le nombre limité de sources naturelles d'hydrogène empêche toute dépendance énergétique de certains pays envers d'autres, contrairement au pétrole ou aux gaz fossiles. Il peut ainsi être produit partout, "réduisant d'autant les tensions géopolitiques liées à l'accès aux ressources fossiles énergétiques", appuie *Industrie & Technologies*. L'hydrogène est aussi un gaz, transportable et stockable, tout en affichant une forte complémentarité avec l'électricité. Grâce aux technologies d'électrolyse et de piles à combustible, il est possible de se servir de l'un pour générer l'autre et inversement.

Alternatives Économiques recense quatre niveaux d'utilisation de l'hydrogène dans le cadre de "l'économie zéro émission de demain": l'équilibrage saisonnier entre offre et demande dans des

systèmes électriques basés sur les énergies renouvelables, en **transformant le surplus d'électricité en hydrogène ensuite injecté dans le réseau de gaz de ville** (power-to-gas); la **transformation de l'hydrogène en électricité grâce aux piles à combustible**, ouvrant ainsi la voie à l'autonomie énergétique de territoires mal ou non desservis par les réseaux électriques (power-to-power); **l'essor de l'électromobilité** en intégrant les piles à combustible dans des véhicules, notamment ceux nécessitant un besoin élevé d'autonomie et de puissance comme les camions ou les trains; le **verdissement de l'industrie chimique** grâce au remplacement de l'hydrogène gris traditionnellement utilisé par de l'hydrogène décarboné et vert. Comme l'illustre ce dernier point, ces nouveaux usages ne prennent tout leur sens que si **la démocratisation de l'hydrogène s'effectue de manière décarbonée**. L'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (Ademe) insiste sur cette nécessité. L'Afhyppac tient un discours similaire en prônant un "déploiement à grande échelle des solutions hydrogène décarboné".

S'engager dans cette voie amène donc à valoriser les énergies renouvelables, puisque l'hydrogène vert ne peut être obtenu que si l'électricité utilisée lors des processus d'électrolyse provient de sources naturelles. "L'hydrogène sera un vecteur très utile... si la France se décide à aller vers un mix énergétique 100 % renouvelable", rappelle *Alternatives Économiques*.

Or, le **coût de production de ces énergies ne cesse de baisser d'année en année**.

8 milliards d'euros

Le montant des investissements préconisés par l'Afhyppac d'ici 2028, pour développer la filière française de l'hydrogène décarboné.

Selon l'Agence internationale des énergies renouvelables (Irena), les prix avaient diminué de plus de 10 % en 2018. Le coût de la bioénergie recule de 14 %, ceux du photovoltaïque, de l'éolien terrestre et de l'énergie hydraulique de 12 %, et ceux de l'éolien offshore de 1 %. Cette baisse est principalement due à la réduction du coût des matériaux nécessaires à la construction des infrastructures, et à l'amélioration des performances des processus de production. Pour l'Irena, ce mouvement devrait se poursuivre durant la décennie 2020. Plus de 70 % de l'électricité produite par les éoliennes terrestres ou les cellules photovoltaïques deviendra moins chère que celle émanant des centrales à gaz, au charbon ou au pétrole. **Cette évolution joue en faveur du développement de l'hydrogène vert** en favorisant pour lui aussi une baisse des coûts. *L'Usine Nouvelle* cite les exemples du Danemark et du Chili, deux pays en avance dans le domaine des énergies renouvelables, qui profitent de leur situation pour mener de grands projets industriels en lien avec l'hydrogène.

Au contexte écologique favorable s'ajoute **un cadre technologique opérationnel**. L'électrolyse et les piles à combustible ne constituent plus des domaines où la recherche rencontre des obstacles majeurs. "Il reste beaucoup de travail à faire pour

démocratiser l'hydrogène, mais il s'agit surtout d'optimisation. Les principaux verrous technologiques ont été levés", assure Yannick Legay, directeur business développement chez Alstom. Les premiers travaux sur la pile à combustible remontent au XIX^e siècle, puis ils ont été poursuivis dans la seconde moitié du XX^e siècle, au moment de la conquête spatiale. Depuis, **la recherche n'a cessé de progresser dans le domaine**, comme l'indique Daniel Hissel, professeur et chercheur spécialiste de la pile à combustible: "À partir des années 2000, les développements scientifiques et technologiques se sont succédé, afin d'améliorer l'efficacité énergétique et réduire l'empreinte environnementale. Récemment, on a observé une accélération de la recherche, marquée par une croissance exponentielle des développements, des projets de démonstration, des acteurs industriels impliqués et des produits arrivant sur le marché". Le laboratoire national américain des énergies renouvelables a remarqué qu'en 2006, une pile à combustible perdait 10 % de sa tension après 950 heures d'activité. En 2016, ce temps dépassait 4 100 heures. Si des progrès restent envisageables sur les thématiques du stockage, du transport et du rendement global de l'hydrogène, les technologies destinées à lancer l'industrialisation de la filière semblent prêtes.

La France entre dans la course à l'hydrogène

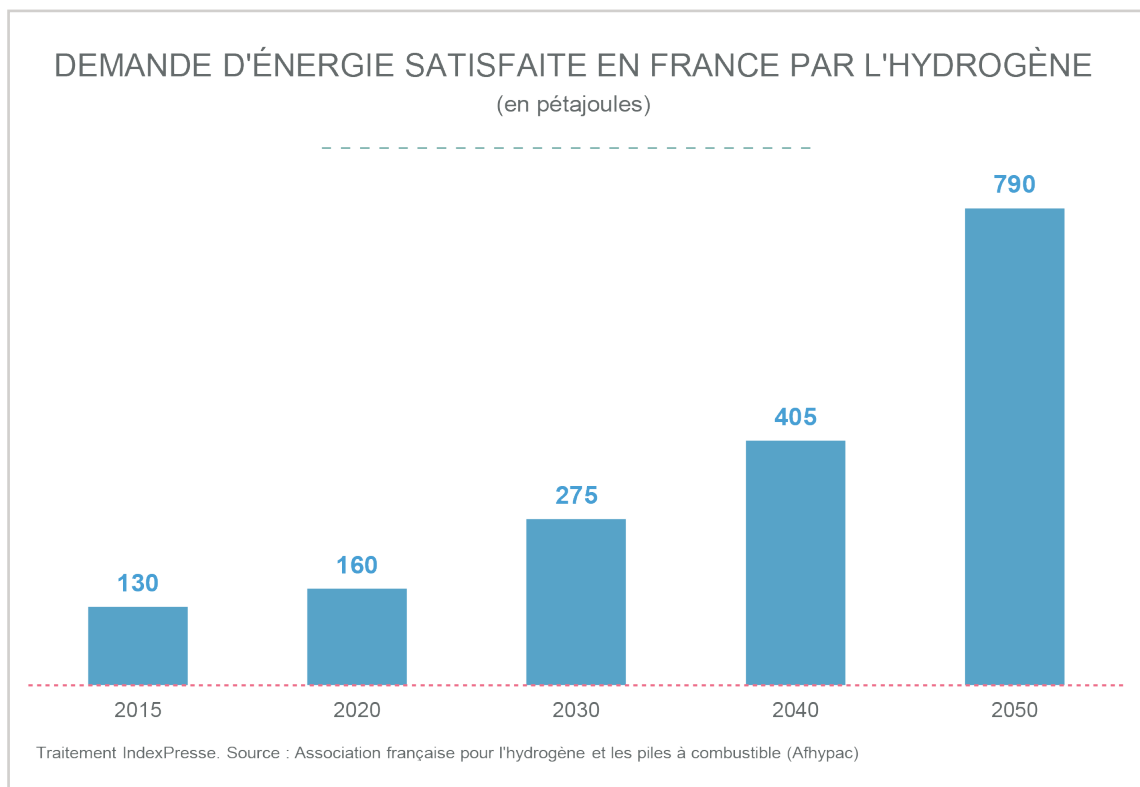
"Si la France veut respecter son engagement de neutralité carbone en 2050, on ne pourra pas faire l'impasse sur l'hydrogène", assure Marc Florette, membre de l'Académie des technologies. Le gouvernement français a ainsi lancé en juin 2018, sous l'initiative du ministère de la transition écologique et solidaire, le Plan National Hydrogène, pour **"faire de la France un leader mondial de cette technologie"**. Ce plan s'articule autour de trois axes principaux: l'augmentation de la production d'hydrogène par électrolyse pour l'industrie, la valorisation des usages de la mobilité hydrogène en complémentarité des filières batterie, et la stabilisation des réseaux énergétiques sur le moyen-long terme. D'autres

pistes à explorer sont également citées, comme la mise en place d'un système de traçabilité de l'hydrogène décarboné, ou l'émergence des ECV (Engagements pour la Croissance Verte), des projets visant à renforcer les liens entre État et acteurs privés dans le domaine environnemental. Le plan prévoit dans un premier temps **100 millions d'euros de soutien par an jusqu'en 2023**. Il fixe aussi plusieurs objectifs chiffrés: 10 % d'hydrogène décarboné en France en 2023 (contre 5 % en 2018), puis entre 20 et 40 % en 2028. Le nombre de véhicules en circulation fonctionnant à l'hydrogène est fixé à 5 000 pour les véhicules utilitaires légers en 2022 et entre 20 000 et 50 000 en 2028. Pour les poids lourds, l'objectif

à atteindre s'élève à 200 unités en 2022 et entre 800 et 1 000 en 2028.

Pour Pascal Mauberger, dirigeant de l'équipementier industriel McPhy, ce plan "n'est pas à la hauteur des enjeux, mais le ministre a dit qu'il s'agissait d'une première tranche". "Le plus important est que le ministre ait donné l'impulsion", confirme Jean-Michel Szczerba, codirecteur général de l'équipementier automobile Plastic Omnium. En juin 2019, un an après le lancement du plan, l'Afhypac se disait globalement satisfaite de cette année inaugurale, mettant en avant la signature des premiers ECV et la hausse du budget hydrogène de l'Ademe. En revanche, certains engagements gouvernementaux semblent avoir été revus à la baisse. Les projets d'hydrogène vert dans l'industrie ont intégré le Programme d'investissements d'avenir, et se retrouvent en concurrence avec d'autres projets de thématiques diverses pour obtenir les financements. *Le Monde* avance aussi un étalement de l'investissement dans le temps ainsi qu'une volonté de trouver davantage de sources de financement

différentes, ce qui pourrait ralentir le versement des aides. **"L'avenir de la filière dépendra beaucoup de l'engagement des pouvoirs publics**, et de la stratégie mise en œuvre pour soutenir son développement", rappelle toutefois le cabinet Sia Partners. Le soutien gouvernemental apparaît comme indispensable pour que la filière de l'hydrogène prenne son envol et que l'hydrogène vert y occupe une place croissante. Selon l'Afhypac, la demande française en hydrogène pourrait être multipliée par cinq d'ici 2050, pour atteindre 5,5 millions de tonnes. L'utilisation croissante de sa version décarbonée dans la production et le stockage d'électricité, le chauffage des bâtiments, l'industrie et les transports ne semble réaliste que si le gouvernement, les industriels et les investisseurs ne limitent pas leurs efforts. À l'été 2019, dans le cadre du G20, l'Agence internationale de l'énergie avait encouragé les dirigeants français à poursuivre leur action pour faire émerger une filière de l'hydrogène, arguant que la France était, aux côtés des pays asiatiques, **l'un des principaux moteurs mondiaux sur cette thématique.**



Une dynamique mondiale dans le sillage de l'Asie

La Chine s'avance dans la décennie 2020 avec des ambitions élevées, notamment dans le transport. Afin de réduire sa dépendance vis-à-vis du pétrole importé et d'améliorer ses performances écologiques, **la Chine prévoit d'investir 10,7 milliards d'euros dans l'hydrogène**, avec un objectif final d'un million de véhicules à hydrogène sur les routes en 2030.

Le gouvernement subventionne la production de voitures et de batteries à combustible, ainsi que les achats des consommateurs. Surtout, Pékin vise le déploiement de "corridors de l'hydrogène", c'est-à-dire des axes de déplacement reliant les grandes villes et équipés de stations d'avitaillement spécifiques pour les véhicules à hydrogène. Ils permettront également de renforcer les liens entre toutes les agglomérations dynamiques sur ce secteur d'activité. **Cet emballement national se reflète à travers les décisions prises par les sociétés chinoises**, note *Futuribles*: "De plus en plus de start-up et d'entreprises automobiles et équipementiers essaient de capitaliser sur cet engouement." La start-up spécialisée Mingtian Hydrogen Energy Technology a ainsi achevé en 2019 la première phase de son projet de parc industriel dédié à la production de piles à combustible et à leurs composants, dont

le coût total est estimé à 363 millions de dollars. Plusieurs grands groupes investissent aussi massivement dans l'industrie de l'hydrogène comme le constructeur de poids lourds China National Heavy Duty Truck, qui compte dépenser plus de 7 milliards de dollars dans la fabrication de véhicules à hydrogène. Wan Gang, ministre

chinois de la science et de la technologie et considéré comme l'un des précurseurs de la voiture électrique dans son pays, prône une "société de l'hydrogène", assurant que ce gaz sera bien "l'énergie de demain".

Si la Chine se démarque par la grandeur de ses ambitions, son voisin japonais a été l'un des premiers pays à considérer l'hydrogène comme une ressource stratégique pour l'avenir. "Depuis vingt-cinq ans, le Japon s'entête et croit en ses chances", titrait ainsi *Le Monde* en 2018. En plus de réduire

ses émissions de gaz polluants, **le Japon voit dans l'hydrogène une solution idéale aux problèmes de distribution de l'électricité**, son réseau étant souvent impacté par les catastrophes naturelles. Il vise la production de 300 000 tonnes d'hydrogène vert par an d'ici 2030. Pour les nombreux constructeurs automobiles japonais, tels Toyota, Nissan ou Honda, les véhicules à hydrogène représentent un segment clé sur le long terme, avec un objectif gouvernemental de 800 000 unités en circulation en 2030, contre 2 000 en 2019. Selon *Le Monde*, "la nécessité de **développer de nouvelles infrastructures pour ces modèles doit dynamiser l'économie**". En se positionnant comme l'un des leaders mondiaux sur ce sujet, le Japon pourrait aussi devenir un partenaire privilégié de la Chine et l'accompagner dans son propre développement. Mais pour y parvenir, le pays doit encore surmonter plusieurs obstacles, dont une production nationale peu élevée, un manque de stations d'avitaillement et une réglementation trop stricte.

17 milliards de dollars

Le montant des investissements prévus par les entreprises de l'industrie chinoise de l'hydrogène d'ici 2023.

Source: Bloomberg NEF.

LES JEUX OLYMPIQUES DE TOKYO, VITRINE DE LA VOLONTÉ JAPONAISE

Le Japon compte profiter des JO de Tokyo, et de leur couverture médiatique, à l'été 2020, pour faire la promotion de son savoir-faire en matière d'hydrogène. Les 6 000 logements du village olympique seront alimentés en électricité grâce à des piles à combustible. Une centaine de bus utilisés pendant les compétitions fonctionneront de la même manière.

La Corée du Sud apparaît enfin comme le troisième acteur asiatique majeur sur le segment de l'hydrogène. Importatrice de son énergie à 95 %, elle souhaite **réduire sa dépendance énergétique, abaisser son niveau de pollution et développer une économie nouvelle**. Le gouvernement prévoit d'investir 2 milliards d'euros et a ciblé **les partenariats public-privé comme un moyen idéal** de dynamiser cette nouvelle industrie. De grands noms, comme le constructeur automobile Hyundai, comptent exporter le savoir-faire de l'industrie coréenne à l'international et s'imposer comme des références mondiales. Sur son territoire, la Corée du Sud espère atteindre 820 000 véhicules et 700 stations d'avitaillement en 2030.

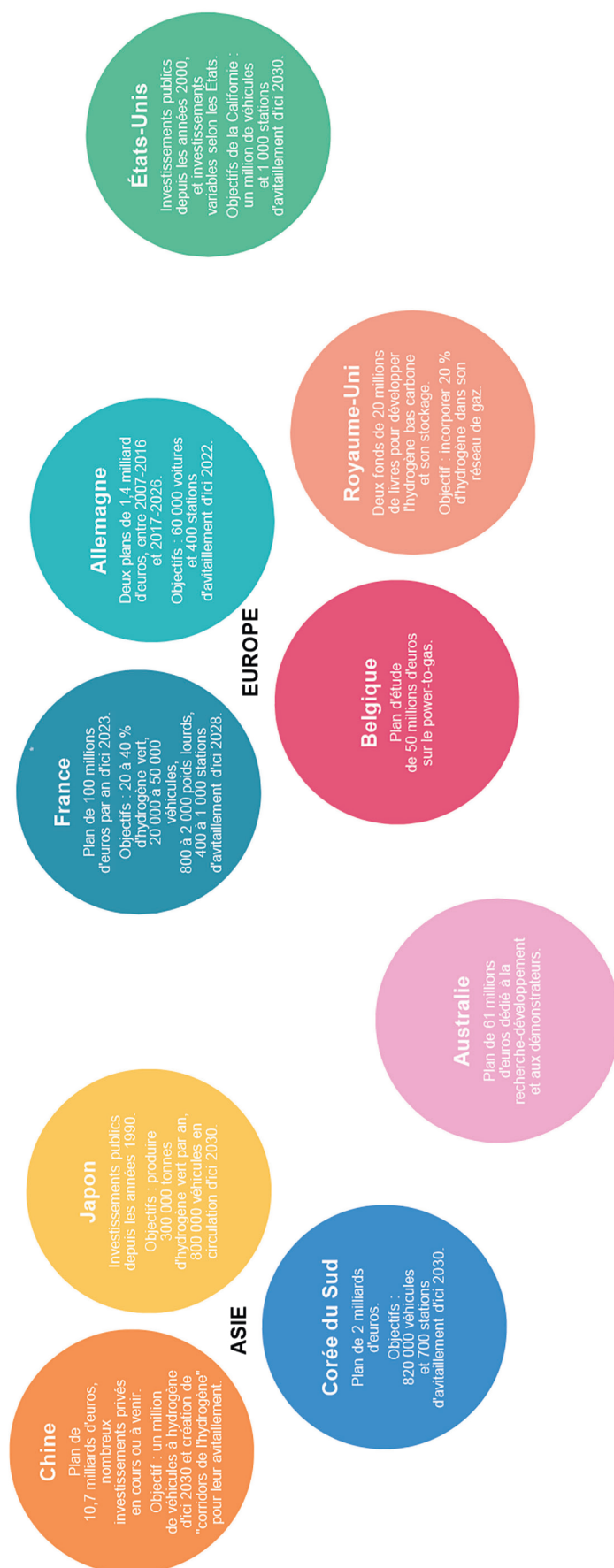
En dehors de l'Asie, les États-Unis font figure de territoire le plus dynamique, même si les efforts semblent surtout concentrés dans certaines régions, comme la Californie. Cet État vise un million de véhicules à hydrogène en circulation d'ici 2030 ainsi que 1 000 stations d'avitaillement sur son territoire, en s'engageant à apporter 2,5 milliards de dollars d'aides aux industriels et à mettre en place des incitations fiscales pour les acheteurs. Au niveau national, les États-Unis s'intéressent à l'hydrogène depuis le début des années 2000 et **investissent tous les ans, via le département de l'énergie, 100 millions de dollars dans les piles à combustible**. "Les projets du département de l'énergie ont permis de réduire de 50 % le coût des piles à combustion servant au transport depuis 2006, de doubler leur autonomie, et de diviser par cinq la quantité de platine utilisée", liste Jim Alkire, chargé du sujet dans le département. Le pays nord-américain reste toutefois freiné par sa dépendance au pétrole et le faible prix de cette matière première, relève le journal *Les Échos*, ce qui ne l'incite pas à développer d'autres ressources énergétiques. Les États producteurs de pétrole n'ont ainsi que peu d'intérêt à suivre l'exemple de la Californie et de ses investissements dans l'hydrogène, ce qui crée des divergences sur l'ensemble du pays. Malgré tout, **les États-Unis demeurent un moteur en matière d'innovation**. À l'automne 2019, le département de l'énergie a par exemple lancé trois nouveaux projets tests faisant appel aux centrales nucléaires, souvent pointées du doigt à l'heure

de la transition écologique. Il s'agit d'adapter leurs infrastructures pour qu'elles deviennent capables de produire de l'hydrogène décarboné par électrolyse. Ce système rendrait ainsi complémentaires énergies fossiles et renouvelables, et donnerait une seconde vie aux centrales.

En Europe, l'Allemagne s'avance comme le numéro 1 sur le marché de l'hydrogène. **Depuis 2007, le pays bénéficie d'un programme national de l'hydrogène** et 1,4 milliard d'euros avaient déjà été investis sur la période 2007-2016, somme reconduite pour les dix années suivantes. "Nous devons poser les jalons pour que l'Allemagne devienne le numéro un mondial des technologies de l'hydrogène", a affirmé le ministre de l'économie, Peter Altmeier, en novembre 2019. Ce gaz répond à sa problématique de stockage des énergies renouvelables, qui représentent désormais 40 % de sa consommation énergétique totale. Les industriels allemands sont prêts à s'engager, comme l'a confirmé Holger Lösch, directeur général adjoint de la Fédération de l'industrie: "Une protection ambitieuse du climat sur les sites industriels allemands n'est possible qu'avec l'hydrogène." Sur le segment de la mobilité, l'Allemagne possède également de l'avance avec une soixantaine de stations d'avitaillement déjà installées à l'été 2019, et l'ambition d'atteindre rapidement le nombre de 400 durant la décennie 2020, ainsi que 60 000 voitures en 2022. Le pays se démarque aussi par ses avancées sur les trains à hydrogène, avec deux exemplaires construits par Alstom déjà en circulation en Basse-Saxe. Une trentaine d'autres sont attendus pour 2022.

L'hydrogène constitue un marché d'avenir pour d'autres pays engagés dans la transition énergétique et les énergies renouvelables. *L'Usine Nouvelle* évoque ainsi le Chili, la Nouvelle-Zélande ou les pays scandinaves, pour qui l'hydrogène représente **une solution idéale dans la problématique du stockage des énergies renouvelables**. Les nombreuses ressources naturelles à disposition de l'Australie en font également un territoire porteur, relève le Centre australo-allemand de la transition énergétique. Selon lui, l'Australie serait même capable de "mettre en place en quelques années une industrie d'exportation d'électricité verte massive" grâce au stockage par hydrogène.

MULTIPLICATION DES PLANS NATIONAUX EN LIEN AVEC L'HYDROGÈNE



Traitement IndexPresse. Source : L'Usine Nouvelle et presse professionnelle

Des initiatives industrielles de plus en plus nombreuses dans l'hydrogène vert

La concurrence s'intensifie dans la production et la fourniture d'hydrogène

Dans une étude parue en 2018, la banque américaine Morgan Stanley évalue le marché mondial de l'hydrogène à 2 500 milliards de dollars en 2050, contre 130 milliards en 2018. Elle identifie **l'hydrogène décarboné comme l'une des clés du secteur**, la baisse des coûts de ce dernier engendrant une forte croissance. Morgan Stanley note également que les grands producteurs mondiaux d'hydrogène devraient largement bénéficier de cette envolée. Leurs projets se révèlent d'ailleurs de plus en plus nombreux et tous commencent à se tourner vers l'énergie verte.

Le groupe français Air Liquide, qui produit 14 milliards de m³ d'hydrogène par an – détenant ainsi 48 % du marché européen en volume –, fait par exemple de ce gaz l'une de ses priorités sur le long terme. "On a une feuille de route qu'on est en train d'établir pour voir ce qu'il faut faire entre aujourd'hui et 2030 pour pouvoir vraiment lancer ces énergies sur les marchés et ensuite on verra probablement entre 2030 et 2050 l'hydrogène réellement décoller", expliquait à l'automne 2019 Benoît Potier, PDG de l'entreprise. Cette stratégie implique notamment la vente d'activités annexes, comme ses filiales de matériel de plongée, de coupage et de soudage ainsi que de produits d'hygiène pour l'industrie et les hôpitaux. Air Liquide poursuit ainsi "la réduction de sa dette et se concentre sur des domaines en plus forte croissance, comme l'utilisation de l'hydrogène pour la transition énergétique", remarque *Investir*. De plus, face à l'énormité de ce futur marché, le groupe a pris conscience qu'il

serait compliqué de fonctionner de manière solitaire, comme le détaille Benoît Potier : "Nous ne sommes pas seuls, **nous allons nous associer, nouer des partenariats dans les technologies comme dans les marchés** pour pouvoir être présents sur la quasi-totalité de ces marchés." Air Liquide constate des opportunités à saisir dans tous les secteurs d'activité concernés (industrie, énergie, transports) mais aussi sur différents marchés géographiques. Membre du Conseil de l'hydrogène (*Hydrogen Council*), un lobby international créé en 2017, du consortium californien California Fuel Cell Partnership, du japonais Japan H2 Mobility et de l'allemand H2 Mobility Germany, l'entreprise multiplie les accords et les projets communs. Elle est ainsi devenue partenaire du réseau de ravitaillement américain FirstElement Fuel Inc. dans le cadre de l'ouverture de stations aux États-Unis. En Chine, elle a fondé une coentreprise avec Chengdu Huaqi Houpu Holding, un constructeur de stations. En Corée du Sud, elle a également participé à la création d'une société commune avec plusieurs grands groupes du pays, dont Hyundai, dans le but d'étendre le réseau de stations. "Il y a un

très vaste potentiel de marchés à ouvrir, nous devons trouver les bons", assure

Pierre-Étienne Franc, directeur des activités hydrogène énergie du groupe. Dans cette perspective, l'hydrogène décarboné s'impose comme un marché crucial pour le futur. "Il n'y a pas de marché de la transition énergétique pour l'hydrogène s'il n'est pas décarboné", poursuit Pierre-Étienne Franc.

2 milliards d'euros

Le montant du chiffre d'affaires d'Air Liquide réalisé grâce à son activité hydrogène, soit environ 10 % des ventes totales du groupe.

Air Liquide se concentre donc particulièrement sur ce type d'hydrogène et a **“lancé plusieurs pistes pour se mettre en capacité de le décarboner**, notamment la captation et la séquestration du dioxyde de carbone (CO₂), le bio-hydrogène et l'électrolyse”. L'entreprise prévoit d'inaugurer en 2020 l'électrolyseur le plus puissant du monde, qui produira de l'hydrogène grâce à de l'hydroélectricité entièrement propre. Huit tonnes d'hydrogène vert seront générées par jour et 27 000 tonnes de CO₂ par an ne seront plus rejetées dans l'atmosphère. Il sera intégré à son site de Bécancour, au Canada, et offrira à Air Liquide un nouvel atout pour s'imposer sur le marché nord-américain. La société explore aussi les opportunités présentes sur le territoire français et fait notamment partie du projet HyGreen Provence. Organisé autour d'un partenariat public-privé avec l'agglomération Durance, Luberon, Verdon, ainsi que l'énergéticien Engie, il a pour but de **mettre en place en**

France un site de production d'hydrogène vert à l'échelle industrielle. La phase finale, fixée pour 2027, permettra de produire plusieurs dizaines de milliers de tonnes d'hydrogène vert et d'alimenter les besoins en énergie de 450 000 personnes. Lancé fin 2017, HyGreen Provence doit entrer en réalisation en 2021 et serait alors “le plus grand programme d'hydrogène vert d'Air Liquide”, selon *Investir*.

L'implication d'Engie dans ce programme illustre **les ambitions de l'énergéticien français sur le marché de l'hydrogène.** Engagé dans une phase de transformation afin de répondre aux problématiques de la transition énergétique, il veut “devenir un acteur majeur de l'hydrogène renouvelable en France et à l'international”, expliquait son ancienne directrice générale Isabelle Kocher. “On peut imaginer qu'il y aura des majors de l'hydrogène pour pratiquer l'électrolyse à très grande échelle et transporter cet hydrogène”,

Les concurrents internationaux d'Air Liquide s'activent

Leader mondial de l'hydrogène devant l'entreprise française, le groupe américain Air Products fait également partie du Conseil de l'hydrogène et “s'implique à l'échelle mondiale dans de nombreux projets innovants autour des infrastructures et du ravitaillement en hydrogène”. Il se concentre sur la fourniture de gaz aux raffineries afin de les encourager à produire des carburants plus propres, ainsi que sur le développement de réseaux de station d'avitaillement. C'est par exemple lui qui a fourni au constructeur Alstom la station permettant d'alimenter les premiers trains à hydrogène roulant en Allemagne. Air Products a également cerné l'hydrogène vert comme un marché d'avenir et possède déjà plusieurs unités de production dans le monde. En 2019, il prend part au projet européen de certification de l'hydrogène renouvelable CertifHy. Le gaz produit dans son usine de Rotterdam, obtenu grâce à de l'électricité provenant d'éoliennes, bénéficie de

certificats d'origine garantie, assurant son caractère vert au client. “Cette certification CE constitue un premier pas significatif vers le développement à venir d'un marché de l'hydrogène vert et fournit les bases à l'industrie pour qu'elle joue un rôle de premier plan dans cette transition”, a affirmé Marcel Galjee, directeur de l'usine de Rotterdam.

Troisième grand acteur mondial de l'hydrogène, et identifié par la banque Morgan Stanley comme l'un des principaux bénéficiaires du développement du marché de l'hydrogène avec Air Liquide et Air Products, le groupe allemand Linde s'est rapidement positionné sur l'hydrogène vert. Dès 2009, il a mis en construction une unité pilote de production d'hydrogène décarboné, avant de participer, en 2015, au lancement de ce qui était à l'époque le plus grand site de production d'hydrogène vert du monde, à Mayence. Linde possède l'avantage d'évoluer sur un marché national très dynamique, où les pouvoirs publics soutiennent depuis plus longtemps qu'en France la filière de l'hydrogène et ses projets environnementaux. Le groupe a également intégré le Conseil de l'hydrogène pour défendre les intérêts de ce gaz et mener plus facilement des projets à l'international.

poursuivait-elle. La réorientation d'Engie vers le gaz et les énergies renouvelables lui permet donc d'investir le segment de l'hydrogène, qui restait jusque-là minoritaire dans ses activités. Le groupe compte déjà une offre d'hydrogène renouvelable pour les industriels, nommée EffiH2. Il se positionne comme un acteur clé sur la thématique du power-to-gas, en étant à l'initiative de plusieurs projets et démonstrateurs. Enfin, Engie n'oublie pas la mobilité et développe, via sa filiale GNvert, un réseau de stations de recharge pour véhicules à hydrogène. Le groupe était également entré en 2016 au capital de l'entreprise française Symbio FCell, spécialiste de la pile à combustible et de l'autonomie des véhicules hybrides, avant que Michelin et Faurecia ne reprennent l'intégralité du capital début 2019.

La percée de l'hydrogène offre donc de nouvelles opportunités à des acteurs comme Engie, qui peuvent développer des services à haute valeur ajoutée et changer de statut dans ce secteur. **L'hydrogène devient ainsi un marché de plus en plus disputé** où plusieurs spécialistes de l'énergie, jusque-là peu ou pas engagés, tentent de se faire une place. Le groupe français Total, qui possède une activité de production d'hydrogène et utilise massivement cette matière première dans le raffinage et la chimie, a exprimé son souhait de devenir une "major de l'énergie responsable", moins dépendante du pétrole. Il s'intéresse ainsi aux manières de produire de l'hydrogène décarboné, de capter et de stocker le CO₂ émanant de sa production. "On étudie sérieusement un dossier pour produire de l'hydrogène pour alimenter la bioraffinerie de La Mède (Bouches-du-Rhône) sur la base d'énergie renouvelable", détaillait fin 2019 Patrick Pouyanné, PDG de Total. Il admettait que

ENGIE S'ENGAGE AUPRÈS DE L'ENERGY OBSERVER

L'Energy Observer s'est élancé sur les océans au début de 2018 pour un voyage programmé de six années. Fonctionnant entièrement à l'hydrogène, ce bateau utilise les énergies solaire et éolienne pour créer et stocker l'énergie utile à son fonctionnement, et revendique une autonomie totale. Engie compte parmi les partenaires principaux du projet. "Ce bateau est tout ce auquel on croit chez Engie. C'est un système vertueux, décentralisé, digitalisé, décarboné, et la preuve que l'on peut fonctionner de manière intégrée en totalité à partir d'énergies renouvelables", s'enthousiasme Michèle Azalbert, directrice générale de l'activité hydrogène du groupe.

le secteur manquait de maturité mais **affichait un potentiel indéniable**. L'hydrogène dans la mobilité constitue l'autre domaine que Total observe attentivement, notamment pour alimenter les flottes de poids lourds. Au printemps 2019, le spécialiste de l'électricité EDF annonçait à son tour sa volonté de "devenir un acteur incontournable de la filière hydrogène en France et à l'international" grâce à la création de sa filiale Hynamics, organisée autour d'une offre hydrogène bas carbone à destination de l'industrie et de la mobilité. Hynamics est engagée dans une quarantaine de projets en France et en Europe. Elle propose d'assurer l'installation, l'exploitation et la maintenance de centrales de production d'hydrogène, mais aussi de déployer des stations d'avitaillement sur les territoires.

LA PLUS GRANDE USINE MONDIALE DE PRODUCTION D'HYDROGÈNE VERT

Entrée en fonctionnement fin 2019 à Linz (Autriche), l'usine du projet H2Future est le plus grand site de production d'hydrogène vert du monde. L'intégralité des procédés d'électrolyse est réalisée à partir d'énergies renouvelables. L'usine devrait atteindre son plein potentiel en 2023. Mené par le sidérurgiste autrichien Voestalpine, le producteur et distributeur d'électricité autrichien Verbund, et le groupe allemand actif dans l'énergie Siemens, le projet H2 Future regroupe plusieurs organismes de recherche européens et a été soutenu par la Commission européenne.

Un nombre d'équipementiers croissant

Face à une demande en hausse, les équipements industriels destinés à produire ou à transformer de l'hydrogène se multiplient, offrant ainsi de nouvelles opportunités à leurs concepteurs. La France compte dans ce secteur une entreprise très prometteuse, McPhy Energy, à la croissance annuelle supérieure à 10 %. Ce fabricant d'électrolyseurs, utilisés pour produire de l'hydrogène vert, et de solutions de stockage a reçu à l'été 2018 le soutien d'EDF, qui est entré à son capital à hauteur de 21,7 %. Cette opération a confirmé l'intérêt du géant de l'électricité pour l'hydrogène, tout en offrant à McPhy "un adossement industriel et commercial pour accélérer et se donner une meilleure sécurité financière". Seul équipementier de l'hydrogène présent à la Bourse de Paris, cette ancienne start-up se développe autour de trois grands marchés : **l'industrie lourde, le stockage des énergies renouvelables et la mobilité**. Afin de proposer un vaste catalogue d'équipements, McPhy a racheté durant les années 2010 son concurrent italien Piel, fabricant d'électrolyseurs de petite puissance, et l'allemand Enertrag, davantage orienté vers les grandes puissances. "Nos nouvelles plateformes d'électrolyse de l'eau nous donnent un avantage insurpassable", avance

Pascal Mauberger, PDG de McPhy. Elles lui ont en tout cas permis d'intégrer de nombreux projets en France mais également en Europe et en Chine. Dans le même temps, de nouveaux concurrents font leur apparition et se positionnent sur des segments en pleine expansion. Areva H2Gen, co-entreprise des sociétés Areva et Smart Energies et de l'organisme Ademe, se concentre ainsi sur **les grandes unités d'électrolyse qui permettront d'industrialiser la production d'hydrogène vert**. Basés sur la technologie PEM (*Proton Exchange Membrane*, membrane à échange de protons), ses équipements visent à rendre le secteur plus compétitif, capable de lutter contre la production classique à partir d'hydrocarbures. Areva H2Gen a ouvert en 2016 **la première usine de fabrication d'électrolyseurs PEM en France**, aux Ulis (Essonne). "Notre usine est dimensionnée pour produire une quarantaine d'électrolyseurs par an. L'idée n'est donc pas de faire beaucoup d'unités mais des unités de forte puissance", indique Fabien Auprêtre, directeur recherche et développement du groupe. Les marchés de l'industrie et de l'énergie apparaissent comme les deux débouchés les plus intéressants pour ces

DIVERSIFIER SON ACTIVITÉ EN SE LANÇANT DANS LES ÉQUIPEMENTS D'HYDROGÈNE VERT

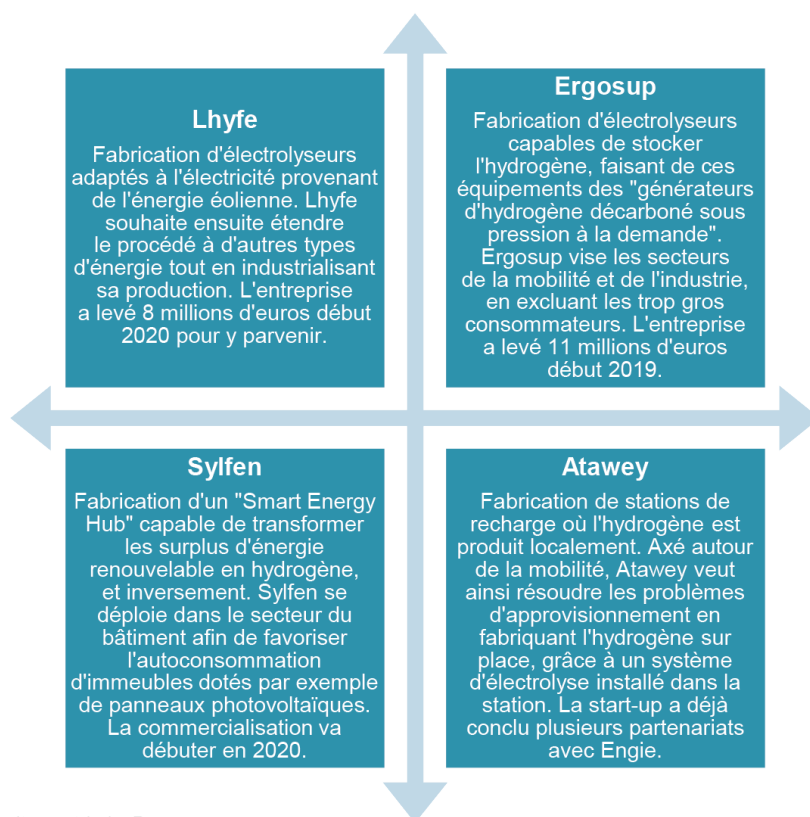
Spécialiste du BTP, le groupe français Rougeot a créé en 2019 une nouvelle filiale, Rougeot Énergie, afin de diversifier ses activités. Le secteur de l'hydrogène décarboné apparaît comme une de ses nouvelles priorités. Aux côtés de Dijon Métropole, Rougeot Énergie a ainsi investi 4,5 millions d'euros dans la construction d'une station de compression qui produira de l'hydrogène à partir d'électricité verte provenant de l'usine d'incinération des ordures ménagères de la ville et d'un parc photovoltaïque. Rougeot Énergie participe également à d'autres projets en lien avec l'hydrogène, comme le déploiement de flottes de transport ou la création d'un centre national de tests pour les réservoirs à hydrogène. Le groupe veut acquérir une maîtrise complète de ces équipements nouveaux pour lui, depuis leur ingénierie jusqu'à la réalisation finale.

électrolyseurs massifs. De son côté, l'entreprise française Haffner Energy a décidé de **parier sur la biomasse** afin de mettre au point des unités de production d'hydrogène vert. En chauffant de la biomasse agricole ou sylvicole, des boues, des lisiers ou des ordures ménagères, puis en purifiant le mélange gazeux obtenu, Haffner Energy crée de l'hydrogène à partir de ressources naturelles. Le groupe doit encore améliorer le processus de captage du CO₂ émanant de l'opération, mais valorise surtout l'aspect économique d'un tel procédé. Ses unités, de petite taille, peuvent être implantées de manière décentralisée et ainsi réduire les coûts de transport et de logistique, tout en facilitant l'appropriation de cette nouvelle

énergie sur les territoires. *Infochimie magazine* précise que Haffner Energy reste concentré sur son activité d'équipementier auprès des producteurs d'hydrogène, des énergéticiens voire désormais des collectivités, et n'a pas vocation à devenir un opérateur à part entière.

Le dynamisme du marché attire également des start-up, porteuses de solutions innovantes et prêtes à investir des segments précis, qui sont parfois délaissés par les plus grands groupes. "Les pépites françaises à l'attaque", annonçait ainsi *L'Usine Nouvelle* à l'été 2019, évoquant une "multitude d'acteurs [qui] s'activent sur le territoire pour des solutions industrielles ou en mobilité".

EXEMPLES DE START-UP FRANÇAISES ENGAGÉES DANS L'HYDROGÈNE



Une demande d'hydrogène vert en hausse dans l'industrie traditionnelle

“Dans les vingt prochaines années, l'essentiel de la demande en hydrogène restera l'industrie (chimie, raffinage, acier), bien avant le transport”, affirme *Pétrole & Gaz - Énergies nouvelles* en septembre 2019. Dans ce cadre, l'hydrogène vert pourrait lui aussi prendre de plus en plus de place. **Il sert à “verdir” les productions de méthanol, d'ammoniac ou d'acier**, et à augmenter celles de biocarburants. Cette perspective de “décarboner les secteurs difficiles”, dont font partie les industries de la chimie, de la pétrochimie, de la raffinerie ou de l'aciérie, devient cruciale à l'heure de la transition écologique. L'hydrogène vert leur apporte une solution pour **entamer leur transformation environnementale**. “Les industriels, qui se fournissent en hydrogène noir, pourraient être intéressés par de l'hydrogène vert et même être prêts à le payer plus cher”, affirme Paul Luchesse, directeur général adjoint de l'organisme Capénergies. Le recours à des garanties, comme les certificats d'origine attestant que l'hydrogène est bien vert, constitue un autre moyen d'attirer les industriels consommateurs de ce gaz, estime *L'Usine Nouvelle*.

Les premières initiatives concrètes en provenance de grands industriels commencent à voir le jour partout à travers le monde. Le groupe français Total, au premier plan de ces industries difficiles à décarboner, s'est associé à la société allemande Sunfire, fabricante de systèmes de production de gaz et de carburants renouvelables, qui conçoit entre autres des électrolyseurs. Total a annoncé en 2019 l'installation d'une unité dans l'une de ses raffineries allemandes, à Leuna, pour inaugurer sa production de méthanol vert. “La production de méthanol vert et d'hydrogène à partir d'énergies renouvelables offre de grandes opportunités pour la transition mondiale de l'énergie et des transports”, avait alors déclaré le géant du pétrole. Toujours en Allemagne, le groupe sidérurgique Salzgitter Flachstah a lancé le projet *Salzgitter Clean Hydrogen*, dont l'objectif est de produire de l'hydrogène à partir d'électricité éolienne, puis

de l'intégrer dans l'aciérie du groupe. “Ces activités doivent jeter les bases du déploiement futur de volumes plus importants d'hydrogène afin de **réduire les émissions directes de CO₂ dans la production d'acier**”, détaille un rapport sénatorial s'intéressant au projet. Ce dernier, dont les coûts s'élèvent à 50 millions d'euros, englobe également le spécialiste des énergies renouvelables Avacon Natur, qui construira et exploitera les éoliennes, et le fournisseur d'hydrogène Linde, qui gérera l'approvisionnement en gaz. La production devrait démarrer en 2020. En Suède, le projet HyBrit réunit le groupe minier LKAB et le métallurgiste SSAB, qui ont construit deux usines destinées à entrer en fonctionnement en 2020. Elles produiront de l'acier conçu à partir d'hydrogène vert fourni par l'énergéticien suédois Vattenfall. Aujourd'hui, un tel procédé génère un surcoût de 20 %, mais SSAB estime que la baisse du prix de l'électricité renouvelable et la massification de la production d'hydrogène vert devraient **rendre la manœuvre compétitive entre 2025 et 2035**. Le coût total du projet est estimé à 140 millions d'euros, dont 52 pris en charge par l'Agence suédoise de l'énergie.

Les processus de neutralité carbone s'avèrent cependant complexes à mettre en place et plusieurs entreprises préfèrent avancer à petits pas, investissant d'abord l'hydrogène gris avant de se tourner à l'avenir vers sa version décarbonée. Ainsi, les groupes de sidérurgie ArcelorMittal et Thyssenkrupp ont décidé de franchir une première étape en 2019 en **utilisant de l'hydrogène gris pour remplacer une partie du charbon et du gaz naturel traditionnellement utilisés**. “Nous avons pensé à remplacer le gaz naturel que nous utilisons dans le procédé DRI (réduction directe) par de l'hydrogène vert produit par électrolyse de l'eau. Mais c'est irréaliste à notre échelle. L'électrolyse exigerait 4000 mégawatts (MW) d'électricité. Or le plus grand électrolyseur ne fait que 10 MW. Il en faudrait donc 400!”, se défend Carl De Maré, directeur de la

stratégie technologique d'ArcelorMittal. Thyssenkrupp anticipe cependant une diminution de 19 % des émissions de dioxyde de carbone sur ses sites de production grâce à cette première action. Parallèlement, ArcelorMittal mène aussi des projets de recherche pour remplacer le minerai de fer par de l'hydrogène. L'entreprise investit dans un nouveau procédé qui pourrait rapidement permettre de fabriquer 100 000 tonnes d'acier par an.

65 millions d'euros

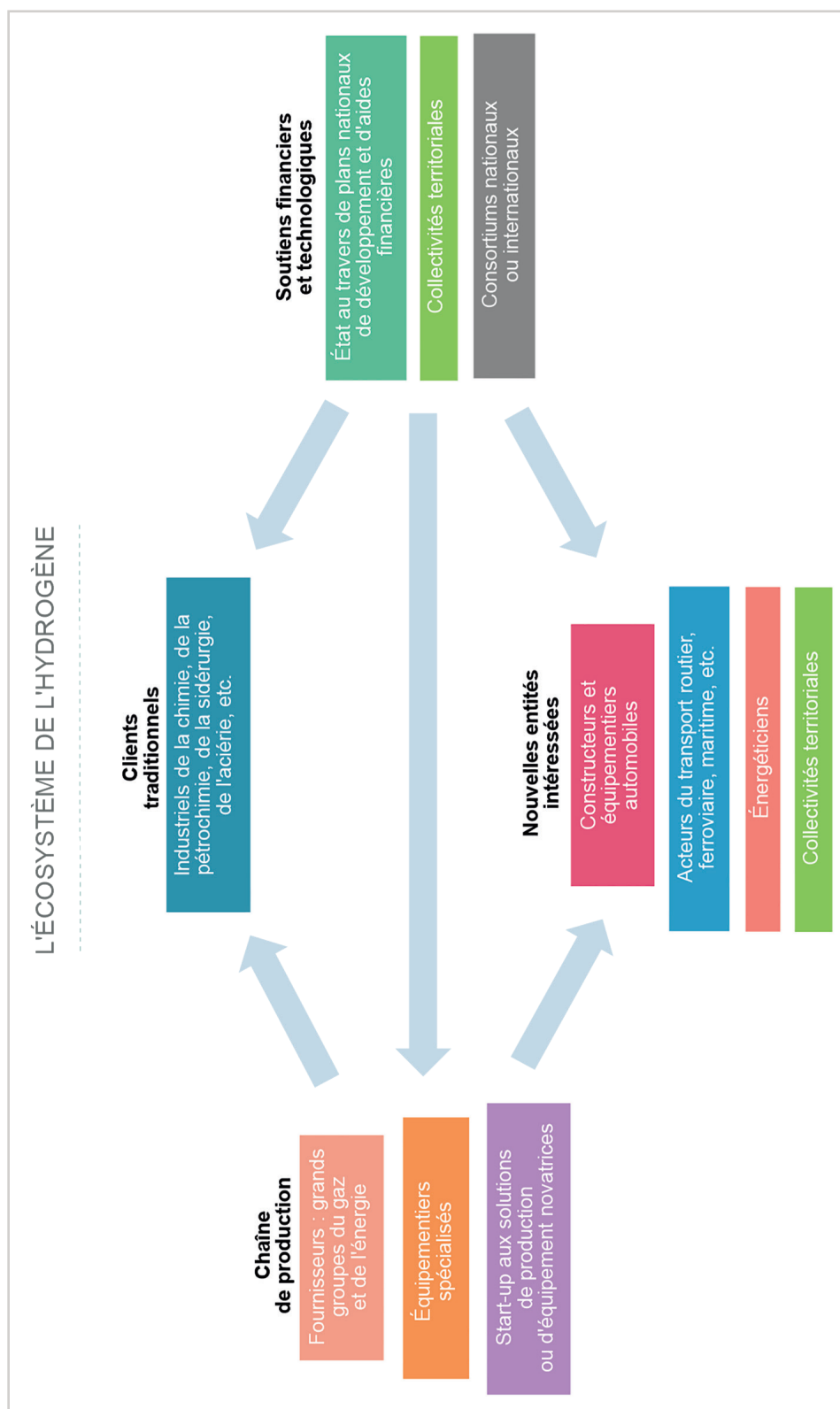
Le montant de l'investissement consenti par ArcelorMittal pour réduire l'utilisation du minerai de fer au profit de l'hydrogène dans sa production d'acier.

L'hydrogène gris sera d'abord privilégié pour des questions économiques, mais il est prévu que l'hydrogène vert soit ensuite favorisé "lorsqu'il sera disponible en quantité suffisante". L'intérêt général porté par l'industrie à l'hydrogène souligne l'avenir très prometteur de ce gaz et justifie **la nécessité d'améliorer rapidement la compétitivité et les capacités de production de sa version verte.**

Un écosystème en pleine transformation, notamment en France

L'essor à venir du marché de l'hydrogène entraîne une transformation conséquente de son écosystème. Jusque-là dominé par quelques producteurs et des clients industriels centrés sur des domaines précis, **il s'ouvre désormais à de nombreux acteurs variés**, impliqués dans l'énergie, les transports, etc. La volonté de produire de l'hydrogène vert favorise également l'implication d'énergéticiens et l'émergence de start-up aux solutions innovantes, qui dynamisent le paysage industriel. Ce constat semble particulièrement valable en France où l'écosystème ne cesse de se renforcer au fil des années, porté par des perspectives de croissance considérables. Dans un rapport commandité par le ministère de l'écologie et le ministère de l'économie sur la filière hydrogène française, les ingénieurs en charge de son écriture notent que "le seul marché français des électrolyseurs, des piles à combustible et des réservoirs pour véhicules électriques à hydrogène pourrait être **de l'ordre du milliard d'euros, à l'horizon 2030**". Les enjeux industriels sont alors décrits comme "très importants", la France

devant rester "dans la course sur une filière technologique potentiellement très porteuse à terme et pour laquelle existent déjà des marchés précoces". **La richesse de son écosystème national**, composé de grands noms mondiaux de la production de gaz et de l'énergie, désormais rejoints par des équipementiers et jeunes pousses entreprenantes, constitue un atout de taille à exploiter pour que la filière atteigne son plein potentiel. Ces enjeux justifient l'implication de l'État, à travers un plan national de soutien, mais également des collectivités territoriales (régions, villes, etc.). En participant à l'apparition de pôles de compétitivité et en s'impliquant dans leurs territoires, elles soutiennent le développement de la filière. En cherchant à améliorer leur bilan énergétique et à faire émerger de nouvelles manières de consommer ou de se déplacer, elles deviennent aussi des clientes pour les industriels. Ce soutien politique doit avant tout viser **la structuration de la filière française et l'adoption d'une gouvernance adaptée à son envolée**, estime le rapport ministériel.



S'APPUYER SUR LE TRANSPORT POUR S'INDUSTRIALISER

Le transport, secteur consommateur de carburant soumis à de forts et urgents impératifs environnementaux, représente un vecteur phare du développement de l'hydrogène, et tout particulièrement de l'hydrogène vert. La massification de la demande dans ses différentes filières favorisera l'industrialisation de cette énergie, en attente de rentabilisation de la production.

Les constructeurs des différentes filières du transport, et leurs fournisseurs, actionnent les leviers de la R&D et des alliances pour développer des engins circulant grâce à l'hydrogène.

À courte échéance, certains moyens de transport s'avèrent plus propices que d'autres à l'essor de l'hydrogène. "Les véhicules légers et les transports en commun propulsés grâce à l'hydrogène pourraient se développer de manière massive à l'horizon 2030. En 2040-2050, ce sont les poids lourds, le fret maritime et le fret aérien qui pourraient utiliser l'hydrogène comme carburant", estimait Clément Le Roy, senior manager et spécialiste du secteur de l'énergie au sein du cabinet Wavestone, dans *Les Échos*, en mai 2019. Déjà, les annonces se multiplient dans le contexte d'un engouement général pour cette énergie.

Automobile, des initiatives, mais un potentiel encore restreint

Une technologie mature, pour un marché en attente de développement

Hype, la première flotte de taxis à l'hydrogène au monde, a été lancée par la STEP (Société du taxi électrique parisien) le 7 décembre 2015, lors de la Cop 21. Financée en partie par la filiale de capital-risque du groupe Air Liquide, Aliad, elle cherche à illustrer **le potentiel de l'hydrogène en tant que carburant alternatif pour l'industrie automobile**. Quatre ans après son lancement, Hype se fixe pour objectif de faire passer sa flotte de 100 à 600 automobiles d'ici fin 2020, symbolisant **l'intérêt actuel autour de cette énergie**.

En effet, "la pile à combustible [...]" a fait apparaître de nouvelles opportunités dans le secteur de la mobilité", ajoutait Clément Le Roy dans *Les Échos*. **La technologie n'est pourtant pas nouvelle**. Depuis une vingtaine d'années, de multiples

projets prédisent l'avènement prochain de la voiture à hydrogène. Le constructeur allemand d'automobiles Mercedes, par exemple, s'y intéresse depuis 1984. Le français PSA, de son côté, travaillait déjà sur un premier concept en 2006. Renault-Nissan, Ford et Daimler avaient également paraphé, en 2013, un accord sur le développement de la pile à combustible en prévoyant la commercialisation de la technologie "en grande série" à partir de 2017.

Mais désormais, pour certains experts et entreprises pionnières, **le temps de la mobilité à hydrogène est enfin venu**. L'innovation est tirée par l'évolution des normes de rejet de CO₂ des véhicules neufs en Europe, et **la fin programmée des véhicules à combustion** dans plusieurs

TECHNOLOGIE

grandes villes du monde. En effet, d'ici 2021, sur le continent européen, le seuil de CO₂ autorisé pour les véhicules neufs sera de 95 grammes par véhicule et kilomètre, avant de baisser de 30 % supplémentaires d'ici à 2030. En France, ce mouvement se traduit par l'objectif du gouvernement de parvenir à une décarbonation complète du secteur des transports terrestres d'ici 2050, selon une disposition introduite en mai 2019 dans la loi d'orientation des mobilités (LOM). La vente de voitures particulières et utilitaires thermiques sera interdite à compter de 2040. Les constructeurs se voient donc contraints de développer et de vendre des véhicules électrifiés. Dans ce contexte, même l'Agence internationale de l'énergie (AIE), longtemps réservée sur l'hydrogène, a publié en juin 2019 un rapport favorable à son utilisation dans les transports.

Mature, la technologie présente des atouts considérables sur le marché du véhicule électrique, en comparaison avec la voiture électrique à batterie. Sur le volet environnemental, en ne rejetant que de l'eau, l'hydrogène paraît moins impactant. De plus, sur le volet technologique, en permettant à un véhicule de rouler sur une distance de 600 à 700 km, l'hydrogène possède une autonomie deux à trois fois plus élevée que celle d'un véhicule électrique à batterie. Son temps de recharge est également beaucoup moins long, de l'ordre de quelques minutes pour l'hydrogène contre plusieurs heures pour les batteries. Enfin, l'hydrogène concentre l'énergie dans une très

LA VOITURE À HYDROGÈNE

Dans les véhicules, l'hydrogène peut être employé de deux manières, comme l'explique Air Products sur son site Internet: soit pour produire de l'énergie via une pile à combustible, soit dans un moteur à combustion interne. Le principe de fonctionnement de la voiture à hydrogène est celui de la pile à combustible et du moteur électrique, explique Futura-sciences.com. Un véhicule à hydrogène est ainsi un véhicule électrique composé de réservoirs à haute pression, d'une pile à combustible et d'un moteur électrique. L'hydrogène est stocké sous haute pression (350 à 700 bars) dans des réservoirs en matériaux composites. Il est injecté dans la pile à combustible, où il réagit avec l'oxygène de l'air pour produire de l'électricité, alimentant le moteur électrique. Cette réaction chimique ne rejette que de la vapeur d'eau, et ne produit donc ni gaz à effet de serre, ni particule. Une partie de l'électricité produite recharge également des batteries qui seront ensuite utilisées en appoint dans les phases d'accélération.

petite quantité. En conséquence, le poids de ce carburant est réduit.

L'Asie joue un rôle moteur sur le marché des voitures à piles à combustible. Avec leurs objectifs respectifs d'un million et 800 000 voitures

COMPARATIF DES MODES DE PROPULSION

	Essence	Batterie	Pile à combustible
Autonomie	800 km	250 km	800 km
Ravitaillement	3 à 4 minutes	10 heures en charge lente 1 heure en charge rapide	3 à 4 minutes
Poids	150 kg	300 kg	150 kg

Traitement IndexPresse. Source : Plastic Omnium, Investir, juin 2018

EXPLOITER UN SECTEUR POUR S'INDUSTRIALISER : LE TRANSPORT

à hydrogène en circulation en 2030, la Chine et le Japon se montrent particulièrement ambitieux. Ces véhicules représenteront une alternative au problème d'autonomie des véhicules électriques avec batteries lithium-ion. À travers le développement de ces flottes, les pays asiatiques souhaitent maintenir leur domination dans le domaine des motorisations alternatives, tout en limitant la pollution dans les métropoles. Les premiers véhicules à hydrogène commercialisés auprès du grand public ont été lancés par le japonais Toyota et le sud-coréen Hyundai, en 2014. Quatre ans plus tard, la Toyota Mirai était la voiture à pile à combustible la plus vendue dans le monde, selon *Sciences et Avenir*. De leur côté, l'Europe et la France ont pour objectif de ne pas se laisser distancer.

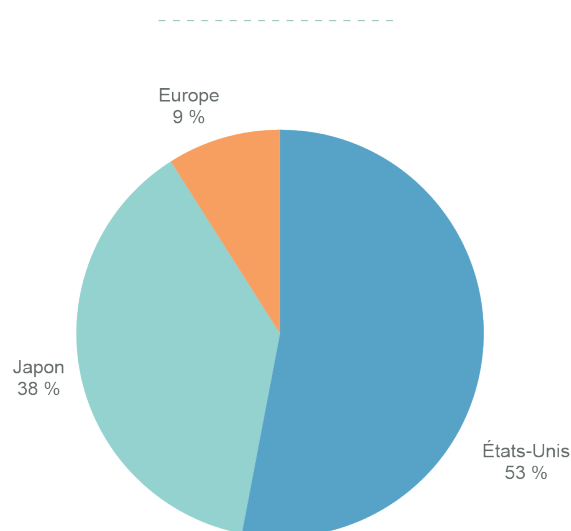
Pour autant, **la flotte est encore très réduite sur le marché mondial**. Certes en hausse de 80 % entre 2017 et 2018, les ventes de véhicules électriques munis d'une pile à combustible hydrogène ont atteint seulement 11 200 unités fin 2018 dans le monde (bus et poids lourds compris), selon l'Agence internationale de l'énergie. La Californie, le Japon, la Corée et l'Allemagne représentent les principaux marchés. Le magazine *Science & Vie* annonçait en juillet 2018 7 000 automobiles vendues dans le monde, dont 160 en France, selon les données d'Hydrogen Council, Biofuel Technologies - Recent Developments et France Stratégie.

Ces chiffres s'expliquent en partie par **la faiblesse de l'offre**. Seules la Toyota Mirai, la Hyundai Nexo, la Mercedes-Benz GLC F-Cell et la Honda Clarity étaient commercialisées sur le marché des voitures particulières, selon *Le Journal de l'Automobile*, en 2018. Ces modèles ne sont, pour le moment,

que "des produits vitrines" destinés à de petits volumes de vente, explique *Le Point*. Ils n'ont pas vocation à concurrencer les modèles électriques à batterie mais à apporter une offre complémentaire et à faire connaître la technologie auprès du grand public.

Cependant, **les perspectives semblent positives à long terme**. Hyundai évalue la demande de véhicules à pile à combustible à environ 2 millions d'unités par an d'ici 2030. Dans le cadre d'une étude commanditée par l'Hydrogen Council, le cabinet américain McKinsey estime que l'hydrogène pourrait alimenter 10 à 15 millions de voitures dans le monde à cet horizon. À plus long terme, en 2050, 113 millions de véhicules à pile à combustible devraient rouler dans le monde, selon une étude publiée par Shell. McKinsey estime qu'à cette date, l'hydrogène pourrait représenter 18 % des véhicules en France.

RÉPARTITION DES 7 000 VÉHICULES À HYDROGÈNE EN CIRCULATION DANS LE MONDE EN 2018



Traitement IndexPresse. Source : Hydrogen Council, Biofuel Technologies - Recent Developments et France Stratégie, *Sciences et vie*, juillet 2018

Un potentiel exploré par l'ensemble des industriels

En 2018 et 2019, les annonces se sont multipliées dans le domaine des voitures à hydrogène. Les leviers actionnés s'avèrent nombreux. L'hydrogène n'en est qu'à ses balbutiements, mais l'ensemble des acteurs de l'industrie automobile, quelle que soit leur position dans la chaîne de valeur (constructeurs, équipementiers et autres fournisseurs), s'y intéressent.

Comptant parmi les constructeurs pionniers du véhicule à hydrogène, le japonais Toyota prévoit **une hausse de ses cadences de production** dès 2020. Il vise la fabrication de 30 000 exemplaires par an de la prochaine génération de sa Mirai, commercialisée en 2020 au Japon. Seulement 3 000 à 3 500 unités étaient produites en 2019. Son concurrent Hyundai nourrit également des objectifs ambitieux autour de son SUV Nexo en annonçant, dès 2018, vouloir devenir le premier acteur sur ce segment de marché en Europe. Dans le cadre de son plan "FCEV Vision 2030", le constructeur vise la production de 500 000 véhicules à hydrogène (voitures particulières et utilitaires) par an, à compter de 2030, grâce à la création d'une nouvelle usine de systèmes de piles à combustible à Chungju, en Corée du Sud. Celle-ci produira déjà 40 000 unités en 2022. À terme, Hyundai prévoit de **commercialiser une partie des systèmes de piles à combustible produits dans cette usine auprès d'autres constructeurs automobiles**, mais aussi des fabricants de drones, navires et autres matériels roulants, d'après le site *autoactu.com*. Dans le cadre de ce plan de développement, Hyundai et ses fournisseurs prévoient des investissements à hauteur de 5,9 milliards d'euros dans la R&D et dans l'agrandissement des installations.

En Europe, les constructeurs semblent moins avancés. L'Allemand BMW, explorant la technologie de l'hydrogène depuis 2006, a annoncé, à l'occasion du Salon de Francfort 2019, vouloir lancer une première petite série dès 2022, sur la base de son SUV X5. Il prévoit son premier lancement en série d'un modèle à hydrogène à compter de 2025. BMW travaille notamment avec Toyota au sein de l'Hydrogen Council (un conseil

mondial réunissant des dirigeants de grandes sociétés de l'énergie, des transports et de l'industrie afin de développer l'hydrogène). De son côté, Audi, marque premium du groupe allemand Volkswagen, a également **signé un partenariat avec Hyundai** dans le domaine des piles à combustible, en juin 2018.

Les Français PSA et Renault misent quant à eux sur **la cible des professionnels à travers leurs modèles**. En effet, à l'occasion de la présentation de la deuxième phase de son plan Push to Pass sur la période 2019/2021, le français PSA a annoncé l'accélération de l'électrification de ses voitures, en partie via l'hydrogène. L'entreprise souhaite développer cette technologie en la destinant aux flottes d'entreprise. Il s'appuie notamment sur l'expertise d'Opel, qu'il a acquis en 2017, et son site de R&D basé en Allemagne, à Rüsselsheim. PSA prévoit d'y introduire en petite série des utilitaires avec pile à combustible. Renault, quant à lui, compte déjà les Renault Kangoo dans son catalogue de véhicules utilitaires roulant à l'hydrogène. Il prévoit également la commercialisation d'un Master Z. E Hydrogen pour 2020. Ces véhicules intègrent la technologie de la jeune société française Symbio.

Cette entreprise, conceptrice de kits de piles à hydrogène, illustre **l'intérêt porté par les équipementiers à l'hydrogène**. Fondée en 2010 sous le nom Symbio FCell, elle est détenue à parts égales, depuis novembre 2019, par le fabricant de pneumatiques Michelin (entré au capital en 2014) et l'équipementier automobile français Faurecia (spécialiste des sièges automobiles, systèmes d'intérieurs et de la mobilité propre). Les deux actionnaires ambitionnent de faire de cette entreprise le leader mondial des systèmes à hydrogène pour la mobilité. Ils orientent leurs stratégies autour de deux axes : **la montée en gamme et l'entrée en phase d'industrialisation**. En octobre 2019, Symbio a notamment présenté un kit destiné à prolonger l'autonomie des véhicules électriques. La gamme, nommée StackPack, se compose d'une pile à hydrogène et de composants pour son fonctionnement. Ils équiperont

notamment la Kangoo ZE Hydrogen et le Master ZE Hydrogen de Renault, en 2020.

Les fournisseurs de l'industrie automobile perçoivent dans le véhicule à hydrogène de véritables opportunités à saisir, et ce à court terme. L'équipementier lyonnais Plastic Omnium, par exemple, fait de cette technologie un de ses axes de développement depuis quelques années. Il perçoit dans les piles à combustible **un relais de croissance**. En effet, le déclin annoncé de la propulsion thermique pourrait avoir des conséquences sur la fabrication de réservoirs, qui représente une de ses principales activités. L'entreprise souhaite fabriquer des piles à combustibles et des systèmes intermédiaires dits de "conversion". En 2018, elle prévoyait **un investissement de 200 millions d'euros dans ce domaine** pour les deux années à venir. Elle a également actionné le levier de **la croissance externe**, en prenant une participation dans la société israélienne

PO-Celltech (productrice de piles à combustibles), dans l'entreprise belge Optimum CPV et la firme suisse Swiss Hydrogen. Elle a aussi créé un centre de recherche dédié en Belgique.

Quelques distributeurs souhaitent également s'impliquer dans le secteur de l'hydrogène, à l'image du groupe Jean Lain, souligne *Le Journal de l'Automobile*. Son dirigeant, Jean-Michel Lain, observait en juin 2019 une transformation dans le secteur. En conséquence, il manifestait sa volonté de participer à la création d'un réseau de stations d'hydrogène. "Nous avons fait l'acquisition de plusieurs Toyota Mirai et Hyundai Nexo, et nous avons également pris des commandes de collectivités et d'entreprise", expliquait le dirigeant. "Nous sommes au début d'une histoire et nous avons hâte de disposer d'une station pour accélérer le mouvement". Toutefois, les exemples de distributeurs automobiles actifs dans la filière de l'hydrogène sont encore peu nombreux.

L'hydrogène, employé par les deux-roues

Plusieurs initiatives apparaissent depuis quelques années dans le secteur des mobilités, afin de développer des deux-roues fonctionnant à l'hydrogène. En 2016, l'entreprise innovante franco-suisse Aaqius a développé une solution sous la forme d'un scooter à hydrogène. Celui-ci a la particularité de se recharger en quelques secondes seulement grâce à une cartouche contenant le combustible sous forme solide, explique *Le Journal de l'Automobile*. En effet, l'entreprise a mis au point un nouveau standard de stockage d'hydrogène basse pression sous forme de cartouche, baptisé STOR-H. Celle-ci sert de réservoir pour l'hydrogène, injecté ensuite dans la pile à combustible pour générer l'électricité alimentant le véhicule. L'entreprise propose notamment la diffusion de ses cartouches dans des distributeurs automatiques. Elle représente ainsi une alternative sur le marché du scooter où, par le passé, Suzuki avait déjà présenté en 2009 un scooter à hydrogène. Toutefois, ce produit, nommé Burgman

Fuel Cell, n'a pas été commercialisé depuis, selon *Le Journal de l'Automobile*.

Le vélo fait également l'objet d'innovations. La start-up française Pragma Industries, implantée à Biarritz et spécialisée dans la production de piles à combustible, a ainsi mis au point le premier vélo électrique propulsé à l'hydrogène. L'entreprise travaille sur ce projet depuis 2013. "Le temps nécessaire pour passer d'une simple idée à une production en série", explique Pierre Forté, ingénieur et cofondateur de la société. Représentant un prix de 7 500 euros, auquel s'ajoutent les 30 000 euros de la mini-station de recharge, ce vélo ne cible pas les particuliers mais les collectivités et les organismes de vélo-partage. Plusieurs agglomérations (Anglet, Bayonne, Biarritz, Cherbourg et Saint-Lô) disposent déjà d'une dizaine d'exemplaires chacune. Toutefois, en augmentant les volumes commercialisés à 10 000 Alpha d'ici deux ans et en optimisant le processus de fabrication, l'entreprise souhaite baisser le prix de l'Alpha à 4 500 euros. Des perspectives naissent déjà à l'étranger, des clients canadiens, allemands et coréens ayant manifesté leur intérêt pour ce vélo.

Un volume encore insuffisant pour une filière hydrogène naissante

Les voitures particulières à pile à combustible représentent encore des freins pour porter l'essor prochain de la filière de l'hydrogène. En premier lieu, **le véhicule à pile à combustible à hydrogène subit la concurrence du véhicule électrique à batterie**. Ce dernier concentre actuellement les efforts d'investissement et de R&D des constructeurs, et possède ses propres atouts. D'un point de vue technique, une batterie traditionnelle prend moins de place dans la voiture qu'un réservoir à hydrogène et qu'une pile à combustible. Le véhicule à batterie consomme également moins de wattheures par kilomètre. En effet, en raisonnant sur un cycle de vie de 200 000 km incluant l'étape de fabrication, le véhicule à batterie consomme une moyenne de 400 wattheures contre 674 wattheures pour l'hydrogène, selon les travaux réalisés par Volkswagen. En conséquence, le constructeur estime qu'"il n'y a pas d'alternative à la mobilité électrique [à batterie] pour les décennies qui viennent", rapporte *L'Usine Nouvelle*.

D'un point de vue économique, il semble également **"difficile pour les constructeurs de conduire les travaux qu'ils ont déjà lancés sur la batterie tout en approfondissant ceux sur l'hydrogène"**, explique Bernard Jullien, maître de conférences à l'Université de Bordeaux. En effet, 225 milliards de dollars d'investissement sont attendus d'ici 2024 autour du seul développement des véhicules à batteries, d'après les chiffres annoncés par la société de conseil américaine AlixPartners.

Certains experts prévoient toutefois **la cohabitation des deux technologies, batterie et pile à combustible**, dans une voiture électrique. "La pile maintiendra le niveau de charge de la batterie et celle-ci délivrera à la demande la réserve d'énergie nécessaire à des à-coups d'accélération", expliquait Ronan Stephan, directeur de l'innovation

chez Plastic Omnium, auprès de *L'Express*, en mars 2019. D'ici à cinq ans, les constructeurs automobiles auront mis au point des châssis intégrant batterie et pile à combustible.

Actuellement, avec des tarifs de l'ordre de 70 000 euros environ pour la Hyundai Nexa et la Toyota Mirai, **le prix à l'achat est encore trop élevé** pour que les véhicules à hydrogène se développent considérablement dans le parc des voitures particulières. Ce montant se justifie par l'emploi de métaux rares, comme le platine, pour la fabrication des piles à combustible. Ainsi, la pile à combustible de la Toyota Mirai coûte 30 000 euros, soit près de la moitié de son prix total. Un véhicule à hydrogène présente un

surcoût d'au moins 20 000 euros par rapport à un modèle thermique équivalent, selon *Sciences et Avenir*. Didier Gambart, PDG de Toyota France, estime qu'à l'avenir le prix de la pile à combustible devrait baisser, jusqu'à être cinq fois moins cher qu'aujourd'hui et représenter un surcoût "acceptable", c'est-à-dire équivalent à celui de l'électrique par rapport au thermique. Mais d'autres spécialistes se montrent moins optimistes. "Je ne

vois pas comment cela pourrait devenir pertinent pour un usage domestique", explique Stéphane Chatelin, directeur de négaWatt, association regroupant des professionnels de l'énergie et des citoyens afin de développer une politique énergétique fondée sur la sobriété et l'efficacité.

À ces aspects s'ajoute la problématique du **coût à l'usage des véhicules à hydrogène**, et donc du coût de cette énergie. Shell prévoit pour la prochaine décennie un coût à l'usage comparable à celui d'une voiture à essence, en tenant compte des économies d'échelles dues à l'industrialisation croissante de la filière hydrogène, ainsi qu'à l'augmentation du prix du pétrole. Mais pour l'instant, d'importants investissements restent

70 000 euros

Le prix à l'achat d'une voiture particulière à hydrogène.

nécessaires pour assurer le ravitaillement d'une flotte de véhicules à hydrogène appelée à croître. Ils concernent d'une part les stations de recharge et d'autre part les infrastructures dédiées à la production d'un hydrogène vert, et tout particulièrement via l'électrolyse de l'eau à partir d'énergie renouvelable. Pour que le secteur automobile améliore son impact environnemental, l'hydrogène utilisé devra obligatoirement être décarboné. Cet impératif a un coût. En conséquence, **avec des volumes restreints, le segment des mobilités individuelles, avec la voiture ou encore le vélo, représente "des cas d'application**

discutables en termes d'efficacité pour justifier des investissements prioritaires", analysait Emmanuel Austruy, partner au sein du cabinet international de conseil en stratégie BCG en mars 2019. Luc Bodineau, coordinateur hydrogène à l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (Ademe), estime ainsi que "le plus opportun aujourd'hui pour l'hydrogène est **le déploiement sur des flottes professionnelles**. À terme il pourra faire partie d'un ensemble de solutions propres. Et on choisira celle qui est la plus adaptée au territoire".

Transports routier, urbain et ferroviaire, des opportunités à grande échelle

Une flotte de camions à hydrogène prévue dès le début des années 2020

Hydrogène et transport routier de marchandises : des intérêts partagés

"À long terme, le transport longue distance représente une piste intéressante pour parvenir à déployer l'hydrogène vert à grande échelle", soulignait Emmanuel Austruy, du cabinet international de conseil en stratégie BCG, en novembre 2019. En effet, **la demande en énergie, à la fois conséquente et planifiable, y favorise la rentabilité des investissements** nécessaires au développement de la filière. Mais au préalable, l'enjeu réside dans le développement d'une flotte de véhicules employant de l'hydrogène. Ainsi, le plan Nicolas Hulot, annoncé à hauteur de

100 millions d'euros en 2019 pour la création d'une filière industrielle décarbonée, vise la mise en circulation de 5 000 véhicules utilitaires légers et 200 véhicules lourds (bus, camions, bateaux, TER) en 2023. Joseph Beretta, président d'Avere-France (Association pour le développement de la mobilité électrique) juge cette intention "cohérente". Partageant cet avis, Fabio Ferrari, PDG de l'équipementier Symbio, a expliqué auprès des *Échos* les raisons de la pertinence de ce plan. D'une part, **"démarrer la filière hydrogène par des véhicules utilitaires a débloqué**

la situation car cette solution permet de mettre en place des stations à hydrogène très vite rentables. Or, **le succès de l'hydrogène repose sur cette capacité à développer les deux en parallèle, véhicules et infrastructures"**.

1 camion sur 5

La proportion de poids lourds à l'hydrogène dans le monde en 2050.

Source : McKinsey.

D'autre part, du fait de sa grande autonomie et du faible temps de charge, **l'hydrogène répond aux besoins des secteurs employant des véhicules utilitaires et professionnels**. La technologie est également un atout pour les transports lourds, tels que les camions, pour lesquels "le système de batteries n'est pas le mieux adapté", constatait Pierre-Étienne Franc, directeur de l'activité Énergie hydrogène du groupe gazier Air Liquide, auprès d'*Investir*, en 2018.

Une offre en construction

Les constructeurs de poids lourds sont déjà engagés dans la conception de véhicules à hydrogène. Ils ciblent les segments des véhicules destinés aux zones urbaines et opérant dans la grande distribution, la construction et la collecte des déchets. Toyota, par exemple, perçoit de multiples opportunités pour les véhicules électriques entièrement fondés sur les piles à combustion "de la semi-remorque en passant par la camionnette de livraison", explique Stephan Herbst, General Manager chez Toyota Motor Europe. "Pour résumer notre stratégie, on peut dire que tout ce qui circule aujourd'hui à l'essence passera au moteur à batteries électriques, et que tout ce qui fonctionne au diesel passera à la technique des piles à combustible", ajoute-t-il.

Toutefois, de nombreux projets n'en sont encore qu'à **l'étape de l'expérimentation ou seulement aux prémices de leur entrée sur le marché**. En conséquence, l'offre de camions à hydrogène est inexistante en série en 2019, selon les observations de Denis Benita, responsable véhicules lourds au sein du service transport de l'Ademe. Toyota a par exemple présenté un nouveau prototype de camion à pile à combustible, en 2018, nommé Project Portal 2.0. Il fait suite au poids lourd Alpha, mis en service en avril 2017 dans le cadre d'essais classiques et d'opérations de transport sur courtes distances dans les ports de Long Beach, Los Angeles et aux alentours. L'Alpha avait notamment pour objectif de valider la faisabilité de l'emploi d'un camion de ce type. Le Project Portal 2.0 assurera les mêmes tournées que son prédécesseur, mais cette fois **dans le but d'étudier la viabilité commerciale**.

L'ÉQUIPEMENTIER BOSCH DONNE LA PRIORITÉ AUX VÉHICULES LOURDS

La stratégie de l'équipementier automobile allemand Bosch illustre l'opportunité représentée par le secteur des véhicules utilitaires. Il s'est associé au suédois PowerCell Sweden AB afin de mettre sur le marché une pile à combustible d'ici 2022. Son objectif consiste à équiper les camions dans un premier temps, puis d'appliquer la technologie aux voitures quand les coûts auront diminué.

Source : Association française pour l'hydrogène et les piles à combustibles (Afhypac), 2019.

Pour développer leurs solutions, **les constructeurs nouent des partenariats**. Le groupe italo-américain CNH industrial, maison mère des entreprises italiennes Iveco (constructeur de véhicules industriels et bus) et FPT Industrial (motoriste), s'est par exemple rapproché de Nikola Motor. En septembre 2019, il a pris une participation de 250 millions d'euros au sein du concepteur américain de camions hybrides. L'opération a abouti à la création d'une joint-venture dédiée aux camions électriques et hydrogène. Les deux partenaires souhaitent s'adapter aux exigences environnementales du marché européen. "Nous considérons que 20 à 25 % des camions lourds que nous proposerons en 2025 devront avoir une motorisation alternative. Cela ne sera possible qu'avec 15 % de camions GNV, un modèle que nous proposons déjà, mais aussi avec 8 à 10 % de camions électriques", a expliqué Gerrit Marx, président commercial de CNH Industrial. Ce dernier a annoncé, en décembre 2019, la commercialisation d'un prochain camion électrique et hydrogène, à partir de 2021, sur le marché européen. Baptisé Nikola Tre, il bénéficiera d'**une conception modulaire afin d'adapter les packs de batterie et de réservoirs à hydrogène** selon les missions des clients.

En France, la société Chereau, spécialiste de la carrosserie frigorifique, a présenté en juillet 2019 le premier semi-remorque frigorifique à hydrogène du monde, sur son site de Ducey en Normandie.

Son système frigorifique fonctionne à l'hydrogène et non au gasoil. Baptisé Road (pour *Refrigerated optimized advanced design*) et lancé en 2016, le projet a **réuni plusieurs partenaires**: Amvalor (entreprise favorisant et développant les relations entre laboratoires et entreprises en quête de solutions technologiques innovantes), FC Lab (fédération de recherche du CNRS), Carrier Transicold (fournisseur d'équipements et services destinés au transport frigorifique et à la traçabilité de la chaîne du froid), Malherbe (transporteur de marchandises), Tronico (spécialisé dans la conception, industrialisation et fabrication de produits complexes à dominance électronique) et les pôles Véhicule du Futur, Mov'eo et ID4Car. Il a également bénéficié des compétences de la start-up H2SYS, spécialisée dans la production de groupes électrogènes à hydrogène. L'innovation repose sur la combinaison de trois piles à combustible permettant d'augmenter l'efficacité énergétique, la durabilité et de réduire les coûts, commente *Les Échos*. Le projet a notamment été soutenu à hauteur de 5,5 millions d'euros par l'État ainsi que par les régions Bourgogne-Franche-Comté et Normandie.

Les énergéticiens prennent également place dans ces alliances, à l'image du groupe Engie. Le Français a conclu un partenariat avec la compagnie minière Anglo American, en 2019, en vue du co-développement d'un premier camion de transport minier fonctionnant à l'hydrogène. Engie fournira les solutions de production d'hydrogène et Anglo American développera le véhicule, en remplaçant le réservoir de carburant diesel du camion minier par des réservoirs d'hydrogène, et le moteur par des piles à combustible et des batteries. La commercialisation du véhicule est prévue pour l'année 2020 selon *Pétrole & Gaz - Énergies nouvelles*. Il fera d'abord l'objet d'un essai à la mine Mogalakwena Platinum Group Metals d'Anglo American (Afrique du Sud) avant d'être dupliqué sur d'autres sites du groupe.

Hyundai s'appuie également sur son réseau de partenaires, y compris des énergéticiens. Le groupe sud-coréen semble être l'un des acteurs les plus avancés sur le marché des camions à hydrogène avec l'annonce de la commercialisation

de son Hyundai H2 Xcient en Europe à partir de 2020. Il prévoit, en 2020, la mise sur le marché de 50 camions en Suisse. Ces derniers sont alimentés par une pile à combustible à hydrogène de 190 kW et sept réservoirs d'hydrogène offrant une autonomie d'environ 400 km. L'énergie est fournie par le suisse Hydros spider, une entreprise détenue par Alpiq (fournisseur d'énergie verte) et H2 Energy (distributeur), ainsi que par le spécialiste allemand des gaz Linde. *L'Officiel des transporteurs* annonçait la mise en service d'un premier site de production de 2 MW, fin 2019, à la centrale hydroélectrique de Gösgen afin de produire l'hydrogène de 50 camions. Ces derniers seront employés par un consortium d'entreprises suisses regroupant de grands distributeurs et propriétaires de stations-service. Pour assurer la mise sur le marché de ses camions, Hyundai a créé une joint-venture avec H2 Energy. Baptisée Hyundai Hydrogen Mobility (HHM), celle-ci se fixe l'ambitieux objectif de **"prendre la tête de l'écosystème de la mobilité hydrogène en Europe"**. À l'avenir, HHM souhaite mettre en place d'autres partenariats en Allemagne, aux Pays-Bas, en Autriche et en Norvège, pour poursuivre son développement sur de nouveaux marchés nationaux.

Les camions en série des constructeurs européens sont attendus plus tardivement. L'allemand Mercedes-Benz Truck prévoit par exemple le lancement de son Actros à hydrogène en 2025, après le début de la production d'Actros électriques de série à compter de 2021. **Désireuse d'accélérer la mise sur le marché de camions à hydrogène européens, l'Union européenne a investi 12 millions d'euros dans le projet H2Haul.** Lancé en octobre 2017, il réunit un consortium d'entreprises et d'organismes de recherche. Ce programme prévoit l'essai de trois nouveaux types de poids lourds à hydrogène lancés par les constructeurs européens VDL et Iveco, auprès d'industriels et de distributeurs européens. Les enseignes Carrefour, Coop et Colruyt, ainsi que les transporteurs Chabas et Perrenot, emploieront ces camions. Les groupes BMW et Air Liquide participent également au projet. H2Haul vise le déploiement de seize véhicules en France, en Belgique, en Allemagne et en Suisse.

Une offre sujette à la problématique des coûts des transporteurs routiers

Le succès du marché des camions à hydrogène, et par conséquent la demande en hydrogène dans le secteur du TRM, sera **conditionné par leur intégration dans la flotte des transporteurs**. Or, "ce qui est sûr, c'est qu'il n'est pas possible de répliquer cette technologie pour les transporteurs immédiatement", expliquait en 2019 Luc Bodineau, ingénieur spécialisé dans l'hydrogène au sein du service recherche et technologies avancées de l'Ademe. "Cette technologie n'est pas encore compatible avec le système économique des transporteurs dès demain", ajoutait-il.

En effet, **les coûts d'acquisition des véhicules et d'installation des stations** représentent encore un frein. Ainsi, les transporteurs hésiteront à investir s'ils n'ont pas de garantie du TCO (*Total cost of ownership*, ou coût global d'exploitation d'un véhicule commercial pendant tout son cycle de vie). Actuellement, sur le segment des véhicules utilitaires, le TCO d'un véhicule à hydrogène est de 10 à 30 % supérieur à celui d'un véhicule diesel, en tenant compte des aides de l'État, selon les études réalisées dans ce domaine. Mais "l'hydrogène est envisageable dans certains cas où cette solution peut être privilégiée pour une question d'image", précise Luc Bodineau. Pour les véhicules lourds, la situation est différente. "Nous sommes effectivement au tout début de la courbe des coûts et donc du prix d'acquisition et de fonctionnement. Il n'y a pas de verrou technique, mais un effet coût, et le rôle des pouvoirs publics va consister à le faire baisser par un effet de volume", note l'expert de l'Ademe. Le plan de l'État permettra alors de donner de la visibilité à l'offre existante. Parallèlement, l'Ademe accompagnera les offres paraissant "crédibles" afin qu'elles s'insèrent sur le marché. Toutefois, la filière devra se faire sa place sur le marché du transport routier de marchandises (TRM), comme les camions GNV au départ. Selon les experts de l'Ademe, l'hydrogène possède un potentiel, mais **à condition de répondre à quelques recommandations de base**: une production faite au moyen d'une électrolyse dont l'énergie est fournie par

l'énergie renouvelable, ainsi qu'une production et une consommation locales, afin d'éviter les coûts engendrés par le transport en camion ou par tube. Car pour l'instant, le rendement de l'hydrogène reste inférieur à celui de la batterie électrique seule.

La problématique des coûts n'est pas oubliée des constructeurs, à l'image de CNG et Nikola. Bien que le prix de leur futur Nikola Tre n'ait pas encore été révélé, *L'Officiel des transporteurs* annonce déjà qu'il est possible que le camion soit commercialisé sous une forme locative, carburant compris.

LA PROBLÉMATIQUE DU COÛT D'ACQUISITION

Auteur d'un rapport analysant l'impact positif de la décarbonation des poids lourds dans l'Union européenne, la Fondation européenne pour le climat (FEC) constate que le prix d'achat des véhicules reste élevé, quel que soit le type de carburant (camion électrique classique à batterie, à moteur thermique, à hydrogène, ou sur route électrique). Le prix ne constitue pas à lui seul un frein à l'achat d'un véhicule selon l'organisation. Le choix de la motorisation doit s'appuyer sur le coût de l'utilisation totale. Les progrès technologiques étant rapides, le coût d'exploitation d'un véhicule électrique deviendra vite compétitif par rapport à un véhicule diesel avant 2030, à la condition que le prix des batteries continue de décroître. Un véhicule à hydrogène, quant à lui, demeurera plus cher que le camion électrique jusqu'en 2050. Il sera toutefois intéressant sur de longues distances.

Source : *L'Officiel des transporteurs*, septembre 2018.

2019-2020 : le déploiement des réseaux de bus à hydrogène

L'hydrogène suscite l'intérêt des collectivités locales

"Sur l'hydrogène, la filière bus est plus avancée que celle du camion, comme c'est le cas pour la plupart des autres énergies", observe Denis Benita, responsable véhicules lourds au sein du service transport de l'Ademe. Cela s'explique en partie par "la volonté politique, qui peut l'emporter sur des aspects purement économiques".

En effet, l'année 2019 a été marquée par l'entrée en service de plusieurs bus à hydrogène dans les réseaux de transport en commun d'agglomérations françaises. En la matière, le Syndicat mixte des transports Artois-Gohelle (SMT AG), dans le Pas-de-Calais, se montre précurseur de ce service de mobilité innovant. À l'occasion de l'inauguration de sa station de production et de distribution d'hydrogène, le 21 juin 2019, le SMT AG a annoncé l'intégration de six bus à hydrogène dans son réseau Tadao, exploité par Transdev. Ils prendront place sur une ligne de bus à haut niveau de service, d'une longueur de 13,4 km. La flotte devrait parcourir 420 000 km par an, tout en économisant 530 tonnes de CO₂ durant la même période. Ailleurs en France, d'autres projets ont été inaugurés : le 12 septembre 2019 en Île-de-France, sur la ligne reliant Versailles à Jouy-en-Josas, et le 14 septembre 2019, à Pau.

Au cours de l'année 2019, 17 bus à hydrogène ont ainsi été mis en service dans l'Hexagone sur les **44 actés d'ici à 2021**, selon les chiffres de l'Association française pour l'hydrogène et les piles à combustible. L'Union des groupements d'achats publics (UGAP) s'apprête à lancer, début 2020, une démarche d'achat groupé pour agréger les demandes des collectivités intéressées. Son appel d'offres table sur 1 000 bus d'ici à 2024. En effet, tout comme sur les segments de

l'automobile et des véhicules utilitaires et poids lourds, l'hydrogène présente des atouts pour le secteur des transports en commun. Les bus à hydrogène ne nécessitent pas d'arrêt obligatoire en bout de ligne pour être ravitaillés en énergie. Leur autonomie est suffisante pour assurer une journée de service sans recharge. Enfin, le remplissage du réservoir demande peu de temps.

Le Made in France privilégié ?

Les bus à hydrogène font naître **des opportunités pour les entreprises françaises**, à l'image de Safra, fournisseur des six bus exploités par SMT AG et son opérateur Transdev. La société implantée à Albi, dans le Tarn, a été fondée en 1955 en tant qu'entreprise de carrossage d'autocars sur châssis cabine. Elle a ensuite réussi le pari de se diversifier en tant que fabricant et distributeur d'autobus urbains, sous le nom Businova. Ces derniers sont proposés en 4 motorisations : électrique hybride rechargeable, 100 % électrique recharge lente ou recharge rapide, et hydrogène. Elle réalise désormais un chiffre d'affaires de 23 millions d'euros pour 190 salariés.

Son PDG, Vincent Lemaire, se réjouissait, en 2019, auprès de *La Dépêche*, de **la réussite de ce projet 100 % français**. En effet, les piles à combustible employées dans ses bus proviennent de la société Symbio. La station hydrogène du projet est exploitée par Engie, via sa filiale GNVert, et l'hydrogène est produit via un électrolyseur de la société McPhy. "On joue dans la cour des grands", a souligné Vincent Lemaire. Alors que le marché des véhicules à hydrogène est dominé par les pays asiatiques, **Safra espère que les collectivités publiques feront le choix du Made in France dans leurs prochains projets**.

Toutefois, la communauté d'agglomération de

1 bus sur 4

La proportion de bus fonctionnant à l'hydrogène dans le monde en 2050.

Source : McKinsey.

Versailles Grand Parc et l'agglomération de Pau se sont tournées vers la société belge Venhool pour équiper leurs flottes de bus à hydrogène. Cette entreprise se développe depuis de nombreuses années. Bien représentée sur le marché, elle a vendu 50 bus à hydrogène en Europe et aux États-Unis entre 2003 et début 2018, selon *Trends*. À cette date, elle prévoyait la livraison de 48 autres véhicules (tram-bus et bus) à partir de 2019. De son côté, la RATP a annoncé, en novembre 2019, le lancement de l'expérimentation d'un premier bus à hydrogène, fin 2020, avec un véhicule fourni par le Portugais Caetano.

Pour autant, les perspectives sont déjà positives pour l'entreprise française Safran. Grâce aux nouvelles commandes enregistrées auprès des collectivités locales désireuses de développer des flottes propres, **elle se fixe l'objectif de créer 300 emplois d'ici cinq ans et de construire 250 businovas par an**, toutes motorisations confondues.

L'intérêt porté aux bus à hydrogène dans divers pays du monde favorise **la conclusion de contrats sur les marchés étrangers**. L'équipementier français Plastic Omnium a ainsi remporté un contrat portant sur 5000 réservoirs auprès d'un constructeur allemand pour équiper 1000 bus. Pour honorer ses commandes, l'entreprise prévoit un investissement de 5 à 7 millions d'euros supplémentaires dans son usine d'Herentals, en Belgique. "Nous avons une trentaine de cotations en cours pour des constructeurs, sur des réservoirs de bus et de camions, et même de voitures particulières", notait Ronan Stephan, le directeur scientifique de Plastic Omnium dans *Les Échos*, le 4 décembre 2019. "Tout le monde s'y met, le marché a vraiment bougé en deux ans", ajoutait-il.

Un TCO encore élevé

Le développement de lignes de transport en commun roulant à l'hydrogène représente toutefois **un investissement important pour les collectivités locales**. La mise en place de sa flotte de bus à hydrogène a coûté 12,9 millions d'euros au SMT AG. Les bus ont un prix unitaire de 650 000 euros, auquel s'ajoute un contrat de maintenance de 200 000 euros. La station à hydrogène, quant à elle, coûte 9 millions d'euros, selon le site *busetcar*.

L'INTÉRÊT DES CONSTRUCTEURS ACTIFS DANS L'HYDROGÈNE POUR LE SEGMENT DES BUS

Toyota a annoncé le lancement d'un bus à hydrogène à l'occasion des Jeux Olympiques de Tokyo en 2020. Hyundai, quant à lui, prévoyait en 2018 la mise en circulation de 1 000 véhicules de ce type en Corée du Sud d'ici 2022. À cette date, l'Allemand Daimler vise également le développement d'une offre de bus sur le segment de l'hydrogène, en proposant un prolongateur d'autonomie à hydrogène optionnel sur son modèle Citaro.

Source : L'Officiel des transporteurs.

com. De son côté, le projet de Pau a représenté un investissement de 10 millions d'euros pour les bus et 4,5 millions d'euros pour la station hydrogène, conçue par Engie et ITM Power, selon le site *BFMTV*. Le projet est notamment financé par le versement Transport, une taxe versée par les employeurs de plus de 10 salariés et affectée au service public des transports urbains.

Or, sur le segment des bus, **l'hydrogène représente un TCO (Total Cost of Ownership ou Coût total de possession) deux fois plus élevé que celui du diesel**, selon une étude de l'Ademe commentée par Luc Bodineau et Denis Benita. À l'inverse, "tous les autres modes (comme l'hybride, le gaz ou les bus électriques à batterie) s'avèrent déjà compétitifs par rapport aux bus diesel, avec un coût d'utilisation identique à 12 ans d'utilisation", note Denis Benita.

Les expérimentations lancées en 2019 portent les espoirs du développement de la filière hydrogène dans les transports en commun. Elles permettront de tester les performances, la consommation réelle et les coûts de maintenance de flottes à hydrogène. "D'autres pays et continents du monde, à l'instar de l'Islande qui propose des bus à hydrogène quotidiennement dans ses artères, ont démontré que ce type de mobilité tenait toutes ses promesses", observe un article proposé par La Macif au sein du journal *Les Échos*.

Le train, futur grand consommateur d'hydrogène ?

La conclusion de **la vente de 27 trains à l'Allemagne, en mai 2019, par l'industriel français Alstom a été un signal fort** pour le développement de l'hydrogène dans le secteur du transport ferroviaire. Cette annonce a été particulièrement remarquée en raison **de l'important volume d'hydrogène qui pourrait être employé dans les trains**. "Alors qu'une voiture transportera 5 kg d'hydrogène pour parcourir 600 kilomètres, par exemple, un train en consommera 160 à 200 kg par jour, pour une distance comparable [400 à 600 km selon le profil de la ligne]", expliquait Yannick Legay, directeur technico-commercial d'Alstom, dans *L'Usine Nouvelle*, en juillet 2019. "Et le train, c'est tous les jours, les besoins sont donc prévisibles, tout comme ils sont géolocalisables", ajoutait-il.

Le contrat conclu par Alstom avec l'Allemagne représente l'aboutissement de plusieurs années de développement. Son train Coradia iLint a été présenté en 2016 au salon Innotrans de Berlin, avant le lancement d'un premier prototype, en 2017. Deux premiers engins ont par la suite été mis en service en Allemagne, en Basse-Saxe, en septembre 2018. Sa nouvelle commande représente une vente de 360 millions d'euros pour la livraison de ses 27 engins, d'ici 2022, à Fahma, une filiale du réseau de transports en commun allemand Rhein-Main-Verkehrsverbund (RMV). **Ces trains sont destinés à remplacer ceux fonctionnant au diesel** dans le land de la Hesse. Ils seront munis de piles à combustible et utiliseront de l'hydrogène pour produire de l'électricité, consommée pour la traction ou les équipements à bord. Elle sera stockée dans des batteries lithium-ion récupérant également de l'énergie au freinage. La pile est développée par le canadien Hydrogenics. Les batteries lithium-ion, quant à elles, proviennent de l'allemand Akasol. "Outre les trains, la commande comprend également la fourniture d'hydrogène, la maintenance et la mise à disposition de capacités de réserve pour les 25 prochaines années", a indiqué Alstom dans un communiqué. Pour cela, le Français fera appel à Infraser GmbH & Co. Höchst KG, exploitant du

parc industriel de Höchst et prestataire pour les secteurs de la chimie et des sciences de la vie.

Les débuts du train à hydrogène Coradia iLint, en Allemagne, ont coïncidé avec "une appétence nationale et internationale pour l'hydrogène, symbolisant l'après-pétrole", note Yannick Legay. **En France, il a également suscité l'intérêt de l'opérateur ferroviaire SNCF**. Ce dernier se fixe l'objectif de remplacer ses trains diesel au cours des 15 prochaines années, annonçait Guillaume Pepy, alors président de l'opérateur français de transport ferroviaire, en août 2019. Au total, 20 % de son parc est encore représenté par des locomotives diesel, soit 12 000 trains diesel en circulation d'après Alstom. L'opérateur a alors annoncé son souhait de commander une quinzaine de trains à hydrogène auprès de l'industriel. Dans ce cadre, **les premiers essais des TER à hydrogène sont prévus pour 2021**. Ils seront déployés parallèlement au TER hybride et aux recherches sur les biocarburants.

LES MOTEURS DU DÉVELOPPEMENT DE L'HYDROGÈNE DANS LE TRANSPORT FERROVIAIRE :

- L'orientation du marché vers un trafic zéro émission.
- L'augmentation des prix du gazole et de l'énergie de traction électrique à moyen et long terme, renforcée par la demande du secteur automobile et la propulsion électrique.
- La réglementation relative à la réduction des nuisances sonores.
- L'urbanisation progressive nécessitant plus de mobilité.

Source : Revue générale des chemins de fer, septembre 2019.

Ce développement nécessite la mobilisation des régions. En France, 50 % des lignes sont électrifiées. Il faut donc parvenir à développer des trains bimodes, c'est-à-dire électriques et à traction autonome avec l'hydrogène. Or, la mise au point d'une telle technologie est coûteuse. **"Plus il y aura de régions [demandeuses], plus nous pourrons faire baisser le coût de ce train** qui sera une déclinaison du Régiolis Coradia polyvalent", explique Yannick Legay, directeur technico-commercial d'Alstom. Ce train sera doté de piles à combustible, réservoirs à hydrogène et batteries. À terme, le constructeur vise une différence de coût de 30 à 50 % par rapport au train électrique.

Les régions Auvergne-Rhône-Alpes, Bourgogne-Franche-Comté, Grand Est, Provence-Alpes-Côte d'Azur et Occitanie font partie des régions intéressées par la technologie. Parmi elles, **l'Occitanie s'est positionnée comme un précurseur, en votant un plan de 150 millions d'euros sur la période 2019-2030**, avec pour finalité le développement d'une filière hydrogène vert sur son territoire. Elle entend acquérir trois rames sur les 15 annoncées par l'ensemble des régions françaises. Elle souhaite aussi se doter d'usines et de stations de production d'hydrogène vert, et d'électrolyseurs.

Le calendrier d'Alstom vise l'essai d'un train à hydrogène en 2022, puis **d'un premier service commercial en 2023-2024**. Ces projets contribueront à la décarbonation de l'ensemble du ferroviaire français d'ici 2035. **Il n'est pas encore certain que l'hydrogène sera la solution retenue en majorité**. "Il faut que les régions, les opérateurs, les agences de certification soient convaincues par l'hydrogène pour transporter des voyageurs tous les jours. Pour les convaincre, il faut plus d'un ou deux trains, surtout s'ils ne sont pas en France. Il nous faudra quatre ans d'expérience préalable à cette décision avec une flotte d'une vingtaine de trains", explique Yannick Legay.

La massification de la demande en train à hydrogène aurait également un grand intérêt pour la production d'un hydrogène vert. Dans un premier temps, la flotte déployée en Allemagne se ravitaillera en hydrogène gris, peu coûteux et moins cher que le diesel. Mais la mise en place d'une unité d'hydrogène vert est prévue d'ici 2021, d'après le dirigeant d'Alstom. La massification de la demande, couplée à la production et la distribution locale, permettrait d'atteindre 4,50 euros le kilo d'hydrogène, soit un prix comparable au coût d'exploitation d'un train diesel en 2019, selon l'expert.

LES GAINS DE L'INTÉRÊT PORTÉ À L'HYDROGÈNE PAR LE SECTEUR FERROVIAIRE :

- Des points de distribution d'hydrogène ferroviaire en nombre limité, voire unique, à la différence du secteur routier.
- Une consommation importante en volume, régulière et prévisible.
- Une massification de la production d'hydrogène vert, localement, à partir d'une source d'eau et d'électricité provenant d'énergies renouvelables.

Source : Revue générale des chemins de fer, septembre 2019.

Transports maritime et aérien, des segments à développer

Transport maritime : une technologie à améliorer

Le maritime et l'aérien représentent des modes de transport à potentiel pour la filière de l'hydrogène au vu des projets en cours. Toutefois, les voies d'amélioration y sont encore considérables.

Tout en se préparant à une hausse de trafic de marchandises de 3,8 % par an d'ici 2023, selon la Conférence des nations unies sur le commerce et le développement (Cnuced), **le secteur du transport maritime mène une réflexion en vue d'un basculement vers le zéro carbone**. L'Organisation maritime internationale (OMI) a en effet fixé, en avril 2018, une division par deux des émissions de CO₂ d'ici à 2050. Si des armateurs tels que CMA CGM, Ponant ou encore Brittany Ferries optent pour le gaz naturel liquéfié (GNL) dans le cadre de leur stratégie écologique, les regards se tournent également vers l'hydrogène en tant que carburant alternatif. Interrogé par *Industrie & Technologies*, Jean-Marc Roué, président d'Armateurs de France, expliquait en septembre 2019 : "L'utilisation de l'hydrogène énergie est une autre

piste, soit via une pile à combustible transformant l'hydrogène en électricité, soit directement avec un moteur à combustion à hydrogène." Ce vecteur énergétique représente **une alternative sérieuse** parmi les diverses solutions envisagées (biogaz, méthanol, batteries, voiles).

En France, **plusieurs projets sont menés dans diverses régions** en vue de l'emploi de l'hydrogène dans le secteur maritime ou fluvial, que ce soit pour le transport de marchandises ou de personnes : en Normandie (projet d'un bateau de pêche à Cherbourg, dans la Manche, pour les Chantiers Allais); dans les Pays de la Loire (navettes fluviales et bateaux de pêche); en Nouvelle-Aquitaine (navette maritime dans le port de La Rochelle, en Charente-Maritime); ou encore en Provence-Alpes-Côte d'Azur (navette maritime de 200 passagers). Mis à l'eau en 2017, le navire Energy Observer représente une avancée remarquable dans ce domaine. L'entreprise du même nom supportant le projet le qualifie de

LE MÉTHANE, PRINCIPAL CONCURRENT DE L'HYDROGÈNE DANS LA FLOTTE MARITIME

Deux grandes solutions alternatives aux énergies fossiles s'affrontent dans le secteur du transport maritime : le méthane et l'hydrogène. Les armateurs semblent avoir une préférence pour le méthane, en développement, et intègrent dès à présent des navires brûlant du gaz naturel liquéfié (GNL) au sein de leur flotte. Aujourd'hui d'origine fossile, ce méthane pourrait à l'avenir être issu de la biomasse ou de la méthanation de l'hydrogène obtenu via de l'électricité renouvelable. Ainsi, les navires acquis dès à présent et naviguant au méthane fossile n'auraient pas besoin d'être modifiés pour employer à l'avenir du méthane vert. Toutefois, même s'il est d'origine non fossile, le méthane émet du CO₂ et rencontre un problème de disponibilité en ce qui concerne la biomasse.

Source : Alternatives Économiques, août 2018.

“premier navire à hydrogène autour du monde”. Né à Saint-Malo, ce programme vise à expérimenter et améliorer les technologies embarquées à bord d'un catamaran, qui représente un véritable laboratoire flottant. Il s'agit d'un ancien bateau de course reconditionné avec une propulsion électrique mixant énergies renouvelables et un système de production d'hydrogène décarboné à partir d'eau de mer. Il est ainsi le **premier navire hydrogène visant l'autonomie énergétique, sans émission de gaz à effet de serre ni particules fines**. Energy Observer vise à prouver aux citoyens, décideurs et entreprises que la transition énergétique est possible, et en cours. Pour cela, le navire fera découvrir les solutions innovantes pour l'environnement à travers 101 escales dans 50 pays, en six ans.

D'autres initiatives naissent à travers le monde.

En septembre 2019, le port d'Anvers a commandé la construction d'un remorqueur alimenté à l'hydrogène. Baptisé Hydrotug, ce bateau sera construit par la Compagnie maritime belge (CMB). Des moteurs à combustion alimentés par de l'hydrogène combiné à du gazole l'équiperont. Le remorqueur combinera la technologie du double carburant avec un filtre à particules

et un catalyseur répondant aux normes environnementales les plus strictes. Opérationnel d'ici 2021, l'Hydrotug fait partie d'un programme de verdissement de la flotte du port. De son côté, le laboratoire américain Sandia National Laboratories et ses partenaires évaluent la faisabilité technique, réglementaire et économique d'un navire de recherche côtier, le Zero-V, fonctionnant avec une pile à combustible à hydrogène, annonce *Le Journal de la Marine marchande*. L'armateur islandais Samskip, quant à lui, dirige un projet visant à développer deux navires électriques utilisant des piles à hydrogène pour leur propulsion. En Norvège, MAN Cryo, filiale de MAN Energy Solutions, développe un moteur commercial de navire avec de l'hydrogène liquéfié pour le conglomérat de transport Fjord 1 et Multi Maritime Norvège.

Toutefois, **la technologie n'en est qu'à ses débuts et doit s'améliorer**. La faible densité énergétique de l'hydrogène ne permet pas de répondre aux exigences de poids et de charge des bateaux employés pour le transport maritime. Selon la profession, **les réservoirs occupent trop de place sur les navires**. “Si je devais aujourd'hui propulser l'un de mes navires de 27 000 chevaux à l'hydrogène,

Transport fluvial

Avec la mise en service de sa navette fluviale propulsée à l'hydrogène nommée Jules Verne 2, le 30 août 2019, la ville de Nantes a fait un nouveau pas dans le domaine du transport durable. Son premier bateau fluvial à hydrogène a été déployé dès avril 2018 sur l'Erdre. Ce navibus, réalisé suite à un appel à projet de l'Ademe, vise à ouvrir la voie à une nouvelle filière de transport fluvial “zéro-émission” au sein de la région.

En effet, ce mode de transport se tourne lui aussi vers de nouveaux carburants. Actuellement, les croisiéristes fluviaux s'intéressent en premier lieu au carburant de synthèse GTL (pour gas-to-liquid). Celui-ci est obtenu par transformation chimique du gaz naturel pour le rendre liquide à température et pression ambiante. Il ne nécessite

donc pas de changement de navires au sein de la flotte. Mais cette solution ne réduit que les émissions de particules et d'oxydes d'azote, et non celles de CO₂. En conséquence, deux autres solutions se dégagent pour l'avenir : le recours à l'électrique soit sur batterie, soit sur pile à combustible. “C'est la solution d'avenir mais il nécessite encore des études ainsi qu'un changement de réglementation”, indiquait Érick Schulz, de la plateforme européenne des transporteurs fluviaux, auprès du *Journal de la Marine marchande*, en juin 2019. Cependant, des projets continuent de se développer autour de bateaux fluviaux électriques. L'Association française pour le bateau électrique (AFBE) notait, en septembre 2019, la naissance de projets dans le domaine de bateaux fluviaux à hydrogène, laissant percevoir un intérêt pour cette technologie, face à l'électrique à batterie.

il me faudrait un navire-jumeau pour y mettre la pile à combustible et le stockage d'hydrogène!", expliquait Jean-Marc Roué, président d'Armateurs de France. L'American bureau of shipping (ABS) a par exemple étudié le design de deux porte-conteneurs et la manière de les convertir à l'hydrogène. Le premier, un navire de 2000 EVP, nécessiterait quatre piles à hydrogène de 2,5 MW et une batterie de 6,3 MWh. Le second navire, de 14 000 EVP, aurait besoin de 20 piles à combustible de 3 MW, ainsi qu'une batterie de 36 MWh. Pour des raisons commerciales et techniques, ces

concepts ne peuvent pas être construits pour le moment. De tels navires sont toutefois envisageables à l'horizon 2030, à condition qu'il y ait eu "des avancées significatives, pour atteindre des puissances et des durées de vie plus élevées", souligne l'ABS. Pour l'instant, les progrès observés en R&D par Jean-Marc Roué concernent les moteurs à combustion hydrogène. Autour de cette technologie, "le Japon pourrait mettre au point des premières solutions de taille suffisante d'ici deux à trois ans", explique-t-il.

Transport aérien : de multiples freins à lever

Pointé du doigt pour ses émissions de CO₂, bien qu'elles ne représentent que 2 à 3 % du total mondial, l'aéronautique s'oriente également vers l'emploi de l'hydrogène. Alors que le trafic aérien double tous les quinze à vingt ans, le secteur s'est engagé à diviser par deux ses émissions de CO₂ à l'horizon 2050, par rapport à 2005. Outre le remplacement de la flotte, l'allègement des matériaux ou encore l'optimisation des procédures de vol, la plus grande partie des efforts des acteurs (constructeurs, équipementiers, et compagnies aériennes) consiste à trouver de nouvelles sources d'énergie. L'hydrogène apparaît comme **une nouvelle voie, face aux inconvénients qui entourent d'autres solutions.**

En effet, les regards sont actuellement tournés vers deux énergies principales : l'électrique avec notamment le projet EcoPulse développé par Daher, Safran et Airbus visant un premier vol d'ici l'été 2022 ; ainsi que les carburants durables, et principalement les agro-carburants pour les moteurs thermiques. Or, toutes deux souffrent de failles. En raison des capacités des batteries, la motorisation électrique pourrait être limitée aux vols de moins de 1 000 km. Les coûts et le volume de production représentent également des freins au développement des agro-carburants.

L'hydrogène pourrait alors porter les espoirs de décarbonation de la filière aérienne. Autour de cette énergie, le secteur envisage la production de carburants synthétiques, les power-to-liquid,

explique *L'Usine Nouvelle*. Le procédé Fischer-Tropsch est une des solutions envisagées. Celui-ci combine l'hydrogène et le CO₂ capté dans l'atmosphère ou dans des fumées industrielles, afin d'obtenir du kérosène. Cependant, "restent des questions d'échelle au niveau de la production et des sources d'énergie pour obtenir l'hydrogène, puis assurer la réaction", note Jean-Brice Dumont, directeur de l'ingénierie et membre du comité exécutif d'Airbus. La technologie présente également un surcoût.

Une seconde opportunité repose sur l'emploi de piles à combustible. Des projets sont menés depuis quelques années dans ce domaine. En 2017, *L'Usine Nouvelle* faisait état de programmes déployés par Boeing autour d'un planeur motorisé, ainsi que par Airbus sur un système d'alimentation électrique de secours dans un A 320. À la même époque, Safran s'était rapproché du britannique Cella Energy, spécialisé dans le stockage de l'hydrogène. De leurs côtés, Dassault Aviation, Zodiac, Air Liquide et le CEA étaient engagés conjointement dans le projet européen Hycarus visant à démontrer qu'il est possible d'utiliser une pile à combustible dans un avion. Ce projet n'a toutefois plus été abordé dans l'actualité depuis.

Malgré la multiplication des projets dans le secteur de l'aéronautique, **l'hydrogène s'applique pour l'instant uniquement aux systèmes non propulsifs.** Ainsi, dans le cadre du projet Hycarus, la pile à combustible avait pour objectif

d'alimenter les éléments non vitaux de l'appareil, comme les galleys (cuisine). Le projet Pipaa, quant à lui, piloté par Safran avec sa filiale Safran Power Units, spécialisée dans les systèmes de puissance pour l'aéronautique civile et militaire, a pour premier domaine d'application le roulage au sol des avions commerciaux. L'une des principales failles de l'hydrogène dans le secteur aéronautique repose en effet sur **son volume, encore trop conséquent pour être intégré dans les avions.**

"Pour une performance comparable, il faut un réservoir quatre à six fois plus grand", notait, en décembre 2019, Jérôme Bouchard, expert aéronautique au sein du cabinet de conseil Olivier Wyman. Il serait possible de réduire cet encombrement via un système de stockage cryogénique avec de l'hydrogène liquide à -253°C , comme dans la fusée Ariane, explique le journaliste Olivier James dans *L'Usine Nouvelle*. Mais cela représente un véritable défi pour l'aviation civile "tant au niveau de l'architecture de l'aéronef que de l'infrastructure de distribution", précise Stéphane Cueille, directeur R&T et innovation chez Safran. Il faudrait également parvenir à produire de l'hydrogène en grande quantité sur le lieu de consommation, c'est-à-dire dans les aéroports.

Dans ce contexte, l'hydrogène est étudié pour **des équipements de plus petite taille.** L'entreprise américaine ZeroAvia projette, par exemple, de développer un avion à hydrogène de seulement 20 places. Son engin utilisera une pile à hydrogène de 275 kW. L'hydrogène sera stocké sous forme gazeuse à 345 bars, le même mode de stockage que celui utilisé dans des voitures à hydrogène de type Toyota Mirai ou Honda Clarity, note *Industrie & Technologies*. **Les drones représentent un autre domaine d'application exploré.** La start-up drômoise Ergosup, concepteur et fabricant d'électrolyseurs haute pression (ayant comme partenaires dans son capital

Aliad-Air Liquide, Demeter, GO Capital et Arkéa) a noué un accord avec HES Energy Systems (filiale de H3 Dynamics, spécialisée dans les piles à combustible ultralégères). Dans le cadre d'un consortium intégrant également la société Ad-Venta, elles visent le développement d'une solution énergétique complète et clé en main rendant possible l'usage de drones professionnels élec-

triques de longue endurance pour des applications industrielles (inspection et de surveillance). Le prototype de démonstration est développé avec le fabricant français de drones Delair. Une utilisation de l'hydrogène est aussi possible dans **la logistique au sol au sein des aéroports**, par exemple pour les chariots élévateurs, nacelles et véhicules de transport de bagage, selon le site Internet d'Air Liquide.

Les avions à hydrogène ne sont donc pas attendus dans un avenir proche, malgré les projets en cours et les objectifs qui les entourent. La feuille de route de Safran avec le projet Pipaa vise par exemple à étendre l'utilisation de l'hydrogène au système propulsif des aéronefs hybrides, **associant propulsion thermique et propulsion électrique.** Dans le secteur aéronautique, la technologie devra encore être améliorée. La pile à combustible devra être plus puissante.

Il sera également nécessaire de mettre au point des solutions d'emport de quantités d'hydrogène plus importantes à bord des aéronefs. Pour cela, le stockage devrait, a priori, être sous forme liquide (LH2), souligne "Le plan de déploiement de l'hydrogène pour la transition énergétique", réalisé par le ministère de la transition écologique et solidaire. Malgré les failles actuelles, "l'essor de l'hydrogène dans le secteur automobile pourrait accroître sa compétitivité au cours des prochaines années", notait Thierry Rouge-Carrassat, directeur de la technologie de Zodiac en octobre 2017, et ainsi favoriser son développement dans l'aéronautique.

664 millions de tonnes

Les émissions de CO_2 de l'aviation mondiale, en 2018.

+ 52 %

La hausse des émissions de CO_2 de l'aviation mondiale, entre 2010 et 2018.

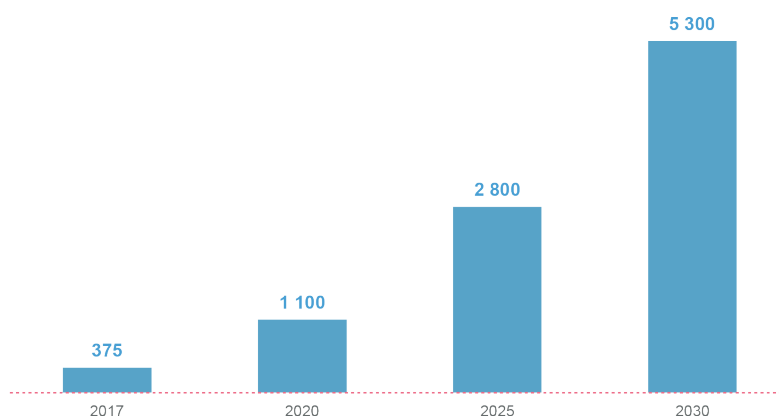
Les stations de recharge, véritable enjeu pour le transport à l'hydrogène

Un parc encore insuffisant

Malgré la mobilisation des constructeurs dans le développement d'engins circulant à l'hydrogène et l'intérêt des opérateurs de transport pour ce vecteur énergétique, **le développement de la filière hydrogène reste freiné par le manque d'infrastructures de ravitaillement**. Un ensemble de constructeurs automobiles européens, Hydrogen Europe et l'Union internationale des transports routiers ont ainsi appelé les décideurs publics, en octobre 2019, à **une accélération des investissements dans ce domaine**. Certains modes de transport semblent toutefois plus touchés que d'autres par ce manque de stations. Selon le dirigeant de Symbio, il faudrait une centaine de stations à hydrogène pour satisfaire les collectivités, alors qu'il en faudrait 10 000 pour les particuliers.

La France comptait une vingtaine de stations de recharge pour véhicules à hydrogène au printemps 2019, selon *Industrie & Technologies*. De son côté, le site H2 Mobile en référence près d'une trentaine, début 2020, opérées par GNVert, Air Liquide, McPhy, Engie, Ondulia, Idex, la SEM Eever'hy'pole (Pôle d'essais de véhicules électriques et à énergie renouvelable à l'hydrogène), le technopole Savoie Technolac ou encore des collectivités locales. L'Allemagne, plus avancée que la France dans le déploiement de sa filière hydrogène, comptait trois fois plus de stations début 2019. Dans le monde, les stations à hydrogène étaient au nombre de 375 en 2017, dont 100 au Japon, 43 en Allemagne et 38 aux États-Unis, d'après les chiffres 2018 de l'Agence

NOMBRE DE STATIONS DE RECHARGE EN HYDROGÈNE
DANS LE MONDE, EN 2017, ET PROJECTIONS



Traitement IndexPresse. Source : Hydrogen Council, Biofuel Technologies - Recent Developments et France Stratégie, *Sciences et vie*, juillet 2018

internationale de l'énergie. Le parc est toutefois appelé à se développer considérablement à l'avenir. Les estimations tablent sur 1 100 stations dans le monde en 2020, 2 800 en 2025 et 5 300 en 2030 selon *Sciences & Vie*.

Pour développer le réseau de stations, **les pouvoirs publics se mobilisent**. L'Union européenne, consciente de son retard dans la filière hydrogène, a par exemple lancé en 2015 son projet Hydrogen Mobility Europe (H2ME), visant à développer le premier véritable réseau européen de stations de ravitaillement en hydrogène. Mi-2019, le bilan était de 30 stations de remplissage déployées en Allemagne, France, Scandinavie, Royaume-Uni et autres pays. Les efforts restent à poursuivre. Dans ce contexte, en France, le plan Hulot prévoit la mise en place de 100 stations-service d'ici à 2023 pour alimenter 5 000 véhicules utilitaires légers et 200 véhicules lourds, et 400 à 1 000 stations à l'horizon 2028. À cette échéance, les infrastructures installées ravitailleront 20 000 à 50 000 utilitaires légers et 800 à 2 000 véhicules lourds.

Sur le territoire, **les régions s'impliquent dans le développement du réseau**. Certaines se distinguent déjà par leur mobilisation. En 2018, la communauté d'agglomération de Sarreguemines Confluences (Moselle) a par exemple mis en service une station autonome de rechargement en hydrogène. Le projet, alors inédit en France d'après *La Gazette des communes*, a été bâti par l'intercommunalité, propriétaire et exploitant de la station, *en partenariat* avec EDF, l'industriel français McPhy et un laboratoire de l'institut de technologie de Karlsruhe (Allemagne). La station produit son hydrogène sur place. À ses débuts, elle visait l'alimentation d'une flotte de

10 véhicules acquis par des partenaires publics et privés du territoire. Le projet a nécessité un investissement de 1,59 million d'euros pour la station et la flotte de véhicules. Celui-ci a été financé dans le cadre du programme européen Hydrogen Mobility Europe (H2ME). Grâce à ce dernier, la communauté d'agglomération a limité son investissement à 160 000 euros pour la durée de l'expérimentation. La Normandie disposait quant à elle de 15 stations d'hydrogène en service début 2019, et prévoyait l'implantation de 11 autres points de recharge dans l'année. Particulièrement engagée dans la filière hydrogène, cette région a notamment participé au financement du projet de la société Chereau pour la mise au point d'un semi-remorque frigorifique à hydrogène. Plus récemment, fin 2019, la Région Rhône-Alpes a inauguré sa première station de recharge à hydrogène, à Clermont-Ferrand, sur un terrain mis à sa disposition par Michelin. Elle projetait alors d'en implanter une vingtaine au total dans le cadre du projet Zero Emission Valley (ZEV), en 2019 et 2020, à commencer par Chambéry, Lyon, Grenoble, Riom, Saint-Étienne et Clermont-Ferrand (avec deux unités de plus grande envergure). Ce réseau sera déployé autour d'un **partenariat public-privé unique en son genre** : la Banque des territoires, associée à la Région, a investi à hauteur de 49 % dans la société Himpulsion, chargée de mettre en place ce réseau. Les 51 % restants sont partagés entre Michelin, Engie et le Crédit Agricole. Le projet est également cofinancé par des fonds européens. Il prévoit **la production locale d'un hydrogène vert, de façon renouvelable, avec la création de 15 électrolyseurs** fonctionnant à l'énergie solaire.

100

Le nombre de stations de recharge pour véhicules à hydrogène attendues en France d'ici 2023, dans le cadre du plan gouvernemental.

400 à 1 000

Le nombre de stations de recharge pour véhicules à hydrogène attendues en France d'ici 2028.

Réduire les coûts grâce à une flotte captive

L'installation d'une station de recharge représente un coût de l'ordre d'un million d'euros, selon *L'Usine Nouvelle*, ou de 600 000 euros pour de plus petites stations d'après Ben Madden, consultant chez Element Energy. Selon les explications livrées par l'Association pour le développement de la mobilité électrique (Avere), le coût d'une station varie selon la quantité d'hydrogène distribuable par jour et la production locale d'hydrogène par électrolyse, ou la livraison de l'hydrogène par camion. L'amortissement dépend alors du taux d'utilisation de la station ou du nombre de véhicules par jour, et de la quantité d'hydrogène fournie par plein. Ces éléments influent à la fois sur le prix de l'hydrogène et sur la rentabilité de la station.

Pour contourner la problématique des coûts de la station, en s'assurant un volume d'hydrogène distribué suffisant, **la constitution de flottes captives se présente comme la solution la plus efficace**. Le site *Smartgrids-cre.fr* définit ce type de flotte comme "un ensemble de véhicules qui dépendent d'une gestion commune et s'approvisionnent à leur propre source de stockage de carburant". De cette façon, les stations prennent place là où la demande existe, ce qui permet de rentabiliser l'investissement en atteignant un niveau de charge correcte dès son ouverture, précisait l'Avere, en 2016, dans le cadre du programme mobilité hydrogène France. À cette date, la mise en place de ce type de projet était déjà perçue comme la manière de développer le marché, avant de déployer ce dernier auprès du grand public à l'échelle nationale. L'Avere présentait notamment le développement de flottes captives dans les domaines de la livraison, des taxis, ou encore de la logistique urbaine.

Concrètement, la mise en place d'une flotte captive consiste à **développer en parallèle la flotte de véhicules et les stations**. Les projets lancés au cours des dernières années sont nombreux à emprunter cette voie. En complément de sa flotte de 600 taxis Hype, d'ici 2020, la STEP (Société du taxi électrique parisien) vise par exemple l'installation d'une dizaine de stations à hydrogène,

UNE GAMME COMPLÈTE DE STATIONS HYDROGÈNE DÉVELOPPÉE PAR MCPHY

Fabricant d'électrolyseurs, McPhy développe également des stations hydrogène sous les noms McFilling et Augmented McFilling. Ces dernières sont destinées aux collectivités, entreprises, constructeurs ou gestionnaires de parcs automobiles et/ou flottes de bus. Compactes et modulaires, elles peuvent alimenter les flottes captives, les transports en commun, les voitures citadines, ainsi que les transports lourds, comme les camions, trains et bateaux. Ses stations peuvent être alimentées par un tube trailer ou pipeline hydrogène. Toutefois, l'entreprise concentre ses efforts sur l'intégration de l'électrolyse comme brique centrale de ses équipements, afin de contribuer au développement de la mobilité propre.

Source : mcphy.com

alors que seulement quatre étaient actives en Île-de-France en 2019. Pour cela, elle s'est associée à Air Liquide, Toyota et Idex, dans une coentreprise baptisée HysetCo.

Le projet Zero Emission Valley (ZEV), en région Rhône-Alpes, vise quant à lui, en complément du développement d'une vingtaine de stations, la proposition de 1 000 véhicules utilitaires pour des flottes captives de professionnels d'ici à 2023. Parmi les premiers utilisateurs déclarés figurent des collectivités, des entreprises de transport de voyageurs telles que Transdev et CarPostal France (racheté depuis par Keolis), ainsi que La Poste. Le Crédit Agricole Centre-France participera notamment au financement en créant un produit spécifique pour les entreprises acquéreuses de véhicules à hydrogène.

Le fabricant de vélos à hydrogène Pragma Industries s'est associé à Atawey afin de proposer une solution complète de mobilité légère aux collectivités. Elle comprend la flotte de véhicules électriques hydrogène et la station de recharge. Atawey, spécialiste des technologies de l'hydrogène énergie, explique sur son site Internet qu'elle entend ainsi, "en collaboration avec des partenaires, proposer des offres véhicules accompagnées de stations dimensionnées aux besoins d'un territoire, d'une ville ou d'une entreprise privée, aussi bien pour une flotte captive que pour mailler les territoires". Il est également partenaire du projet Last Mile, lancé en 2018, visant la mise en place d'un réseau de 33 stations de recharge sur Paris et l'ensemble du territoire, et une flotte de 400 véhicules à hydrogène pour les entreprises JCDecaux, les Galeries Lafayette et d'autres acteurs de la mobilité urbaine zéro émission.

De telles démarches semblent prometteuses. "C'est une question d'échelle: certains projets, comprenant à la fois une station et une flotte captive de véhicules prêts à l'utiliser, sont déjà bien partis pour trouver leur équilibre économique: le coût annuel d'une station (amortissement de l'investissement compris) tombe en dessous de celui d'une station essence classique si son taux d'utilisation est supérieur à 50 %", notait ainsi Ben Madden, consultant chez Element Energy, fin 2019, dans le journal *Les Échos*.

UNE STATION DE RECHARGE HYDROGÈNE MULTIMODALE DÉVELOPPÉE PAR ATAWEY

Le français Atawey propose une station de recharge permettant de faire le plein d'hydrogène et de recharger des batteries, pour différents types de véhicules électriques, dont les vélos à hydrogène et les utilitaires. Sa station "plug and play" s'adresse aux flottes industrielles ou de collectivités, comportant de 1 à 20 véhicules, ainsi qu'aux concessionnaires, aux loueurs, etc. Elle a l'avantage de pouvoir être déplacée selon les besoins des usagers.

L'hydrogène y est délivré à différentes pressions (200, 350 ou 700 bars) et peut être produit de deux manières: soit à partir de l'eau via une électrolyse non corrosive, sans soude ni potasse, soit par l'extérieur.

Source: Environnement magazine, mars-avril 2018.

UNE EXPÉRIENCE ALLEMANDE, NON RENTABLE

Visant un réseau de 100 stations de recharge d'hydrogène d'ici 2019, plusieurs acteurs du marché se sont associés dans une coentreprise nommée H2 Mobility, en Allemagne, en 2015. Celle-ci regroupe Air Liquide, Daimler, Linde, OMV, Shell et Total. Leur objectif était de supporter l'investissement, estimé à 350 millions d'euros, et les risques liés de façon collective.

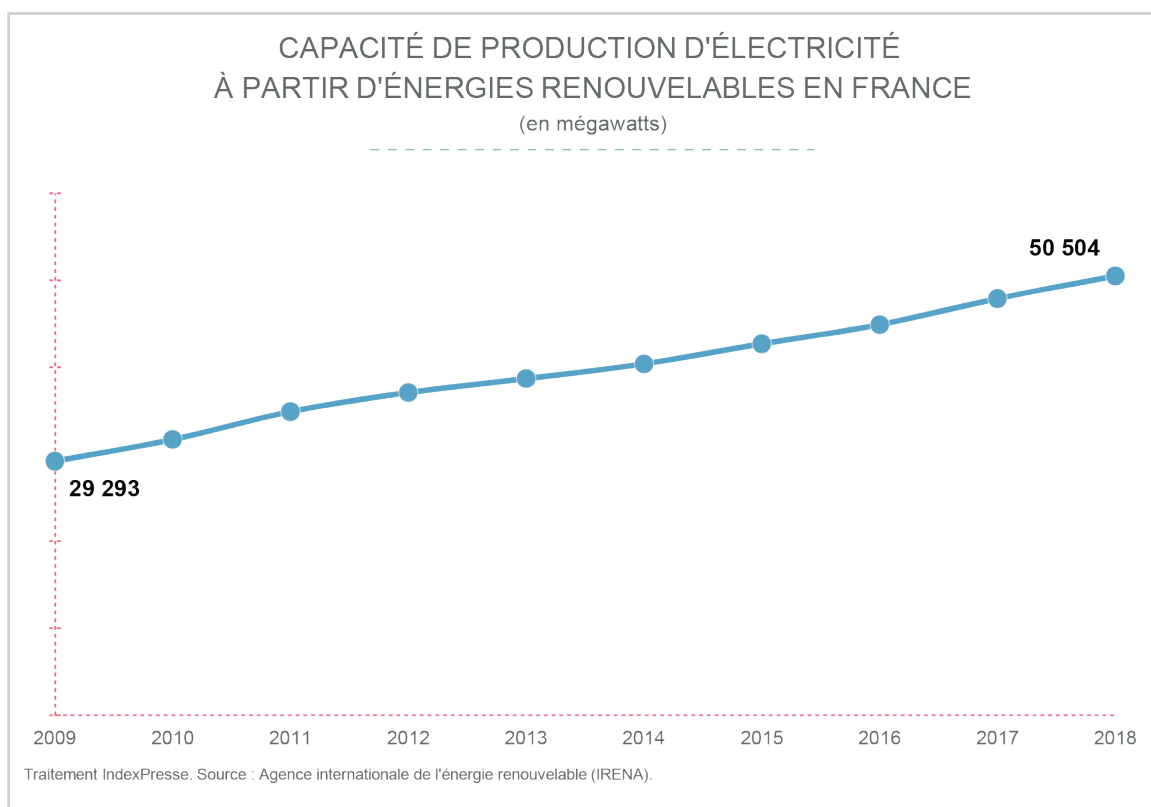
Le projet, financé de 50 à 70 % par le gouvernement allemand et l'Union européenne, n'a pas permis d'aboutir à un modèle rentable pour les 75 stations opérationnelles en Allemagne. La coentreprise connaît un déficit en raison du manque de voitures en circulation, note Mike Copson, chargé des énergies nouvelles de Shell.

Source: Les Échos, 5 novembre 2019.

DE NOUVEAUX USAGES LIÉS AUX ÉNERGIES RENOUVELABLES

En utilisant l'électricité verte en surplus pour produire de l'hydrogène par électrolyse, celui-ci devient **un moyen de stockage de l'énergie**. Il peut ensuite être **injecté dans les réseaux de gaz (power-to-gas), ou bien retransformé en électricité plus tard grâce aux piles à combustible (power-to-power)**. L'hydrogène constitue ainsi une solution adéquate pour mieux gérer la production émanant des énergies renouvelables, qui occupent une part croissante dans le réseau électrique national. En France, leur capacité totale de production a quasiment doublé durant la décennie 2010. Mais cette augmentation entraîne de nouvelles problématiques concernant le stockage de l'électricité générée. Contrairement à la production fossile, il est en effet impossible de contrôler

une production naturelle: si le soleil brille plusieurs jours de suite, les installations photovoltaïques généreront peut-être trop d'électricité par rapport à la demande. Pour stocker le surplus, *Le Moniteur du BTP* rappelle qu'il existe actuellement deux moyens privilégiés: les Step (stations de transfert d'énergie par pompage) et les batteries. Mais ces technologies risquent de montrer leurs limites lorsque les énergies renouvelables dépasseront 50 ou 60 % d'électricité générée dans le réseau. "À l'horizon 2050, si les scénarios 100 % renouvelables se réalisent, les options Step et batteries lithium-ion ou à circulation (dite Redox) qui commencent à émerger ne vont pas suffire", constate *Le Moniteur du BTP*. L'hydrogène s'impose alors comme un moyen complémentaire



idéal. “L’un des seuls stockages additionnels utilisables aujourd’hui de manière non polluante est l’hydrogène”, confirme Florence Lambert, directrice du centre de recherche CEA-Liten. La filière s’empare ainsi du domaine de l’énergie, qui devient un nouveau segment où se présentent des opportunités majeures. Pour les spécialistes

du gaz, de l’électricité ou des piles à combustibles, les énergéticiens et les start-up impliquées dans ce secteur, **l’hydrogène et ses capacités de stockage deviennent des thématiques primordiales pour l’avenir**. Il s’agit d’identifier rapidement les moyens de l’exploiter pour entamer au plus vite les processus d’industrialisation.

L’hydrogène s’immisce dans le réseau gazier grâce au power-to-gas

En France, les capacités de stockage de gaz sont 300 fois plus importantes que celles du réseau électrique, souligne *L’Usine Nouvelle*. Le power-to-gas, c’est-à-dire la transformation de l’électricité en gaz, apparaît donc comme une solution idéale pour gérer les surplus de production électrique. Par électrolyse de l’eau, l’électricité est transformée en hydrogène, qui est **directement injecté dans le réseau de gaz, ou combiné à du CO₂ pour créer du biométhane (ou biogaz)**, à son tour transvasé dans le réseau. Comme le précise *La Gazette des communes*, le power-to-gas se présente comme “une solution deux en un : stocker l’électricité excédentaire et décarboner le gaz”. GRTgaz, principal gestionnaire du réseau de

transport de gaz français, s’intéresse à cette solution depuis 2014. Il valorise aussi le potentiel de cette méthode : “On est parti de l’idée qu’il y aurait des excédents d’énergies renouvelables intermittentes à stocker et que l’hydrogène était une des rares solutions pour le faire de manière réaliste en grande quantité sur de longues périodes, avec le power-to-gas”. La seconde moitié des années 2010 a donné lieu à la **mise en place de nombreux démonstrateurs et tests industriels** pour confirmer l’efficacité du power-to-gas. “Il s’agit aujourd’hui de prouver que le power-to-gas fonctionne sur le plan technique et économique et qu’il peut trouver sa place”, affirmait Thierry Trouvé, directeur général de GRTgaz, en 2017.

INFRASTRUCTURES

LA NÉCESSAIRE ADAPTATION DU RÉSEAU DE GAZ À L’HYDROGÈNE

Si l’hydrogène peut être inséré directement dans le réseau de gaz, ce dernier reste en priorité conçu pour le gaz naturel, aux caractéristiques différentes. GRTgaz a ainsi fixé un taux de circulation maximum d’hydrogène dans son réseau de transport de 6 %, afin d’éviter le risque de corrosion des tuyaux en acier. Le biogaz, s’il demande une étape supplémentaire pour être conçu à partir de l’hydrogène, a l’avantage de ne pas présenter cette limite. Celle-ci pourrait toutefois tendre à s’amenuiser au fil des années. GRTgaz mène des projets de recherche pour améliorer le revêtement de ses canalisations et lutter contre l’effet corrosif de l’hydrogène. En 2019, le groupe a signé un contrat commercial avec l’entreprise Catalyse, filiale française du fabricant américain de produits pétrochimiques et de construction Westlake Chemical, afin de déployer des solutions allant dans ce sens. De cette manière, GRTgaz espère pouvoir supporter la hausse prévue de la part d’hydrogène dans le réseau sans avoir à construire de nouvelles infrastructures. Toutefois, si la proportion venait à dépasser 25 ou 30 %, “il faudrait créer un réseau dédié”, assure *L’Usine Nouvelle*.

Le projet le plus avancé en 2020 regroupe plusieurs acteurs clés de la filière. Basé à Dunkerque (Nord), Grhyd (Gestion des réseaux par l'injection d'hydrogène pour décarboner les énergies) réunit l'énergéticien Engie, le distributeur de gaz GRDF, les équipementiers spécialisés McPhy et Areva H2Gen, des laboratoires de recherche (CEA, CRIGEN, INERIS, CETIAT) et des acteurs publics locaux (Communauté urbaine de Dunkerque, DK'Bus Marine). Quinze millions d'euros de budget ont été engagés depuis les premières recherches en 2014, jusqu'à la fin de l'expérimentation prévue courant 2020. Grhyd vise à "évaluer, en conditions réelles d'exploitation, la pertinence technique, économique, environnementale et sociétale d'une filière énergétique basée sur l'usage d'un gaz composé de méthane et d'hydrogène", explique *Pétrole & Gaz - Énergies nouvelles*. Une centaine de logements sont ainsi alimentés depuis juin 2018 par **un réseau de gaz spécifique dans lequel de l'hydrogène vert circule**. La proportion a été progressivement augmentée jusqu'à atteindre 20 % d'hydrogène. Selon les tests menés par GRDF, il s'agit de la capacité maximum d'injection qui ne nécessite pas de modifier le réseau de distribution ou les équipements des usagers. "Notre réseau de gaz est neuf, mais ce taux de 20 % devrait pouvoir être atteint dans un réseau existant, sans modification majeure des installations en aval", explique Hélène Pierre, responsable chez Engie Lab Crigen. Début 2020, tous les points de passage avaient été respectés et le

projet entamait sa phase finale où le taux de 20 % d'injection était effectif. Un peu plus d'un an d'expérimentation ont permis aux partenaires du projet Grhyd de **confirmer "l'énorme potentiel" de cette "solution d'avenir"**, rapporte *Environnement Magazine*. Le déploiement de la filière française du power-to-gas à une plus grande échelle est envisagé dès la fin de Grhyd, mi-2020. *La Gazette des communes* note toutefois qu'il faudra attendre un assouplissement de la législation pour développer pleinement ce segment, la proportion maximale d'hydrogène autorisée dans le réseau de transport de gaz étant pour l'instant fixée à 6 % pour des questions de sécurité. Grhyd avait bénéficié d'une dérogation de la direction générale de la prévention des risques, mais le succès du projet pourrait faciliter les changements demandés.

Dans le sud de la France, à Fos-sur-Mer (Bouches-du-Rhône), GRTgaz, filiale d'Engie, mène le deuxième projet industriel d'envergure, Jupiter 1000, depuis fin 2017. "Ce démonstrateur permettra de **passer du concept à un outil industriel de taille grande nature**", indique l'entreprise, qui souhaite ainsi poser les premiers jalons de la filière power-to-gas française. Des électrolyseurs de grande puissance ont été mobilisés pour produire massivement de l'hydrogène, faisant du démonstrateur l'un des plus puissants d'Europe. L'enjeu est d'injecter "en moyenne 1 à 2 % d'hydrogène, et jusqu'à 6 %, dans le réseau existant", précise *Industrie & Technologies*. Comme pour Gryhd, Jupiter 1000 rassemble de nombreux acteurs,

L'HYTHANE, UN CARBURANT MÊLANT HYDROGÈNE ET GAZ NATUREL QUI SE HEURTE À LA RÉGLEMENTATION

Le projet Gryhd intégrait à l'origine un second volet portant sur la mobilité. Le mélange de 80 % de gaz naturel et de 20 % d'hydrogène débouche sur la création d'hythane, un carburant potentiel qui devait servir à alimenter une flotte de bus à Dunkerque. Testé avec succès quelques années plus tôt sur le réseau DK'BUS lors de l'expérimentation Althytude, menée avec Engie, l'hythane avait révélé des bénéfices techniques et environnementaux, entraînés par une amélioration de la combustion du gaz naturel, détaille *Le Moniteur du BTP*. Cependant, la réglementation française limite encore fortement l'injection d'hydrogène dans le gaz pour véhicule, ce qui a empêché Gryhd d'exploiter ce procédé à une plus grande échelle qu'Althytude. *L'Usine Nouvelle* indiquait toutefois courant 2018 que des négociations européennes avaient débuté pour revoir le règlement actuel concernant l'hythane.

dont l'équipementier McPhy, la Compagnie nationale du Rhône qui fournit l'électricité renouvelable, ainsi que le CEA sur le volet recherche et développement. Teréga, le second gestionnaire du réseau de gaz français derrière GRTgaz, est aussi impliqué. Le budget total s'élève à 30 millions d'euros. En plus de l'injection directe, le démonstrateur servira à fabriquer du biométhane (ou biogaz), en couplant l'hydrogène vert fabriqué par électrolyse à du CO₂ capté chez les industriels environnants. En combinant ces deux fonctions, Jupiter 1000 optimise son fonctionnement tout en **exploitant plusieurs débouchés possibles pour l'hydrogène**. L'Ademe, partenaire financier du projet aux côtés des territoires et de l'Union européenne, profite de ce démonstrateur pour mener une étude technico-économique confirmant l'intérêt d'investir dans la filière du power-to-gas. Pour Thierry Trouvé, directeur de projet chez GRTgaz, il ne fait aucun doute que "le power-to-gas est la solution optimale de stockage massif des surplus de production électrique sur de longues périodes, entre les saisons par exemple". Lancé en 2019, l'outil industriel Jupiter 1000 devrait fonctionner jusqu'en 2022.

Ce type de projet tend à essaimer partout en France, à diverses échelles, afin de prouver l'utilité de l'hydrogène dans le cadre du stockage d'énergies renouvelables puis au sein du réseau gazier. Démarré en avril 2019, le projet Hycaunais est porté par le Syndicat départemental d'énergies de l'Yonne, via sa société d'économie mixte

Yonne Énergie, accompagné par Storengy, filiale d'En-gie spécialisée dans le stockage du gaz. Hycaunais a pour objectif la transformation d'énergies renouvelables, principalement éolienne, en hydrogène puis en biogaz.

En Moselle, l'établissement public d'aménagement Alzette-Belval et la Communauté de communes du Pays Haut Val d'Alzette sont au cœur du projet METHA² : l'électricité issue des éoliennes et des déchets verts de la déchetterie sera transformée en hydrogène par le biais d'un électrolyseur. Ce dernier passera ensuite dans une unité de méthanation afin de ressortir sous forme de biométhane et être injecté dans le réseau de gaz. Sur ce segment prometteur que constitue le power-to-gas, l'hydrogène s'approprie donc une place majeure. Ses caractéristiques, qui lui permettent de **stocker l'électricité en surplus, d'intégrer directement le réseau de gaz ou de participer à la production de biogaz**, ouvrent de nouvelles perspectives à la filière, tout en multipliant les opportunités pour les énergéticiens et les équipementiers.

30 TWh

Le volume potentiel d'hydrogène produit en France grâce au power-to-gas à l'horizon 2035, soit environ 6 % de la consommation annuelle de gaz.

Source : Ademe

MARCHÉ

LE BIOGAZ, UN DÉBOUCHÉ PROMETTEUR POUR L'HYDROGÈNE VERT

Couplé à du CO₂, l'hydrogène permet de fabriquer du méthane de synthèse grâce à un processus de méthanation. L'utilisation d'hydrogène vert lors de l'opération permet ainsi de générer du biométhane, ou biogaz, injectable dans le réseau gazier. Le biogaz constitue une autre filière d'avenir dans le cadre de la transition écologique. En 2018, la France importait 98 % du gaz naturel qu'elle consommait. L'essor du biogaz lui offrirait un moyen de réduire cette dépendance, tout en privilégiant une ressource non fossile. Produit par méthanation, méthanisation (digestion de matières organiques) ou gazéification (combustion de matières carbonées comme le bois), le biogaz représente un marché en pleine expansion en France. Les prévisions de l'institut Xerfi montrent qu'il ne cesse de croître depuis 2006 et qu'il pourrait atteindre 920 millions d'euros en 2020, contre 390 millions en 2015. Le nombre d'unités de méthanisation se multiplie, de même que le nombre de sites d'injection de biogaz dans le réseau national. Le secteur attire les spécialistes du gaz, les énergéticiens, mais également des équipementiers spécialisés et des start-up novatrices. Le power-to-gas et la méthanation participent à cet essor, faisant de l'hydrogène vert une ressource notable du développement du biogaz en France.

Le power-to-power : recréer de l'électricité grâce aux piles à combustible

Un équipement devenu crucial

Grâce aux piles à combustible, il est possible de **retransformer l'hydrogène obtenu à partir d'électricité en électricité**. *Industrie & Technologies* évoque "la facilité avec laquelle il est possible de passer de l'électricité à l'hydrogène et inversement, grâce à un électrolyseur d'eau et une pile à combustible. Le tout sans émission d'aucun polluant in situ." Ces équipements ouvrent ainsi la

voie au power-to-power, l'hydrogène ne servant que d'intermédiaire de stockage à l'électricité en surplus avant d'être à nouveau transmué en électricité ou en chaleur. Omniprésente dans les véhicules fonctionnant à l'hydrogène, cette technologie trouve également **des applications en dehors du secteur de la mobilité**, depuis la simple fourniture d'électricité à un bâtiment jusqu'à la

PRINCIPAUX FABRICANTS MONDIAUX DE PILES À COMBUSTIBLE

(hors constructeurs et équipementiers automobiles)

Groupe	Pays d'origine	Activité
Ballard Power Systems	Canada	Développement et fabrication de piles à combustible.
balticFuelCells	Allemagne	Développement, test et conception de composants internes pour piles à combustible et de piles à combustible.
Doosan Fuel Cell	Corée du Sud	Fabrication de piles à combustible stationnaires.
Horizon Fuel Cell Technologies	Singapour	Fabrication de piles à combustible et d'équipements de stockage d'hydrogène.
Hydrogenics	Canada	Fabrication de piles à combustible et d'équipements de production d'hydrogène.
Intelligent Energy	Royaume-Uni	Ingénierie, développement et commercialisation de piles à combustible.
Nedstack	Pays-Bas	Développement et fabrication de piles à combustible.
Pearl Hydrogen	Chine	Développement et fabrication de piles à combustible.
PlugPower	États-Unis	Développement et fabrication de piles à combustible.
Powercell Sweden	Suède	Ingénierie, développement et commercialisation de piles à combustible.

Traitement IndexPresse.

création de groupes électrogènes spécifiques, en passant par l'autosuffisance énergétique d'un territoire doté d'un important potentiel d'énergies renouvelables. "Les applications possibles de la pile à hydrogène sont multiples, en termes de secteur et de puissances couvertes", confirme *Industrie & Technologies*. Selon l'Association des industries mécaniques allemandes, le marché mondial des piles à combustible devrait atteindre **2 milliards d'euros dès 2020, soit dix fois plus qu'en 2017**, une croissance due en grande partie à leur application dans les transports mais également à leur utilisation croissante dans divers secteurs d'activité.

Cette expansion crée de nouvelles opportunités pour les fabricants de piles à combustible. Ils cherchent à **massifier leur production tout en améliorant les caractéristiques de leurs produits**, les rendant par exemple plus résistants aux hautes températures et aux effets de la pollution. Le groupe canadien Ballard Power Systems, "leader incontesté du marché mondial" d'après le courtier en ligne Lynx Broker, a déjà affiché une croissance annuelle moyenne supérieure à 30 % entre 2014 et 2017, avant un ralentissement en 2018, pour un chiffre d'affaires estimé à 97 millions de dollars. Il fournit majoritairement des constructeurs automobiles, concepteurs de poids lourds et de bus, et des spécialistes du ferroviaire. À la fin de l'année 2019, Ballard Power Systems a investi le marché français en signant un partenariat avec Hydrogène de France (HDF), opérateur de l'hydrogène-énergie qui se lance dans la fabrication de piles à combustible. HDF prévoit l'ouverture en 2022 d'une usine dans la région bordelaise grâce à un investissement de 15 millions d'euros et un transfert de technologies avec Ballard Power, qui possède selon l'entreprise française "la technologie la plus déployée au monde". Les futures piles HDF Energy auront une forte puissance

et serviront comme "vecteur de stockage massif de l'électricité pour transformer l'intermittence des énergies renouvelables en électricité stable", explique *La Tribune*. Adaptées spécifiquement au secteur de l'énergie, elles permettront à Ballard Power de diversifier sa production, tandis qu'Hydrogène de France compte ainsi **renforcer la filière hexagonale et devenir un acteur d'envergure mondiale** sur ce segment des piles à forte puissance. En Suède, le fabricant Powercell Sweden a également fait le choix des partenariats industriels pour son développement. Il collabore avec son voisin norvégien Nel Hydrogen dans la conception de piles adaptées aux cargos et aux paquebots, et s'est engagé en Allemagne dans un projet de construction d'usine de piles à combustible afin que le marché atteigne plus rapidement sa "maturité industrielle". Surtout, Powercell Sweden a été privilégié en 2019 par le groupe allemand Bosch comme partenaire industriel. Spécialiste des équipements industriels et de l'électroménager, Bosch a décidé d'intégrer la filière des piles à combustible mobiles afin de devenir l'un des fournisseurs majeurs du domaine automobile. Un an plus tôt, la société suédoise avait déjà passé un accord similaire avec un autre groupe allemand, Siemens, lui aussi intéressé pour se lancer sur le marché des piles à combustible, cette fois-ci appliquées au transport naval.

Parallèlement à cette **implication grandissante d'acteurs originellement extérieurs au domaine** et à la montée en puissance des spécialistes des piles à combustible, le power-to-power débouche surtout sur l'apparition de nouveaux usages et produits. Souvent portés par des start-up, ils diversifient un peu plus les applications possibles de la combinaison hydrogène-électricité en les adaptant à des échelles réduites ou aux besoins de nouveaux domaines d'activité.

**2 milliards
d'euros**

La valeur du marché
mondial des piles à
combustible en
2020.

Une multiplication des usages possibles

Avec un marché mondial des solutions locales de stockage d'énergie estimé à 10 milliards d'euros en 2020 par le CEA, le power-to-power possède **un fort potentiel à petite échelle**. La start-up grenobloise Sylfen se positionne sur ce segment avec son Smart Energy Hub, récompensé fin 2019 par un prix remis par l'Association européenne des organismes de recherche technologiques. Ce système réversible composé d'un électrolyseur et d'une pile à combustible fonctionne idéalement à l'échelle d'un bâtiment, peu importe sa taille, puisqu'il est possible d'assembler plusieurs "briques" du Hub pour obtenir une puissance plus ou moins grande. Le surplus d'électricité produit par exemple par les panneaux solaires du bâtiment est stocké dans le Hub sous forme d'hydrogène, puis retransformé en électricité ou en chaleur selon les besoins. Ainsi, **les bâtiments tendent vers une autonomie énergétique totale**. Après l'élaboration de plusieurs prototypes, Sylfen compte commercialiser la première génération de son produit en 2020. La start-up veut ensuite élaborer des modules plus puissants afin de couvrir des quartiers entiers ou des ensembles de bâtiments, comme les centres hospitaliers. "La clé de sa réussite viendra de sa capacité à adapter cette technologie à n'importe quel bâtiment mais aussi à convaincre les promoteurs immobiliers de l'utilité économique de cette solution", indique Julien Sorba, membre du cabinet d'audit BDO. Davantage tournée vers l'alimentation en énergies renouvelables des sites isolés, la start-up française Powidian se retrouve cependant confrontée à des problématiques similaires, en mettant au point des équipements adaptés à une production et une consommation moyenne ou réduite. Ses stations réunissant électrolyseur, pile à combustible, pour le stockage à long terme sous forme d'hydrogène, et batterie, pour le stockage à court terme, servent aux sites isolés, mais également aux événements temporaires ayant besoin de stocker l'électricité, comme les chantiers. En 2019, Powidian a inauguré à Tours (Indre-et-Loire) sa nouvelle plateforme de développement industriel, qui lui offrira la possibilité

de tester et de valider de nouvelles évolutions technologiques. "Nous sommes la preuve que l'hydrogène est une véritable alternative aux énergies fossiles", soutient Jean-Marie Bourgeois, président de l'entreprise. Powidian s'étend rapidement à l'international comme en atteste sa participation au projet européen Remote, dont l'objectif est de tester **l'alimentation en énergie de sites isolés grâce aux solutions basées sur le stockage de l'hydrogène**. Powidian va installer sa station sur les îles Froan, situées au large de la Norvège. Pour Jean-Marie Bourgeois, ce déploiement constitue à la fois "une vitrine" pour la société mais également "un challenge technologique", au sein d'un environnement austère où l'air marin et les températures négatives affectent les installations. Plusieurs grands industriels participent également au projet Remote, comme Ballard Power Systems Europe, Hydrogenics Europe ou le norvégien TrønderEnergi. Pour *Les Échos*, "ces tests en situation réelle ont pour vocation d'ouvrir la voie vers un déploiement à grande échelle de solutions de stockage basées sur l'hydrogène", les collaborations industrielles permettant d'accélérer davantage ce mouvement. Powidian cherche également à diversifier ses produits et a par exemple lancé en 2018 le Mobhyl Power, **un générateur d'électricité mobile fonctionnant à l'aide de bouteilles à hydrogène**, afin de remplacer les traditionnels groupes électrogènes au diesel. La jeune pousse française H2SYS propose un équipement similaire depuis 2017, date de sa création par six chercheurs. L'hydrogène nécessaire à son fonctionnement peut provenir de sources externes ou être généré grâce à de l'énergie renouvelable, puisque le générateur est capable d'intégrer des panneaux photovoltaïques malgré sa taille réduite. Livré clé en main, ce produit non polluant et silencieux est destiné au secteur des travaux publics ou du secourisme. H2SYS a aussi conçu une version spécifique pour les pompiers. La start-up a élaboré des piles à combustible de puissances différentes afin de combler différents niveaux de besoins. "Nos concurrents sont plutôt intégrateurs, alors que nous développons le cœur

du produit, la pile à hydrogène. Cela nous permet de jouer sur la compacité, de diminuer volume et masse”, argumente Sébastien Faivre, cofondateur de l’entreprise. “L’hydrogène est un super moyen de répondre à l’intermittence des énergies renouvelables. Notre savoir-faire est dans les piles à hydrogène, nous en tirons de l’énergie et de la chaleur”, conclut-il, défendant la maturité des technologies engagées. Pour son premier exercice, en 2018, H2SYS avait réalisé 500 000 euros de chiffre d’affaires.

Ces applications à diverses échelles, dans des buts différents, portés par des acteurs de taille

et d’horizon variés, **légitiment l’avenir de l’hydrogène en tant que ressource complémentaire à l’envolée des énergies renouvelables.** “La multiplication des usages de l’hydrogène est la voie royale”, affirme Laurent Antoni, responsable du programme hydrogène et pile à combustible au CEA. En stockant les énergies renouvelables puis en permettant leur transformation en gaz, en électricité ou en chaleur, l’hydrogène s’impose comme un élément crucial pour la transition énergétique, tout en offrant aux spécialistes de l’énergie et de la pile à combustible de nombreuses opportunités de croissance.

LA GUYANE MISE SUR LE POWER-TO-POWER POUR ATTEINDRE L’AUTONOMIE ÉNERGÉTIQUE

L’ensemble des territoires français d’outre-mer visent l’autonomie énergétique en 2030. Pour y parvenir, la Guyane s’appuie notamment sur les énergies renouvelables et, de ce fait, sur l’hydrogène afin de stocker sa production pour la retransformer ensuite. Plusieurs projets de recherche sont en cours en 2020, menés par l’université de Guyane, en collaboration avec l’Ademe. De premières initiatives concrètes voient également le jour comme la construction d’une nouvelle centrale électrique entreprise par Hydrogène de France, représentant 90 millions d’euros d’investissement. “Ce sera la plus grande centrale 100 % renouvelable stockant l’énergie grâce à l’hydrogène. Notre concept Renewable, qui associe des panneaux photovoltaïques et une pile à combustible, permet de fournir une électricité stable et garantie de jour comme de nuit”, assure Damien Havard, dirigeant de HDF. Les travaux débiteront en 2020, pour une mise en service prévue en 2022. Pour HDF, la réplique de ces projets d’envergure constitue l’une des composantes de l’industrialisation du stockage de masse des énergies renouvelables et de la croissance du segment des piles à combustible de forte puissance.

Parfaire le stockage de l'hydrogène, un enjeu primordial

Une étape à la recherche d'optimisation

Le stockage de l'hydrogène, en attendant son utilisation future dans le réseau de gaz, les piles à combustible ou toute autre application, reste **un axe d'amélioration majeur pour la filière**. Comme le rappelle *Industrie & Technologies*, l'hydrogène est à la fois très léger et très volumineux. Il nécessite donc des équipements de stockage massifs, utilisant des matériaux de très faible perméabilité pour que les molécules ne s'échappent pas. En comprimant le gaz, entre 300 et 700 bars, il devient possible de gagner de la place, mais cette haute pression alourdit le coût des équipements et les mesures de sécurité. Cette forme reste cependant la plus répandue à l'heure actuelle. Les progrès techniques ont également permis de remplacer les bouteilles en acier par des réservoirs en composite, une première avancée qui ne semble toutefois pas suffisante à l'heure de l'essor massif de la filière. Autre solution envisagée, le stockage

sous forme liquide, qui permet de réduire la densité du gaz. Cette méthode comporte toutefois des freins, détaille Florence Lambert, directrice du centre de recherche CEA-Liten : "Le stockage sous forme liquide fonctionne, mais requiert une très basse température (- 253 °C), consomme encore trop d'énergie et engendre des problèmes d'évaporation." Les savoir-faire requis pour maîtriser le stockage liquide deviennent alors très nombreux, depuis la méthode de liquéfaction jusqu'aux moyens de transport en passant par l'isolation thermique des réservoirs. Encore limité à quelques secteurs d'activité précis comme l'industrie spatiale ou sidérurgique, **l'hydrogène liquide constitue malgré tout un mode de stockage prometteur pour l'avenir**, affirme Xavier Vigor, directeur technologique de l'activité hydrogène énergie d'Air Liquide : "Il va prendre une place plus importante, et vraisemblablement il y aura un

AVANTAGES ET INCONVÉNIENTS DES DIFFÉRENTES MÉTHODES DE STOCKAGE DE L'HYDROGÈNE

Type de stockage	Avantages	Inconvénients
Gazeux (comprimé)	• Technique maîtrisée • Amélioration des réservoirs grâce aux matériaux composites	• Volume occupé conséquent • Nécessite des réservoirs complexes, à la fois étanches, résistants à la pression et aux chocs • Équipements coûteux à produire
Liquide	• Moins volumineux • Plus facile à manipuler	• Nécessite des conditions spécifiques (très basse température, équipements adaptés) • Complexe à élaborer
Solide	• Beaucoup moins volumineux • Plus facile à manipuler • Peut être conservé à basse pression	• Encore au stade expérimental • Équipements utilisés encore peu adaptés au transport

Traitement IndexPresse. Source : *Industrie & Technologies*

jour des réservoirs d'hydrogène liquide sur des grands véhicules, comme les camions, les trains ou les bateaux." Enfin, des techniques annexes sont en cours de développement concernant **le stockage sous forme solide, une piste encourageante** selon Air Liquide, qui consiste à conserver l'hydrogène au sein d'un matériau. Le CNRS travaille par exemple à partir d'hydrures métalliques qui peuvent absorber et désorber l'hydrogène. Testée par l'équipementier McPhy, cette technologie s'avère avantageuse sur de nombreux points mais reste handicapée par "le poids important des hydrures comme moyen de stockage mobile". De plus, la masse d'hydrogène stockée reste faible et

les paramètres techniques à maîtriser sont une nouvelle fois nombreux. "Les pistes de recherche ne manquent pas, reste à atteindre un degré de maturité technologique suffisant pour un coût raisonnable", estime *Industrie & Technologies*.

Parallèlement aux avancées scientifiques dirigées principalement par les laboratoires de recherche, les entreprises de la filière hydrogène mènent également leurs projets afin d'**optimiser le stockage du gaz et de ne pas se laisser pénaliser par cet aspect**. Pour elles, il s'agit d'améliorer leur compétitivité, mais aussi de se démarquer de la concurrence en proposant les solutions les plus efficaces à l'heure actuelle.

Les acteurs de la filière se positionnent

Filiale d'Engie centrée sur le stockage souterrain du gaz naturel, Storengy recommande cette méthode pour poursuivre le développement de la filière hydrogène sans que les possibilités limitées de stockage ne deviennent un frein majeur. Les cavités salines ont été identifiées comme les plus pertinentes pour contenir une grande quantité de gaz. "Nous n'aurions pas d'espace de stockage aussi grand en surface, même en comprimant le gaz. Le stockage en cavité saline est apparu comme une évidence", avance Grégoire Hévin, ingénieur spécialisé chez Storengy. Creusées à plus de 800 mètres de profondeur, les cavités salines confinent l'hydrogène en éliminant une grande partie des risques pour la surface tant elles sont creusées profondément. Surtout, cette méthode est déjà utilisée depuis plus de 50 ans pour stocker du gaz naturel, rappelle Grégoire Hévin, ce qui offre de nombreux antécédents et retours d'expérience sur lesquels s'appuyer. Une étude de 2019 menée par des chercheurs et étudiants des MINES ParisTech estimait que "le stockage d'hydrogène en cavité saline peut notamment contribuer à la réduction de l'émission de gaz à effet de serre et par cela lutter contre le

réchauffement climatique. Il est de plus en plus maîtrisé et n'a que peu, voire pas, d'impacts sur la population avoisinante. Il doit donc être encouragé et accepté." Storengy souhaite **avoir recours au stockage en cavités salines pour développer la filière française de l'hydrogène** et s'y faire une place en tant que soutien des producteurs, transporteurs, distributeurs et acteurs territoriaux investis. Dans le cadre du projet Hygreen

Provence, lancé en 2017 en collaboration avec Air Liquide et l'agglomération Durance-Luberon-Verdon, l'hydrogène vert produit sur le site sera stocké en cavités salines par la filiale d'Engie, rapporte *L'Usine Nouvelle*. À Étrez (Ain), sur son site existant de stockage souterrain de gaz naturel, Storengy souhaite également "stocker de l'hydrogène en grande quantité" et en faire "une plateforme pour un hydrogène renouvelable 'Made in France' aux multiples usages".

Dans le même temps, aux côtés de l'Université de Pau et des Pays de l'Adour ainsi que du gestionnaire de réseau de gaz Teréga, l'entreprise participe au projet RINGS, qui vise à étudier le comportement de l'hydrogène et du gaz naturel lorsque les deux sont mélangés au sein de cavités salines.

80

Le nombre de cavités salines présentes en France, réparties sur six sites.

Aux États-Unis, le groupe français Air Liquide se sert de cette méthode sur son site de Beaumont (Texas), où il gère l'un des plus grands sites de stockage d'hydrogène du monde, capable d'engranger l'équivalent de 30 jours de production selon *L'Express*. En Suède, le groupe minier LKAB, le métallurgiste SSAB et l'énergéticien suédois Vattenfall ont opté pour un pilote de stockage souterrain dans leur projet de production et d'exploitation d'hydrogène vert dans l'industrie. **Une cavité du socle rocheux doublée en acier, pour l'étanchéité, sera exploitée** afin d'accueillir le gaz sous pression. Selon *Environnement magazine*, le pilote ne sera enfoui que 25 à 35 mètres sous terre, soit largement moins que les cavités salines.

Cette thématique encore mouvante offre des opportunités aux sociétés capables d'**élaborer des solutions de stockage innovantes qui répondront aux besoins de la filière**. En trouvant un moyen de stocker facilement l'hydrogène sous forme liquide, HySiLabs s'avance comme l'une des sociétés françaises prometteuses pour le futur. "Ce que nous avons développé, c'est un vecteur d'hydrogène, liquide, stable et à température ambiante, afin d'en faciliter le transport et le stockage", explique Pierre-Emmanuel Casanova, PDG de la start-up. Ce vecteur liquide, dérivé de la silice et nommé HydroSil, est d'abord chargé en hydrogène, ce dernier étant ensuite relâché pour être utilisé. Ce stockage ne nécessite pas de haute pression et permet de stocker et transporter sept fois plus d'hydrogène que sous la forme gazeuse. Récompensée dans de nombreux concours, dont

les prix EDF Pulse 2018, HySiLabs a levé 2 millions d'euros début 2018 afin de poursuivre son développement. La société vise notamment la commercialisation de son HydroSil auprès des grands industriels présents sur toute la filière, puisqu'ils sont "positionnés des deux côtés de la chaîne : à la production et à la distribution et de l'hydrogène, à la charge et à la décharge du vecteur liquide". Chez Mahytec, autre entreprise française spécialiste du stockage de l'hydrogène, la forme solide a été privilégiée. Initialement fabricante de réservoirs destinés à accueillir de l'hydrogène gazeux, elle s'est diversifiée dans les hydrures afin de proposer une solution de stockage solide. Elle affirme être **la seule société à proposer les deux méthodes à ses clients**. Mahytec travaille avec la direction générale de l'armement afin d'étudier l'utilité de ce stockage pour recharger les batteries d'équipements militaires. L'entreprise fait aussi la promotion de ses solutions dans le cadre du transport de l'hydrogène pour l'alimentation des stations d'avitaillement, un segment qui prendra de l'ampleur avec l'augmentation du nombre de stations. **Les thématiques du stockage et du transport se révèlent étroitement liées**, les progrès effectués sur le premier ayant souvent une incidence sur le second. Ces défis scientifiques et industriels qui restent à relever constituent l'une des clés de la montée en puissance du marché mondial de l'hydrogène, rappelle *L'Express*. Il faudra en effet trouver les solutions les plus efficaces pour, à terme, "acheminer ce précieux contenu à l'autre bout de la planète".

RECHERCHE

DE NOMBREUSES MÉTHODES DE STOCKAGE RESTENT À EXPLORER

Dans son dossier sur l'hydrogène paru en mai 2019, *Industrie & Technologies* évoque plusieurs manières novatrices de stocker l'hydrogène en cours d'étude dans les laboratoires. L'utilisation d'hydrures chimiques est évoquée, de même que le stockage de l'hydrogène à travers deux produits dont il est familier, le méthanol et l'ammoniac. Leur stockage et leur transport sont mieux maîtrisés, et il serait ensuite possible de récupérer uniquement l'hydrogène par reformage du méthanol à la vapeur et par craquage de l'ammoniac. Les Lohc (*Liquide Organic Hydrogen Carriers* ou Liquides organiques porteurs d'hydrogène) apparaissent également comme une solution convaincante : ces liquides "hébergeraient" l'hydrogène pour son stockage et son transport. "À plus long terme, des travaux envisagent aussi le stockage de l'hydrogène sous forme cryo-compressée", conclut *Industrie & Technologies*. Toutes ces méthodes sont autant d'opportunités à envisager pour les scientifiques dans un premier temps, mais aussi pour les industriels et les start-up par la suite si leur efficacité est prouvée.

AMÉLIORER LA COMPÉTITIVITÉ DE LA FILIÈRE

Faire baisser les coûts de l'hydrogène vert, une étape indispensable

Industrialiser et massifier la production, tout en s'appuyant sur une implantation réfléchie

“L'enjeu majeur aujourd'hui est de passer à l'échelle industrielle pour diminuer les coûts”, affirmait *Industrie & Technologies* en mai 2019. “Il n'est plus l'heure désormais de s'atermoyer en attendant la définition d'un tarif d'injection; celui-ci viendra poussé par les nombreux projets qui l'attendent”, confirme Pôlénergie, l'organisme structurant la filière Énergie des Hauts-de-France. Pour passer un cap, **l'hydrogène va devoir se tourner vers la massification et l'industrialisation**. Les acteurs de la filière sont amenés à augmenter les volumes de production pour **faire baisser les prix du gaz vert, afin qu'il devienne compétitif auprès des industriels**. Si le prix du kilogramme d'hydrogène gris est estimé entre 1,50 et 2,50 euros par le CEA, l'hydrogène décarboné affiche encore des tarifs trois à quatre fois supérieurs, malgré une diminution effective depuis plusieurs années. Le prix toujours élevé des technologies et de l'électricité verte, combiné aux faibles volumes de production, expliquent cette situation. Pour Pierre-Étienne Franc, vice-président Hydrogène Énergie chez Air Liquide, une “très bonne performance” consisterait à descendre à 4 euros le kilo d'hydrogène décarboné, contre 6 à 7 euros actuellement. L'Ademe vise un prix inférieur à 5 euros le kilo en France d'ici 2035. Ancienne présidente d'Engie, Isabelle Kocher estime que pour de très grands ensembles industriels, dont les besoins en hydrogène seraient conséquents, le prix pourrait encore descendre à 2 euros le kilo.

Dans un article écrit pour *Les Échos*, Emmanuel Austruy, membre du Boston Consulting Group, recommande de **concentrer les premiers investissements auprès de grands sites industriels** actifs dans l'aciérie, la sidérurgie, la raffinerie, la production d'ammoniac ou de méthanol, qui consomment déjà de l'hydrogène gris. Cette “priorité rationnelle” offrirait des garanties quant aux volumes importants d'hydrogène vert requis, et permettrait à cette production décarbonée de **se tester face à une demande constante et massive**. La Compagnie nationale du Rhône (CNR), productrice d'électricité verte, s'implique de plus en plus dans l'hydrogène et mise sur les forts besoins industriels des entreprises installées dans

L'ÉTAT APPELÉ À SOUTENIR L'INDUSTRIALISATION

Sous l'impulsion de Philippe Boucly, son président, l'Afhypac a annoncé compter sur l'État pour stimuler la demande nationale en hydrogène, encourager les projets, collaborations et créations de consortiums, et rassurer les investisseurs financiers. Autant de conditions que l'organisme juge indispensables pour que l'industrialisation de la filière se mette en place.

la vallée de la chimie, au sud de Lyon, pour les accompagner dans leur transition verte. “Une directive va imposer aux pétroliers un taux de 15 % de carburants verts. En utilisant de l’hydrogène d’origine renouvelable, ils pourront atteindre ces objectifs. Les besoins pour ce produit seront alors de quelques dizaines de tonnes par jour sur le territoire”, évalue Frédéric Storck, directeur transition énergétique et innovation de la CNR. Cette demande grandissante incite ainsi le groupe et l’ensemble des acteurs du territoire à se mobiliser davantage et à augmenter leur implication dans l’hydrogène vert.

“En massifiant vraiment la production à partir d’énergies renouvelables (solaire ou éolien offshore) dans des centrales de l’ordre du GW, il serait même possible de descendre à 1,5 dollar le kilo d’hydrogène”, anticipe de son côté Thierry Lepercq, fondateur du groupe spécialiste des énergies renouvelables SolaireDirect, un tarif qui ferait basculer “toute l’industrie sidérurgique européenne du coke à l’hydrogène”. Pour parvenir à un tel résultat, il préconise de **“produire l’hydrogène sur le lieu de production du**

solaire ou de l’éolien” afin de supprimer les coûts de transport de l’électricité verte sur le réseau et de produire de gros volumes. Selon lui, une telle stratégie permettrait **d’obtenir un hydrogène vert compétitif dès 2024**. La mise en place de ces “circuits courts” a déjà commencé dans des pays disposant de grands parcs éoliens comme la Norvège, le Danemark ou les Pays-Bas. Un complexe de production d’hydrogène a par exemple ouvert ses portes près de Groningue, au nord des Pays-Bas, alimenté par de l’électricité provenant du parc éolien offshore avoisinant. Les groupes Gasunie, en charge du transport de gaz naturel et de l’infrastructure du réseau néerlandais, et ITM Power, équipementier anglais spécialisé dans l’hydrogène, sont les deux acteurs majeurs impliqués dans ce projet. En France, des initiatives de ce type basées sur un fonctionnement local commencent aussi à émerger. Pour son projet Zero Emission Valley, la région Auvergne-Rhône-Alpes envisage de construire 20 stations de ravitaillement, dont la première a été inaugurée fin 2019. L’hydrogène vert sera produit sur place grâce à l’implantation de 15 électrolyseurs, eux-mêmes alimentés par de l’électricité solaire locale. Pierre-Étienne Franc soutient cette manière de faire, jugeant que “pour tomber à 1,50 euro et assurer un avenir économique aux électrolyseurs, il faudrait en brancher un très gros directement sur un champ d’éoliennes ou de panneaux solaires”. Il déplore le nombre insuffisant de projets français allant dans ce sens. Directeur technico-commercial chez Alstom, Yannick Legay tient un discours similaire sur le tarif de l’hydrogène vert dans le secteur ferroviaire. Produit et distribué localement, il pourrait facilement atteindre 4,50 euros le kilo dans un premier temps, “un prix comparable au coût d’exploitation d’un train diesel en 2019”, et donc intéressant à prendre en compte pour le secteur.

Selon Thierry Lepercq, la France pourrait profiter des initiatives de ses voisins européens sur cette production massive à proximité des sources d’énergies renouvelables, **en allant se fournir en hydrogène vert directement auprès d’eux**. Le transport de gaz coûte en effet dix fois moins cher que celui de l’électricité. Les coûts seraient donc beaucoup moins impactés, comparé à l’achat d’électricité verte à l’étranger pour ensuite

ÉNERGIE

L’ÉLECTRICITÉ VERTE DOIT ENCORE BAISSER SES COÛTS

En constante baisse depuis plusieurs années selon les chiffres de l’Agence internationale des énergies renouvelables, les coûts de l’électricité verte française affichent pourtant un niveau toujours trop élevé pour profiter pleinement à la filière de l’hydrogène vert, qui en a massivement besoin pour produire du gaz décarboné grâce aux électrolyseurs. “Pour être compétitive, une électrolyse devrait disposer d’un prix de 20 à 30 euros le MWh”, annonce Pascal Mauberger, PDG de l’équipementier McPhy. Or, les tarifs actuels avoisinent plutôt 60 euros le MWh. L’ensemble du secteur des énergies renouvelables et de l’électricité verte doit donc redoubler d’efforts pour améliorer encore sa compétitivité, qui sera ensuite répercutée sur l’hydrogène vert.

fabriquer l'hydrogène sur le territoire français. La quantité d'hydrogène décarboné disponible à l'échelle nationale pourrait ainsi commencer à augmenter. Cela ouvrirait **de nouvelles possibilités commerciales aux transporteurs de gaz et aux énergéticiens**. "Avec l'hydrogène, des actifs échoués pourraient même retrouver une seconde jeunesse. Pour les gestionnaires d'infrastructures existantes, c'est une planche de salut", certifie le fondateur de SolaireDirect. Si ces opportunités émanant de l'étranger paraissent engageantes, **des initiatives voient aussi le jour sur le territoire français** dans le but de massifier la production nationale. Fondée en 2016, l'entreprise H2V Product planifie la construction de deux usines de production massive, capables de générer 27 000 tonnes d'hydrogène décarboné chaque année. Situées à Saint-Jean-de-Folleville (Seine-Maritime) et Dunkerque (Nord), elles devraient voir leur construction démarrer en 2022, sous réserve des dernières autorisations nécessaires en attente. Le groupe évalue l'investissement à 250 millions d'euros par usine, chacune débouchant ensuite sur la création de 100 emplois. Directrice de la communication de l'entreprise, Sandra Moschetti décrit H2V Product comme une "société pionnière qui participe activement

au développement de la filière hydrogène en construisant des usines pour déployer massivement et mondialement de l'hydrogène".

Cette problématique de la massification se répercute également dans le développement de la mobilité. Les prix élevés des véhicules et de l'hydrogène en tant que carburant seront amenés à baisser si la production augmente. "On saura faire un système hydrogène moins cher que le diesel quand on en produira autant que son équivalent diesel", défend Fabio Ferrari, PDG de l'équipementier automobile Symbio. "Tout le monde doit y aller en même temps. Il ne faut pas répéter l'erreur faite sur les panneaux solaires ou la batterie. Nous sommes désormais en retard sur ces domaines, mais pour l'hydrogène, on peut être en avance." Il prône également un engagement massif du secteur automobile, afin d'augmenter le nombre de véhicules en circulation, mais également des secteurs industriel et énergétique, pour multiplier le nombre de stations d'avitaillement et améliorer les équipements. La somme de ces efforts pourra **amener "le prix de l'hydrogène au niveau du diesel rapidement"**, ce qui semble indispensable pour que la mobilité hydrogène décolle véritablement.

L'HYDROGÈNE BLEU, UNE SOLUTION INTERMÉDIAIRE ?

L'hydrogène bleu est produit de la même manière que l'hydrogène gris, mais les émissions de CO₂ théoriquement relâchées dans l'atmosphère sont cette fois-ci captées et stockées. Cette solution, intermédiaire entre les hydrogènes gris et vert, pourrait constituer un point de passage pour effectuer la transition entre les deux, le temps que la filière de l'hydrogène vert s'industrialise intégralement. C'est notamment la théorie défendue par Noé van Hulst, spécialiste de l'hydrogène au ministère néerlandais des affaires économiques et de la politique climatique, ou par l'Agence internationale de l'énergie renouvelable, qui admet que l'hydrogène bleu peut servir "dans les zones disposant de réserves de combustibles fossiles à bas prix". Quelques projets voient ainsi le jour comme celui du norvégien Equinor, qui compte produire massivement de l'hydrogène bleu à partir du gaz naturel enfoui en mer du Nord. Air Liquide défend également le recours à cette solution décarbonée "dans l'intervalle". Cet engouement serait aussi l'occasion d'améliorer les technologies de stockage et de captage de CO₂.

Poursuivre les recherches sur le rendement des technologies et les matériaux utilisés

En produisant plus d'hydrogène à partir des mêmes équipements, la filière serait en mesure de trouver plus facilement la rentabilité. Elle doit donc poursuivre ses efforts en matière de recherche et développement ainsi que ses investissements technologiques, tant pour **améliorer les capacités de production que pour diminuer les coûts des équipements**. Selon une étude prospective menée par McKinsey, **la France devrait investir 8 milliards d'euros d'ici 2028** dans les équipements, l'infrastructure, la mise à l'échelle des moyens de production et la R&D pour atteindre ces objectifs. Responsable au centre de recherche d'Engie, Hélène Pierre confirme qu'il faut "améliorer les rendements afin de réduire les coûts. Aujourd'hui, un électrolyseur possède un rendement d'environ 70 %. Demain, nous dépasserons peut-être 90 % si nous progressons sur l'électrolyse à haute température." *L'Express* cite également des piles à combustible "loin de l'optimisation atteinte dans l'industrie des semi-conducteurs", et pour lesquelles des améliorations sont encore possibles, tant dans le processus de production que d'exploitation.

Les travaux concourant à ces objectifs se multiplient au sein des centres de recherche. En décembre 2019, *Environnement magazine* relaie l'initiative prise par des chercheurs de différentes universités européennes (Glasgow, Kiel, Lisbonne, Académie hongroise des sciences), qui ont recours au molybdène pour "produire plus efficacement de l'hydrogène par électrolyse de l'eau". Lors du procédé d'électrolyse, les électrodes recouvertes d'un catalyseur à base de tellure de molybdène gagnent en productivité et permettent de "presque doubler la quantité d'hydrogène produite par millivolt d'électricité". Cela revient donc à **diviser par deux la quantité d'énergie nécessaire pour générer un même volume d'hydrogène**. "Nos recherches fournissent de nouvelles informations importantes sur la production d'hydrogène à partir d'électrolyse de manière plus efficace et économique", défend le Dr Alexey

Ganin. Les universités réfléchissent désormais à **mobiliser l'intelligence artificielle** pour "affiner les séquences des courants appliqués" et augmenter encore davantage le rendement.

La quête d'innovation se porte aussi sur **la réduction du coût des matériaux utilisés** dans les équipements, en trouvant des alternatives ou en réduisant la quantité nécessaire. L'édition 2019 de l'EFCD (Discussions sur l'électrolyse et les piles à combustible), rendez-vous international regroupant les acteurs de ces filières, portait sur "la réduction de la quantité de matériaux critiques dans les catalyseurs. [...] Ces matériaux sont chers et produits dans un nombre restreint de pays, ce qui implique des enjeux géostratégiques". Le platine, "ingrédient miracle" pour *Industrie & Technologies*, utile pour les processus d'électrolyse dans les piles à combustible et garant d'un rendement élevé, constitue ainsi un "frein important au passage à l'échelle industrielle". La réduction de la quantité utilisée dans les électrodes, "passée de quelques dizaines de mg/cm² dans les années 1980 à 0,1-0,2 mg/cm² en 2016", représente une avancée cruciale, mais les coûts de cette matière première demeurent cependant très élevés en raison de sa rareté. Utilisé lors de l'électrolyse, l'iridium, dont le gramme coûtait plus de 40 euros en 2019, pose une problématique similaire. Afin de faire baisser les coûts, la filière de l'hydrogène et les fabricants de piles à combustible doivent parvenir à **remplacer ces métaux rares ou à optimiser drastiquement leur utilisation**. Les institutions scientifiques apparaissent en première ligne pour lever ces obstacles. Le CEA travaille par exemple sur la conception de nanostructures en platine, afin d'accroître l'action de ce dernier tout en réduisant la quantité de matière utilisée. En Amérique du Nord, des chercheurs ont remplacé le platine par un substrat de cuivre dopé avec de l'oxyde de chrome et du nickel, un alliage qui permet même de réduire la tension électrique nécessaire pour casser la molécule d'eau. En 2019, des chercheurs basés à Rennes et Versailles

ont mis au point une “technologie robuste et économique” utilisant “des éléments peu onéreux et abondants”, rapporte *Environnement magazine*. Elle se base sur un nouveau catalyseur conçu à base de molybdène et de soufre, supporté par un analogue moléculaire d'oxyde de tungstène. Le système produit ensuite des bulles d'hydrogène par décomposition de l'eau lorsqu'il est exposé à une source lumineuse et un potentiel électrique. L'Afhypac relève également les nombreuses recherches en cours pour trouver des alternatives au platine, qui font notamment appel au graphène, au cobalt, au tungstène, aux polymères, aux nanoparticules et même aux catalyseurs bio-inspirés à partir d'enzymes. Les piles à combustible à haute température, qui ne nécessitent pas de platine mais fonctionnent grâce à un apport important de chaleur, concentrent également les attentions malgré des domaines d'application encore restreints.

“Ces travaux sont en cours de maturation et ces préoccupations économiques poussent les industriels à s'impliquer dans des projets de recherche”, souligne *Industrie & Technologies*. Les entreprises prennent conscience de **l'importance de ce volet R&D** dans le développement de la filière

et **accélèrent leurs recherches en interne**. Le Lab Hydrogène d'Engie, qui œuvre à la réduction des coûts de production et de distribution de l'hydrogène vert et à l'intégration de solutions innovantes dans les infrastructures, souhaitait renforcer ses effectifs début 2020 et recrutait des chefs de projet. EDF a créé un groupe de recherche *Low Carbon Hydrogen System* au sein de ses laboratoires, qui se concentre sur “l'efficacité de la chaîne de valeur de l'hydrogène tout en réduisant les coûts d'investissement et en simplifiant les processus de maintenance”. La **collaboration avec des entités scientifiques constitue une autre voie possible**. Air Liquide travaille avec le CEA afin de mettre au point de nouveaux procédés plus optimisés pour le stockage comprimé de l'hydrogène. Volkswagen a conclu un partenariat fin 2018 avec l'université de Stanford dans le but d'utiliser moins de platine dans ses piles à combustible et d'améliorer l'efficacité de la catalyse. Les progrès déjà effectués sur la production de l'hydrogène vont donc devoir se poursuivre pour que la filière atteigne son plein potentiel. À l'heure de l'industrialisation, **chaque procédé doit être optimisé**, tant sur les plans économiques que technologiques.

MATÉRIAU

LE PLATINE, UN ENJEU DÉCISIF

Au-delà d'une question d'optimisation et de rendement, la problématique du platine s'annonce cruciale pour l'avenir de la filière hydrogène. “Il serait impossible d'imaginer alimenter le parc automobile électrique avec les piles [à combustible], car on n'aurait pas assez de platine sur Terre”, estime Élisabeth Lojou, du laboratoire Bioénergétique et ingénierie des protéines de l'université d'Aix-Marseille. L'Afhypac alerte également sur ce point: “Il serait réducteur (naïf?) de prétendre que l'industrialisation des technologies hydrogène n'engendrera pas un besoin accru en platine”, admet-elle, alors que les ressources naturelles de cette matière première sont limitées. Pour éviter que le platine ne devienne un point d'achoppement, l'organisme recommande de poursuivre les investissements continus dans la recherche d'alternatives. Celles-ci permettront également de sortir de la dépendance vis-à-vis des plus gros pays producteurs de platine, notamment l'Afrique du Sud (70 % de l'extraction mondiale), la Russie (12 % de l'extraction mondiale) et le Zimbabwe (7 % de l'extraction mondiale).

Créer des synergies entre les acteurs et sur les territoires

Développer conjointement l'offre et la demande, à travers les rapprochements

Créer la demande dans les secteurs clients tout en développant l'offre dans la filière de l'hydrogène représente le principal défi pour favoriser l'essor de la filière. Pour le relever, les synergies se multiplient entre les acteurs positionnés à différents échelons de la chaîne de valeur.

À travers ses multiples rapprochements, Air Liquide poursuit par exemple la **volonté de créer tout un écosystème autour de l'hydrogène**. Possédant des savoir-faire dans la production, le stockage et la distribution de l'hydrogène, le groupe noue des partenariats avec de nombreuses entreprises françaises et étrangères, constructeurs de véhicules à hydrogène, développeurs de stations et énergéticiens.

Outre le développement de nouveaux équipements nécessaires à la production, au stockage et à la distribution d'hydrogène, ces alliances

permettent également d'**imaginer de nouveaux services**. Associée à Air Liquide, au constructeur Toyota et à l'entreprise de services liés à l'énergie et l'environnement durable Idex, la société de taxis à hydrogène Hype souhaite par exemple créer un "écosystème complet de l'hydrogène pour répondre à la demande de ses clients". Ces partenaires sont réunis dans une entreprise conjointe baptisée Hysetco, fondée début 2019. Elle couvre deux volets : la distribution d'hydrogène et le développement des usages de la mobilité. Dans cet ensemble, Hysetco achètera les voitures de Toyota. Ce dernier s'est engagé à réduire le coût de la Mirai et à augmenter les cadences de production. Les chauffeurs se verront alors proposer un leasing, sur trois ans, pour un kilométrage de 250 000 km, avec un loyer compris entre 800 et 1 000 euros par mois. Parallèlement, Hysetco devrait financer l'installation d'une dizaine de stations à hydrogène. De cette façon, la joint-venture veut "**créer un environnement viable économiquement** en incitant d'autres sociétés de taxis / VTC à rouler à

L'Hydrogen Council, une initiative mondiale

Passé de 13 membres à une cinquantaine entre 2017 et 2018, l'Hydrogen Council, ou Conseil de l'hydrogène, illustre la nécessité pour les acteurs de la filière de se rapprocher pour développer le marché. La structure a été fondée en 2017 par de grandes entreprises de plusieurs secteurs : énergéticiens, pétroliers, industriels des gaz, constructeurs et équipementiers automobiles. Il s'agissait d'Air Liquide, Alstom, Anglo American, BMW Group, Daimler, Engie, Honda, Hyundai Motor, Kawasaki, Royal

Dutch Shell, The Linde Group, Total et Toyota. À travers cet organisme, les dirigeants des grandes entreprises contribuent à "définir des stratégies et à prendre les décisions opérationnelles qui en découlent", explique Air Liquide dans son rapport "Cap sur l'hydrogène". Ils participent aussi à l'harmonisation des normes de l'industrie entre les régions et les secteurs. Leur regroupement permet également aux acteurs de la filière de parler d'une seule voix auprès des pouvoirs publics. Les membres de l'Hydrogen Council réclament ainsi un engagement de leur part, afin de coordonner et d'encourager les investissements. "Nous avons besoin que les gouvernements soutiennent l'hydrogène par des actions qui leur sont propres – par exemple par le biais de vastes projets d'investissement dans les infrastructures", insiste Air Liquide.

l'hydrogène". Sa stratégie vise un développement de la flotte d'ici les Jeux Olympiques 2024 organisés à Paris, afin que la manifestation soit "synonyme de zéro émission", commente le journaliste Erick Fontaine, sur le site *lesnumeriques.com*.

Organiser les rapprochements sous la forme de consortiums, clusters et pôles de compétitivité

Philippe Boucly, président de l'Afhyac (Association française pour l'hydrogène et les piles à combustible), voit la création de consortiums comme l'une des solutions majeures à l'essor de la filière. "Il faut se bouger et c'est maintenant. Les technologies sont matures mais chères. Nous devons changer d'échelle. Par la création de

consortiums réunissant l'État, les régions et les industriels, **la demande pourra être sécurisée ce qui permettra d'obtenir des financements auprès des banques**", observe-t-il. Thierry Lepercq, fondateur de SolaireDirect, présage qu'à travers eux de premiers très grands contrats pourront être signés en 2020 et déployés à très grande échelle à l'horizon 2024. Les consortiums combinent en effet l'impulsion et les capacités financières des grandes entreprises, le savoir-faire des PME et ETI et les connaissances techniques et scientifiques des centres de recherche. Ils bénéficient également de la coordination et de l'animation orchestrées par les pôles de compétences et de l'accompagnement des collectivités locales.

Lancé en 2018, le consortium DINAMHySE vise par exemple à **impulser et accélérer le développement d'une filière industrielle hydrogène**



en région Grand Est, dans le cadre de la transition énergétique. Mandaté par le Pôle Véhicule du futur (un pôle de compétitivité), il est financé dans le cadre de l'appel à projets "Be EST Filières d'Avenir" du Grand Plan d'Investissement 2018-2020. Doté de 57 milliards d'euros pour la durée du quinquennat d'Emmanuel Macron, celui-ci contribuera à répondre à quatre grands défis : la neutralité carbone, l'accès à l'emploi, la compétitivité par l'innovation et l'État numérique. Des entreprises, collectivités territoriales et structures

institutionnelles dont l'Ademe, l'Afhyac, l'État et la Région Grand Est apportent également leur soutien à DYNAMHySE.

Le consortium se compose de six entreprises, deux organismes de recherche publique, trois pôles de compétitivité et une collectivité. Les objectifs de cet ensemble sont clairement définis. Ils portent sur :

- la production de 9 000 tonnes d'hydrogène décarboné d'ici 2023, 18 kT à 36 kT d'ici 2028 ;

LA COMPLÉMENTARITÉ DES MEMBRES DU CONSORTIUM DYNAMHYSE SUR LA CHAÎNE DE VALEUR DE L'HYDROGÈNE

Six entreprises	
Engie	À travers ses différentes business units (Engie Cofely, ENGIE Green et Storengy), Engie fournira aux clients, industriels et collectivités de nouveaux services de production, de logistique et de stockage d'hydrogène renouvelable et de récupération. Ils s'inscriront dans le développement d'usages industriels, de mobilité et de chauffage.
EDF	Il apporte une offre d'hydrogène décarboné et compétitif aux clients industriels et dans des applications de mobilité lourde (bus, camion, fluvial, ferroviaire).
Groupe PSA	Usager final, PSA partage les verrous technologiques, économiques, environnementaux et relatifs à la sécurité, en vue du développement de la filière industrielle.
Groupe Cockerill Maintenance et Ingénierie (CMI)	Concepteur de solutions énergétiques et environnementales, CMI partage ses connaissances des marchés et des technologies autour de l'hydrogène vert sur les volets de la production, de la distribution et du stockage.
Haffner Energy	Start-up de la transition énergétique dans le domaine des énergies renouvelables, l'entreprise fournit sa technologie de rupture Hynoca pour la production d'hydrogène renouvelable à partir de biomasse.
R-GDS	Opérateur local du réseau de distribution de gaz naturel à Strasbourg et dans plus de 110 communes du Bas-Rhin, il apportera sa vision de distributeur gazier.
Deux organismes de recherche publique	
Université de Lorraine	Dotée d'une dizaine de laboratoires actifs dans la recherche sur l'hydrogène, l'université participe aux projets pilotes de R&D et à leur déploiement, ainsi qu'à la diffusion de l'information scientifique et à la formation.
CEA Tech Grand Est	Accélérateur d'innovation, il organise des séances d'information et des conférences, et accompagne les projets d'entreprises.
Une collectivité	
Agglomération de Chaumont	En tant que territoire situé sur un des 9 corridors européens de transport prioritaires pour la Commission européenne, l'agglomération participe au déploiement de l'hydrogène, à travers des actions de communication et de sensibilisation aux énergies renouvelables auprès du public. Il vise à simplifier l'acceptation et l'implantation en milieu rural.
Trois pôles de compétitivité	
Pôle Véhicule du futur	Solutions pour véhicules et mobilités du futur.
Fibres-Énergivie	Pôle dédié aux matériaux pour le bâtiment.
Pôle IAR	Pôle de la bioéconomie.

Traitement IndexPresse. Source : Communiqué de presse "DYNAMHySE, un projet pour booster l'hydrogène", janvier 2019

- la mise en place de 10 stations alimentées en hydrogène décarboné produit localement d'ici 2023, et 40 à 100 d'ici 2028 ;
- le développement d'une flotte de 500 véhicules utilitaires légers d'ici 2023, et 2000 à 5000 d'ici 2028 ; ainsi que de 20 véhicules de transport lourd (bus, camions, bateaux) d'ici 2023 et 80 à 200 d'ici 2028.

DYNAMHySE vise à **développer simultanément, sur un même territoire, la flotte de véhicules consommant de l'hydrogène, la production de l'énergie et sa distribution.**

Les clusters, définis comme des réseaux d'entreprises constitués majoritairement de PME et de TPE fortement ancrées localement, se déploient aussi autour de la filière hydrogène. "L'hydrogène n'est pas un sujet réservé aux gros acteurs ; les leviers d'innovation sont multiples", souligne Christophe Philipponneau, directeur général d'Atlantech (quartier urbain bas carbone de La Rochelle). "Il est important que l'on s'attache à faire progresser le sujet collectivement", ajoutait-il à l'occasion de la deuxième rencontre du réseau des acteurs hydrogène de Nouvelle-Aquitaine. Celle-ci, organisée en novembre 2019 par le cluster Énergie stockage en Nouvelle-Aquitaine, avait pour thème : "Quels usages pour nos projets de territoires ?" La Normandie possède aussi son cluster Hydrogène Normand, lancé en décembre 2016 par Énergies Normandie (Association représentative de la filière du mix énergétique). En Bourgogne-Franche-Comté, le développement de l'hydrogène se structure autour du pôle de compétitivité Véhicule du futur et des clusters Vallée de l'énergie, Wind for future et Mecateam, sous l'impulsion du conseil régional. Pôles de compétitivité, clusters et consortiums visent ainsi à rassembler les acteurs de la filière hydrogène à l'échelle régionale dans le but de créer un réseau d'acteurs contribuant au développement de la filière.

Les collectivités locales, actrices du développement de la filière

Les collectivités locales ont un grand rôle à jouer dans la mise en place de ces partenariats. Conscientes de **l'atout que représente**

L'AFHYPAC, UN AUTRE TYPE D'ÉCOSYSTÈME

Créée en 2011, l'Association française hydrogène pile à combustible est décrite comme "un réseau technique" par *Les Échos*. Elle rassemble 55 associations, collectivités locales et pôles de compétitivité. Parmi ces derniers figurent notamment Capenergie, Derbi, Véhicule du futur et Tenerrdis. L'Afhypac compte également 23 groupes industriels, 8 grands groupes utilisateurs d'hydrogène et 9 centres de recherche. Une soixantaine de start-up et de PME innovantes y figurent aussi. Pascal Mauverger, vice-président d'Afhypac et dirigeant de McPhy, témoigne de l'intérêt de cet élan collectif. Celui-ci, porté par une feuille de route bien définie, "a permis aux sociétés innovantes de prendre leurs premières références commerciales auprès des intégrateurs d'énergie".

Source : Les Échos, octobre 2019.

l'hydrogène pour l'économie locale, elles sont déjà toutes mobilisées en faveur de son développement. "L'hydrogène, c'est une opportunité pour réindustrialiser le pays", annonce Thierry Lepercq. La filière pourrait ainsi représenter de un à trois millions d'emplois en France, dont un quart dans l'industrie. Les collectivités entendent ainsi profiter de la dynamique autour de l'hydrogène, à la fois dans le cadre de leur politique économique et de leur engagement environnemental.

L'intérêt qu'elles portent à l'hydrogène n'est pas nouveau. L'appel à projets "territoires hydrogène", lancé en 2016 par Ségolène Royal, alors ministre de l'environnement, a contribué à cet engagement en labellisant une vingtaine de projets locaux, selon *L'Usine Nouvelle*. L'année suivante, l'Afhypac annonçait la création du Club des élus ambassadeurs de l'hydrogène. Si, par la suite, de nombreux projets de démonstrateurs imaginés en région n'ont pas vu le jour, faute de financements, le plan gouvernemental de 100 millions d'euros lancé en 2018, tout comme les appels à projets

IMPLANTATION DES ACTIVITÉS DANS LES RÉGIONS

Régions	Plan de développement	Entreprises implantées	PAC* et moteurs	Production	Station, avitaillement	Stockage	Voiture, taxi, véhicule utilitaire	Bateau	Bus	Train	Vélo	R&D
Occitanie	Plan Hydrogène vert 150 millions d'euros	Pragma Industries, Alstom, SNCF, Braley, Engie, Safran Power Unit, Engie Cofely		x	x		x		x	x	x	x
Auvergne-Rhône-Alpes	Plan Zero Emission Valley 50 millions d'euros	Atawey, Michelin, GNVert (Engie), Hymulsion (Région, Engie, Michelin, CDC), McPhy (EDF), Symbio, Ergosup, Ad-Venta, CEA		x	x		x					
Normandie	Plan Normandie Hydrogène 15 millions d'euros	Chantiers Allais, H2V Product, Symbio, Morphosis, Pragma Industries, Ergosup	x	x	x		x	x			x	
Bourgogne-Franche-Comté		Mahytec, Faurecia, Rougeot Énergie, Stella, Gaussin, H2SYS, Alstom	x	x		x	x		x			x
Bretagne		Michelin, Engie Cofely		x			x	x				
Centre-Val de Loire		Storengy (Engie), McPhy (EDF)					x				x	x
Corse		Areva, CEA										x
Grand Est		McPhy (EDF), Alstom		x	x		x		x			
Hauts-de-France		H2V Industry, Safran, Engie, GRDF		x					x			x
Île-de-France		Akvo Energy, Atawey, Toyota, Air Liquide, Idex, Société du taxi électrique parisien (Step)		x	x		x					
Nouvelle-Aquitaine		HDF Energy, Pragma Industries, GNVert (Engie)	x	x				x	x	x	x	
Pays de la Loire		IMH2, Air Liquide, DCNS		x				x				x
Provence-Alpes-Côte d'Azur		Air Liquide, EDF, Engie, SNCF, GRT Gaz, AP2E, Areva SE, CEA, CMR Group, Cybernetix, Hysilabs, Hyseas			x		x	x	x			x

Traitement IndexPresse. Source : L'Usine nouvelle, juillet 2019

* PAC : pile à combustible

émis par l'Ademe, pourraient contribuer à en faire émerger de nouveaux.

Déjà, **des régions se démarquent en faisant le choix d'investir dans le développement d'une filière hydrogène** sur leur territoire. Parmi elles, la Normandie a annoncé un investissement de 15 millions d'euros début 2019. La région compte déjà de multiples initiatives locales, dont une usine de production de 28 000 tonnes d'hydrogène vert annuelles à Port-Jérôme (Seine-Maritime), un projet de bateau de pêche à Cherbourg (Manche) pour les Chantiers Allais, l'utilisation de vélos à hydrogène à Cherbourg et Saint-Lô (Manche), le recyclage des piles à combustible, ainsi que le déploiement de 15 stations à hydrogène et 250 véhicules. La Région Auvergne Rhône-Alpes investira quant à elle 50 millions d'euros à travers son plan Zero Emission Valley (ZEV) combinant le développement de la flotte de véhicules et de stations à hydrogène, ainsi que la production industrielle de 150 000 m³/an.

Parmi les territoires engagés dans le développement de l'hydrogène, l'Occitanie se démarque par la hauteur de son investissement. Elle consacrera 150 millions d'euros à son Plan Hydrogène Vert pour la période 2019-2030. Il doit permettre à la région d'assurer son leadership dans la filière hydrogène tant en France qu'en Europe. Pour cela, il repose sur **"une vision intégrée de la filière, de la production à la distribution, jusqu'aux usages"**, commente l'Agence de développement économique Ad'OCC Région Occitanie.

L'Occitanie compte parmi ses atouts l'implantation de multiples industriels du transport et des mobilités sur son territoire. Parmi eux, figurent Alstom, concepteur de trains à hydrogène; Safran, constructeur de bus à hydrogène; et Safran, actif dans le projet Pipaa visant le développement de piles à combustible pour l'aéronautique. Dans le secteur des transports, la région déploie son projet HyPort, soutenu par l'entreprise du même nom et retenu en 2016 dans le cadre de l'appel à projets national "Territoires hydrogène". Il prévoit le développement des infrastructures de production

et de distribution d'hydrogène vert, ainsi que **le développement d'un service de mobilité vert** sur les aéroports de Toulouse-Blagnac (Haute-Garonne) et de Tarbes-Lourdes-Pyrénées. Il vise notamment à déployer des services de location de véhicules hydrogène comme les bus, véhicules utilitaires ou véhicules de tourisme sur et autour des zones aéroportuaires.

Parallèlement à ces différents projets, **l'Occitanie progresse dans le domaine de la production d'un hydrogène vert**. La production, le stockage et la distribution d'hydrogène par voie fermentaire sont étudiés à travers les projets du syndicat mixte départemental de valorisation des déchets ménagers Trifyl (Tarn) et de la société Braley (Aveyron). Ondulia, producteur d'énergies renouvelables, prévoit quant à lui de coupler une centrale hydroélectrique à un électrolyseur et de cibler les véhicules à pile à combustible.

"Notre objectif est de faire de l'Occitanie la première région à énergie positive d'Europe. **L'hydrogène a un rôle structurant dans ce contexte de transition énergétique**", explique Carole Delga, présidente de la Région Occitanie / Pyrénées-Méditerranée et de Madeeli (Agence de l'innovation et du développement économique). À l'horizon 2050, la région souhaite couvrir 100 % de ses besoins en énergie par le renouvelable. L'Occitanie se classe déjà comme la première région française pour sa production photovoltaïque, deuxième pour l'hydroélectricité et troisième pour l'éolien. Elle envisage l'hydrogène comme un nouveau levier pour atteindre son objectif. L'hydrogène vert, produit par électrolyse de l'eau grâce à une électricité d'origine renouvelable et par voie fermentaire, sera **utilisé dans des véhicules à hydrogène ou injecté dans le réseau de gaz**.

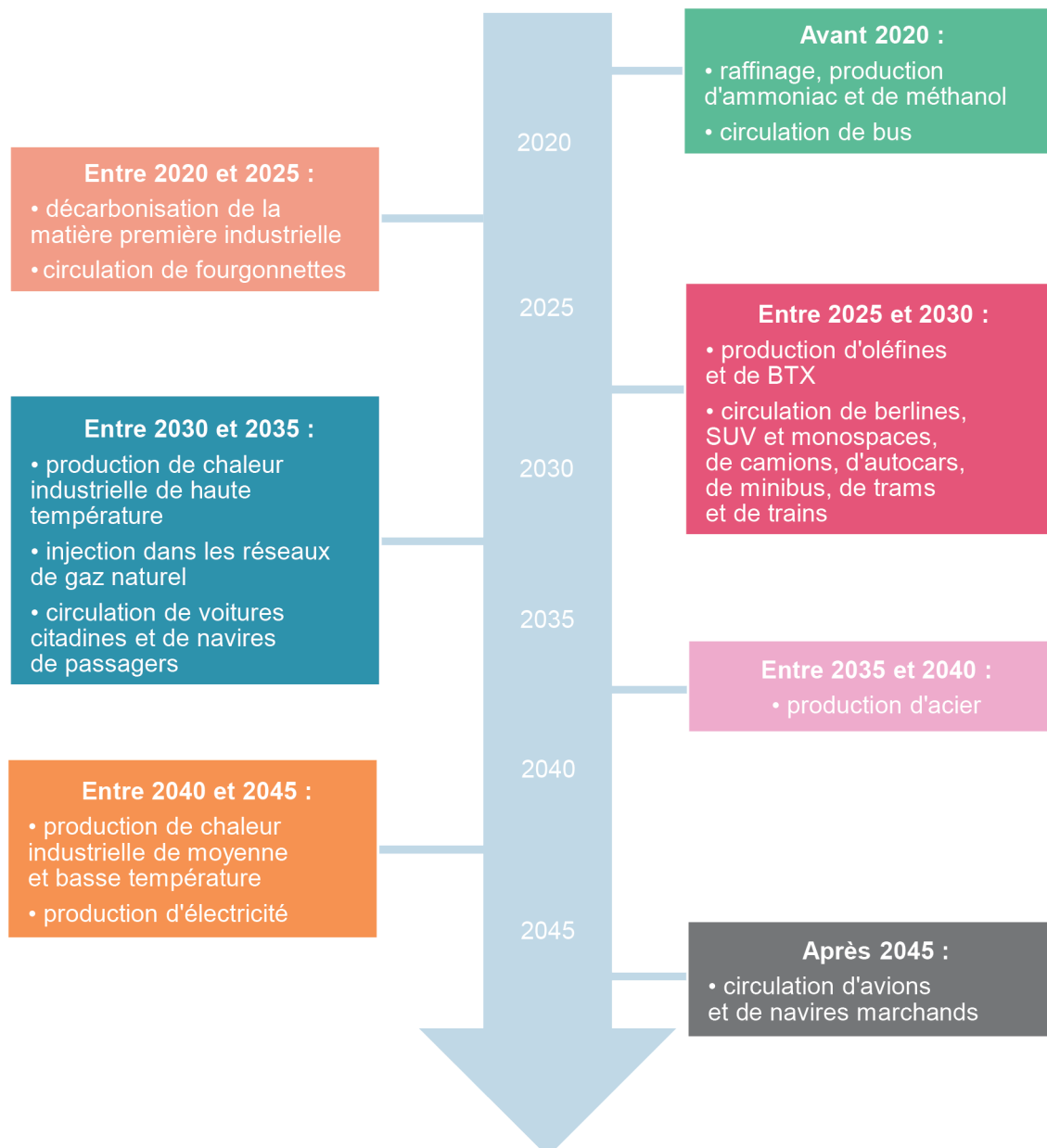
L'hydrogène bénéficie ainsi de la forte mobilisation de l'ensemble des acteurs de la chaîne de valeur: industriels, État, et régions. Tous œuvrent collectivement pour permettre à la filière hydrogène de poursuivre son développement à l'heure de la transition énergétique.

L'HYDROGÈNE S'ENGAGE SUR LE LONG TERME

Entamés durant la décennie 2010, les projets et les investissements destinés à faire monter en puissance la filière de l'hydrogène vont se poursuivre au cours des prochaines années. Énergéticiens, transporteurs, équipementiers, spécialistes du gaz, tous se mobilisent pour que l'hydrogène, et plus particulièrement l'hydrogène vert, occupe une place majeure dans la transition énergétique. Ce dynamisme collectif, indispensable pour amorcer l'expansion de ce gaz, ne semble toutefois connaître ici que ses prémices. **L'envol de l'hydrogène s'envisage sur le long terme**, dans plusieurs dizaines d'années. Les prévisions économiques et énergétiques faisant état d'un futur marché français de 40 milliards d'euros, de 150 000 emplois créés, de 20 % d'hydrogène dans la demande d'énergie nationale ou de 18 % dans l'alimentation du parc de véhicules se projettent en 2050. L'Ademe élabore des scénarios à l'horizon 2035. Ces dates peuvent paraître lointaines, mais "réaliser la vision 2050 impose de **changer d'échelle dès maintenant**", rappelait *Pétrole & Gaz - Énergies Nouvelles* à l'automne 2019. L'ensemble des acteurs de la filière doivent avoir conscience de leur engagement pour lequel "une stratégie de long terme est nécessaire". L'industrialisation et la massification de la production d'hydrogène décarboné **posent leurs premiers jalons début 2020**, portés par la multiplication de projets de grande envergure en France mais également à l'étranger. Les investissements et les actions menées par les acteurs de la filière, traditionnels ou nouveaux, témoignent de "l'impulsion" dont doit bénéficier dès aujourd'hui le secteur, comme l'évoquait le directeur général de Plastic Omnium, Jean-Michel Szczerba. L'objectif ne consiste pas à réaliser des profits sur le court terme, mais bien à **se positionner maintenant sur un marché porteur d'opportunités économiques pour les trente ans à venir**. "Une réalité aujourd'hui et, surtout, un enjeu pour demain", titrait *Investir* pour un article concernant

la stratégie d'Air Liquide. Si le groupe multiplie ses participations à des projets, des consortiums et investit dès aujourd'hui dans l'hydrogène, son dirigeant principal, Benoît Potier, sait qu'il faudra attendre au moins 2030 pour voir "l'hydrogène réellement décoller". La compétitivité de l'hydrogène vert par rapport à l'hydrogène gris s'inscrit dans une perspective similaire : loin d'être atteinte en 2020, **elle se rapproche pourtant à chaque investissement et avancée dans le domaine**. "Les experts divergent sur ce point mais son coût chutera dans les prochaines années grâce aux progrès de la recherche et aux économies d'échelle", prédisait Emmanuel Austruy, membre du Boston Consulting Group, en novembre 2019. Pour Patrick Corbin, président de l'Association française du gaz, les premiers effets visibles de l'hydrogène dans le bilan énergétique français apparaîtront en 2030 ou 2035, quand la filière aura atteint un niveau de développement supérieur dans l'industrie et la mobilité. Cette prise de conscience apparaît également chez Alstom par rapport à son engagement dans le train à hydrogène. "Il faut accepter de payer le prix de démarrage d'une technologie", concède le directeur technico-commercial Yannick Legay en 2019. Alstom planifie en réalité son plan hydrogène sur plus de quinze ans, depuis les premiers essais en circulation en 2022 jusqu'aux services commerciaux en 2024, avant une décarbonation de l'ensemble du ferroviaire français établie pour 2035. Ces nécessaires projections à long terme **concordent avec la réflexion écologique globale de la France**, qui souhaite réduire ses émissions de CO₂ de 70 % d'ici 2050, et avec les plans nationaux de nombreux autres pays, engagés tout au long du siècle à venir. La filière peut décoller conjointement à ces objectifs nationaux, en étant complémentaire à celles des énergies et de l'électricité renouvelables. L'hydrogène apparaît ainsi à la fois comme **un moteur et un fruit de la longue transition écologique et énergétique**.

DATE D'ACCEPTABILITÉ DES TECHNOLOGIES HYDROGÈNE POUR LE MARCHÉ DE MASSE



Traitement : IndexPresse. Source : Association française pour l'hydrogène et les piles à combustible (Afhypac).

LES FORCES EN PRÉSENCE

Entreprises et organismes cités dans l'étude

Société	Nature de l'entreprise	Pays d'origine
Aqius	Industriel des transports - constructeur de scooters à hydrogène	France / Suisse
Ad-Venta	Équipementier pour la filière de l'hydrogène	France
Agence de l'environnement et de l'énergie (Ademe)	Organisation professionnelle	France
Agence internationale de l'énergie	Organisation professionnelle	France
Agglomération de Chaumont	Collectivité locale	France
Agglomération Durance-Luberon-Verdon	Collectivité locale	France
Air Liquide	Société de gaz et/ou du secteur de l'énergie active dans la filière de l'hydrogène	France
Air Products	Société de gaz et/ou du secteur de l'énergie active dans la filière de l'hydrogène	États-Unis
Airbus	Industriel des transports - acteur de la construction aéronautique	France
Akasol	Équipementier pour la filière de l'hydrogène	Allemagne
Akuo Energy	Équipementier pour la filière de l'hydrogène	France
Alpiq	Société de gaz et/ou du secteur de l'énergie active dans la filière de l'hydrogène	Suisse
Alstom	Industriel des transports - constructeur ferroviaire	France
Alzette-Belval	Établissement public d'aménagement d'Alzette-Belval	France
American bureau of shipping	Industriel des transports - acteur de la construction navale	États-Unis
Amvalor	Cellule de valorisation du Laboratoire Angevin de Mécanique, procédés et innovation	France
Anglo American	Transformation minière	Royaume-Uni
AP2E	Équipementier pour la filière de l'hydrogène	France
ArcelorMittal	Industriel - client traditionnel de l'hydrogène	France
Areva H2Gen	Équipementier pour la filière de l'hydrogène	France
Armateurs de France	Organisation professionnelle	France
Association française pour l'hydrogène et les piles à combustible (Afhypac)	Organisation professionnelle	France
Ataway	Start-up - Équipementier pour la filière de l'hydrogène	France
Audi	Industriel des transports - constructeur de voitures particulières et/ou véhicules utilitaires et/ou poids lourds	Allemagne
Avacon Natur	Société de gaz et/ou du secteur de l'énergie active dans la filière de l'hydrogène	Allemagne
Avere - Association pour le développement de la mobilité électrique	Organisation professionnelle	France
Ballard Power Systems	Équipementier pour la filière de l'hydrogène	Canada
balticFuelCells	Équipementier pour la filière de l'hydrogène	Allemagne
BMW	Industriel des transports - constructeur de voitures particulières et/ou véhicules utilitaires et/ou poids lourds	Allemagne
Boeing	Industriel des transports - acteur de la construction aéronautique	États-Unis
Bosch	Équipementier automobile et équipementier pour la filière de l'hydrogène	Allemagne
Braley	Société de services à l'environnement	France
Caetano	Industriel des transports - constructeur de voitures particulières et/ou véhicules utilitaires et/ou poids lourds	Portugal
California Fuel Cell Partnership	Consortium	États-Unis

Société	Nature de l'entreprise	Pays d'origine
Carrier Transicold	Équipementier automobile	France
CEA	Organisme de recherche	France
CETIAT (Centre technique des industries aéronautiques et thermiques)	Organisme de recherche	France
Chantiers Allais	Industriel des transports - acteur de la construction navale	France
Chereau	Industriel des transports - constructeur de voitures particulières et/ou véhicules utilitaires et/ou poids lourds	France
China National Heavy Duty Truck	Industriel des transports - constructeur de voitures particulières et/ou véhicules utilitaires et/ou poids lourds	Chine
CMR Group	Équipementier pour la filière de l'hydrogène	France
CNH Industrial	Industriel des transports - constructeur de voitures particulières et/ou véhicules utilitaires et/ou poids lourds	Italie / États-Unis
Communauté de communes du Pays Haut Val d'Alzette	Collectivité locale	France
Communauté urbaine de Dunkerque	Collectivité locale	France
Compagnie maritime belge	Opérateur de transport et/ou service de mobilité	Belgique
Compagnie nationale du Rhône (CNR)	Société de gaz et/ou du secteur de l'énergie active dans la filière de l'hydrogène	France
Crédit agricole Centre-France	Société de financement	France
Crédit mutuel Arkéa	Société de financement	France
Cybernetix	Équipementier pour la filière de l'hydrogène	France
Daher	Industriel des transports - acteur de la construction aéronautique	France
Daimler	Industriel des transports - constructeur de voitures particulières et/ou véhicules utilitaires et/ou poids lourds	Allemagne
Dassault Aviation	Industriel des transports - acteur de la construction aéronautique	France
DCNS	Industriel des transports - acteur de la construction navale	France
Demeter	Société de financement	France
Derbi	Pôle de compétitivité	France
DYNAMHySE	Consortium	France
DK'Bus	Opérateur de transport et/ou service de mobilité	France
Doosan Fuel Cell	Équipementier pour la filière de l'hydrogène	Corée du Sud
EDF	Société de gaz et/ou du secteur de l'énergie active dans la filière de l'hydrogène	France
Energy Observer	Industriel des transports - acteur de la construction navale	France
Enertrag	Équipementier pour la filière de l'hydrogène	Allemagne
Engie	Société de gaz et/ou du secteur de l'énergie active dans la filière de l'hydrogène	France
Engie Cofely (Engie Énergie Service)	Société de gaz et/ou du secteur de l'énergie active dans la filière de l'hydrogène	France
Ergosup	Start-up - Équipementier pour la filière de l'hydrogène	France
Faurecia	Équipementier automobile	France
FC Lab	Organisme de recherche	France
Fibres-Énergievie	Pôle de compétitivité	France
FirstElement Fuel Inc.	Équipementier pour la filière de l'hydrogène	États-Unis
Fjord 1	Opérateur de transport et/ou service de mobilité	Norvège
Ford	Industriel des transports - constructeur de voitures particulières et/ou véhicules utilitaires et/ou poids lourds	États-Unis
FPT Industrial	Équipementier automobile	Italie
Gasunie	Société de gaz et/ou du secteur de l'énergie active dans la filière de l'hydrogène	Pays-Bas
Gaussin	Équipementier pour la filière de l'hydrogène	France
GNvert	Équipementier pour la filière de l'hydrogène	France
Go Capital	Société de financement	France
GRDF	Société de gaz et/ou du secteur de l'énergie active dans la filière de l'hydrogène	France
Groupe Cockerill Maintenance et ingénierie (CMI)	Équipementier pour la filière de l'hydrogène	Belgique

Société	Nature de l'entreprise	Pays d'origine
Groupe Jean Lain	Distributeur automobile	France
GRTgaz	Société de gaz et/ou du secteur de l'énergie active dans la filière de l'hydrogène	France
H2 Energy	Société de gaz et/ou du secteur de l'énergie active dans la filière de l'hydrogène	Suisse
H2SYS	Équipementier pour la filière de l'hydrogène	France
H2V Industry (H2V Product)	Société de gaz et/ou du secteur de l'énergie active dans la filière de l'hydrogène	France
H3 Dynamics	Équipementier pour la filière de l'hydrogène	Singapour
Haffner Energy	Start-up - Équipementier pour la filière de l'hydrogène	France
HES energy Systems	Équipementier pour la filière de l'hydrogène	Singapour
Honda	Industriel des transports - constructeur de voitures particulières et/ou véhicules utilitaires et/ou poids lourds	Japon
Horizon Fuel Cell Technologies	Équipementier pour la filière de l'hydrogène	Singapour
Hydrogen Council	Organisation professionnelle	Belgique
Hydrogène de France (HDF)	Équipementier pour la filière de l'hydrogène	France
Hydrogenics	Équipementier pour la filière de l'hydrogène	Canada
Hydrosponder	Société de gaz et/ou du secteur de l'énergie active dans la filière de l'hydrogène	Suisse
Hympulsion	Équipementier pour la filière de l'hydrogène	France
Hynamics	Société de gaz et/ou du secteur de l'énergie active dans la filière de l'hydrogène	France
Hyseas	Équipementier pour la filière de l'hydrogène	France
Hysetco	Opérateur de transport et/ou service de mobilité	France
HySiLabs	Start-up - Équipementier pour la filière de l'hydrogène	France
Hyundai	Industriel des transports - constructeur de voitures particulières et/ou véhicules utilitaires et/ou poids lourds	Corée du Sud
Hyundai Hydrogen Mobility (HHM)	Consortium	Suisse
ID4Car	Pôle de compétitivité	France
I dex	Équipementier pour la filière de l'hydrogène	France
IFB Énergies nouvelles	Organisme de recherche	France
INERIS (Institut national de l'environnement industriel et des risques)	Organisme de recherche	France
Infraserv GmbH & Co. Höchst KG	Industriel de la chimie actif dans la filière de l'hydrogène	Allemagne
Intelligent Energy	Équipementier pour la filière de l'hydrogène	Royaume-Uni
ITM Power	Équipementier pour la filière de l'hydrogène	Royaume-Uni
Iveco	Industriel des transports - constructeur de voitures particulières et/ou véhicules utilitaires et/ou poids lourds	Italie
Japan H2 Mobility Germany	Consortium	Japon
Kawasaki	Industriel des transports - constructeur de motos	Japon
Lhyfe	Start-up - Équipementier pour la filière de l'hydrogène	France
Linde	Société de gaz et/ou du secteur de l'énergie active dans la filière de l'hydrogène	Allemagne
LKAB	Industriel - client traditionnel de l'hydrogène	Suède
Mahytec	Équipementier pour la filière de l'hydrogène	France
Malherbe	Opérateur de transport et/ou service de mobilité	France
MAN Cryo	Industriel des transports - acteur de la construction navale	Allemagne
McPhy	Équipementier pour la filière de l'hydrogène	France
Mecateam	Cluster	France
Mercedes-Benz	Industriel des transports - constructeur de voitures particulières et/ou véhicules utilitaires et/ou poids lourds	Allemagne
Michelin	Équipementier automobile	France
Mingtian Hydrogen Energy Technology	Start-up - Équipementier pour la filière de l'hydrogène	Chine
Morphosis	Gestion des déchets	France
Mov'eo	Pôle de compétitivité	France

Société	Nature de l'entreprise	Pays d'origine
Nedstack	Équipementier pour la filière de l'hydrogène	Pays-Bas
Nel Hydrogen	Équipementier pour la filière de l'hydrogène	Norvège
Nikola Motor	Industriel des transports - constructeur de voitures particulières et/ou véhicules utilitaires et/ou poids lourds	États-Unis
Nissan	Industriel des transports - constructeur de voitures particulières et/ou véhicules utilitaires et/ou poids lourds	Japon
OMV	Société de gaz et/ou du secteur de l'énergie active dans la filière de l'hydrogène	Autriche
Ondulia (Cantos Holding)	Équipementier pour la filière de l'hydrogène	France
Optimum CPV	Équipementier pour la filière de l'hydrogène	Belgique
Orano (Areva)	Société de gaz et/ou du secteur de l'énergie active dans la filière de l'hydrogène	France
Pearl Hydrogen	Équipementier pour la filière de l'hydrogène	Chine
Piel	Équipementier pour la filière de l'hydrogène	Italie
Plastic Omnium	Équipementier automobile et équipementier pour la filière de l'hydrogène	France
PlugPower	Équipementier pour la filière de l'hydrogène	États-Unis
PO-Celltech	Équipementier pour la filière de l'hydrogène	Israël
Pôle IAR	Pôle de compétitivité	France
Powercell Sweden	Équipementier pour la filière de l'hydrogène	Suède
Powidian	Équipementier pour la filière de l'hydrogène	France
Pragma Industries	Start-up - Équipementier pour la filière de l'hydrogène - constructeur d'un vélo à hydrogène	France
PSA	Industriel des transports - constructeur de voitures particulières et/ou véhicules utilitaires et/ou poids lourds	France
RATP	Opérateur de transport et/ou service de mobilité	France
Renault	Industriel des transports - constructeur de voitures particulières et/ou véhicules utilitaires et/ou poids lourds	France
R-GDS	Société d'économie mixte opératrice du réseau de gaz	France
Rhein-Main-Verkehrsverbund (RMV)	Opérateur de transport et/ou service de mobilité	Allemagne
Rougeot Énergie	Équipementier pour la filière de l'hydrogène	France
Safra	Industriel des transports - constructeur de voitures particulières et/ou véhicules utilitaires et/ou poids lourds	France
Safran	Industriel des transports - acteur de la construction aéronautique	France
Safran Power Units	Industriel des transports - acteur de la construction aéronautique	France
Salzgitter Flachstah	Industriel - client traditionnel de l'hydrogène	Allemagne
Samskip	Opérateur de transport et/ou service de mobilité	Islande
Sandia National Laboratories	Organisme de recherche	États-Unis
Savoie Technolac	Technopôle	France
SEM Eever'hy'pole	Pôle d'essais de véhicules électriques et à énergie renouvelable à l'hydrogène	France
Shell	Société de gaz et/ou du secteur de l'énergie active dans la filière de l'hydrogène	Pays-Bas
Siemens	Groupe spécialisé dans l'énergie, la santé, l'industrie et le bâtiment - Équipementier pour la filière de l'hydrogène	Allemagne
SNCF	Opérateur de transport et/ou service de mobilité	France
Société du taxi électrique parisien - STEP (Hype)	Opérateur de transport et/ou service de mobilité	France
SolaireDirect	Société de gaz et/ou du secteur de l'énergie active dans la filière de l'hydrogène	France
SSAB	Industriel - client traditionnel de l'hydrogène	Suède
Stelia Aerospace	Industriel des transports - acteur de la construction aéronautique	France
Storengy	Société de gaz et/ou du secteur de l'énergie active dans la filière de l'hydrogène	France
Suzuki	Industriel des transports - constructeur de scooters à hydrogène	Japon
Swiss Hydrogen	Équipementier pour la filière de l'hydrogène	Suisse
Syfen	Start-up - Équipementier pour la filière de l'hydrogène	France
Symbio Fcell	Équipementier pour la filière de l'hydrogène	France

Société	Nature de l'entreprise	Pays d'origine
Syndicat mixte des transports Artois-Gogelle (SMT AG)	Opérateur de transport et/ou service de mobilité	France
Tenerrdis	Pôle de compétitivité	France
Thyssenkrupp	Industriel - client traditionnel de l'hydrogène	Allemagne
Total	Société de gaz et/ou du secteur de l'énergie active dans la filière de l'hydrogène	France
Toyota	Industriel des transports - constructeur de voitures particulières et/ou véhicules utilitaires et/ou poids lourds	Japon
Transdev	Opérateur de transport et/ou service de mobilité	France
Transports Chabas	Opérateur de transport et/ou service de mobilité	France
Transports Perrenot	Opérateur de transport et/ou service de mobilité	France
Trifyl	Syndicat mixte du Tarn pour la valorisation des déchets	France
TrønderEnergi	Société de gaz et/ou du secteur de l'énergie active dans la filière de l'hydrogène	Norvège
Tronico	Équipementier pour la filière de l'hydrogène	France
Université de Lorraine	Organisme de recherche	France
Vallée de l'énergie	Cluster	France
Vattenfall	Société de gaz et/ou du secteur de l'énergie active dans la filière de l'hydrogène	Suède
VDL	Industriel des transports - constructeur de voitures particulières et/ou véhicules utilitaires et/ou poids lourds	Pays-Bas
Véhicule du Futur	Pôle de compétitivité	France
Venhool	Industriel des transports - constructeur de voitures particulières et/ou véhicules utilitaires et/ou poids lourds	Belgique
Verbund	Société de gaz et/ou du secteur de l'énergie active dans la filière de l'hydrogène	Autriche
Voestalpine	Sidérurgiste	Autriche
Wind for future	Cluster	France
Yonn Énergie	Société d'économie mixte opératrice du réseau de gaz	France
ZeroAvia	Industriel des transports - acteur de la construction aéronautique	États-Unis
Zodiac Aerospace	Industriel des transports - acteur de la construction aéronautique	France

Traitement IndexPresse.

Classement des grands groupes français actifs dans la filière de l'hydrogène selon leur chiffre d'affaires

Nom de l'entreprise	Secteur d'activité	CA (millions d'euros)	Année du CA
TOTAL	Pétrole et gaz	186 954	2018
EDF	Production et fourniture d'électricité	68 980	2018
ENGIE	Production et fourniture d'énergie	60 600	2018
AIR LIQUIDE	Gaz industriels	21 011	2018
ORANO (AREVA)	Energie nucléaire et énergies renouvelables	3 600	2018
GRTGAZ	Gestion des réseaux de gaz	1 884	2018
COMPAGNIE NATIONALE DU RHÔNE	Production d'énergie renouvelable	1 380	2018

Traitement IndexPresse. Source : *Boursorama.com*, sites web des entreprises concernées et presse professionnelle.

Classement des ETI, PME et start-up actives dans la chaîne de valeur de l'hydrogène selon leur chiffre d'affaires

Nom de l'entreprise	Date de création	Code NAF	Libellé NAF	CA (kEUR)	Année du CA	Tranche d'effectif salarié
TRONICO	05/12/1991	2612Z	Fabrication de cartes électroniques assemblées	77 174	2018	250 à 499
IDEX SERVICES	22/07/1963	7010Z	Activités des sièges sociaux	35 093	2018	100 à 199
AKUO ENERGY SAS	02/04/2007	3511Z	Production d'électricité	33 345	2018	100 à 199
CMR GROUP	23/05/2006	2651B	Fabrication d'instrumentation scientifique et technique	30 069	2018	50 à 99
CYBERNETIX	01/01/1985	7112B	Ingénierie, études techniques	8 877	2018	100 à 199
HAFFNER ENERGY	20/08/2015	3320B	Installation de machines et équipements mécaniques	5 594	2016	20 à 49
GAUSSIN SA	01/01/1962	2822Z	Fabrication de matériel de levage et de manutention	3 569	2018	20 à 49
AP2E	25/08/2006	7219Z	Recherche-développement en autres sciences physiques et naturelles	3 325	2017	20 à 49
MCPHY ENERGY	01/02/2008	7219Z	Recherche-développement en autres sciences physiques et naturelles	2 931	2018	20 à 49
HYDROGÈNE DE FRANCE	16/11/2012	3511Z	Production d'électricité	2 149	2017	6 à 9
SYMBIO	26/02/2010	7490B	Activités spécialisées, scientifiques et techniques diverses	1 695	2018	20 à 49
PRAGMA INDUSTRIES	01/08/2004	7112B	Ingénierie, études techniques	703	2017	6 à 9
POWIDIAN	30/10/2013	6202A	Conseil en systèmes et logiciels informatiques	507	2016	10 à 19
AREVA H2GEN	01/08/1997	7219Z	Recherche-développement en autres sciences physiques et naturelles	438	2014	20 à 49
CANTOS HOLDING (ONDULIA)	25/06/1991	7010Z	Activités des sièges sociaux	24	2018	1 ou 2

LES FORCES EN PRÉSENCE

Nom de l'entreprise	Date de création	Code NAF	Libellé NAF	CA (kEUR)	Année du CA	Tranche d'effectif salarié
AD-VENTA AUTOMOTIVE	01/06/2017	7219Z	Recherche-développement en autres sciences physiques et naturelles	0	n.d.	0 à 9
ATAWEY	18/09/2012	7112B	Ingénierie, études techniques	0	n.d.	1 à 9
ERGOSUP	10/03/2010	7112B	Ingénierie, études techniques	0	n.d.	10 à 19
H2SYS	07/09/2017	7112B	Ingénierie, études techniques	0	n.d.	0 à 9
H2V PRODUCT (H2V INDUSTRY)	01/09/2016	3511Z	Production d'électricité	n.d.	n.d.	0 à 9
HYSEAS	17/11/2015	7219Z	Recherche-développement en autres sciences physiques et naturelles	n.d.	n.d.	0 à 9
HYSILABS	13/02/2015	7219Z	Recherche-développement en autres sciences physiques et naturelles	n.d.	n.d.	0 à 9
LHYFE	20/07/2017	7112B	Ingénierie, études techniques	n.d.	n.d.	1 à 9
MAHYTEC	14/01/2008	7112B	Ingénierie, études techniques	n.d.	n.d.	20 à 49
ROUGEOT ÉNERGIE	19/09/2019	4312A	Travaux de terrassement courants et travaux préparatoires	n.d.	n.d.	0 à 9
SYLFEN	05/06/2015	2790ZZ	Fabrication d'autres matériels électriques	n.d.	n.d.	0 à 9

Traitement IndexPresse. Sources : Diane et presse professionnelle.
n.d. : non défini

Activités et coordonnées des ETI, PME et start-up

Nom de l'entreprise	Activité	Nom du dirigeant	Adresse	Ville	Numéro de téléphone	Numéro Siret
AD-VENTA AUTOMOTIVE	Société spécialisée dans le stockage et la distribution des gaz sous pression.	M. Jean-Luc MUSSOT	140 RUE DU COL DES LIMOUCHES	26300 CHATEAUNEUF-SUR-ISÈRE	-	830752093-00021
AKUO ENERGY SAS	Prestataire dans la gestion administrative, financière et des ressources humaines. Il assure l'unité de direction de ses propres filiales spécialisées dans le secteur de l'énergie renouvelable.	M. Éric SCOTTO	140 AVENUE DES CHAMPS ÉLYSÉES	75008 PARIS	01 47 66 09 90	495259061-00044
AP2E	Entreprise spécialisée dans les domaines de la conception et fabrication de systèmes d'analyse de gaz. Accompagnement dans le développement de solutions sur mesure répondant aux besoins jusqu'à l'intégration et leur mise en service. Réalisation des appareils de mesure de gaz en ligne.	M. Pierre CHOLAT	240 RUE LOUIS DE BROGLIE PARC DE LA DURANNE	13080 AIX-EN-PROVENCE	04 42 61 29 40	491649067-00023
AREVA H2GEN	Entreprise spécialiste de l'électrolyse. Elle fabrique des électrolyseurs à membrane échangeuse de protons.	M. Michel GUGENHEIM	20 RUE QUENTIN BAUCHART	75008 PARIS	01 69 08 66 10	413598558-00042
ATAWEY	Conception et fabrication des solutions clés en main d'autonomie énergétique pour les sites isolés.	M. Jean-Michel AMARE	17 AV DU LAC LEMAN SAVOIE TECHNOLOGICAL	73370 LE BOURGET-DU-LAC	04 57 36 40 33	753970490-00011
CANTOS HOLDING	Exploitant de centrales hydroélectriques, parcs éoliens, toits photovoltaïques. L'entreprise se développe dans le domaine des énergies renouvelables et la filière hydrogène.	M. Pascal CANTOS	36 RUE ÉDOUARD VAILLANT	12300 DECAZEVILLE	05 65 80 21 10	383318003-00035
CMR GROUP	Entreprise experte en moteurs et groupes électrogènes, instrumentation nucléaire, solution d'automatismes, produits électroniques, capteurs, et accompagnement dans les domaines de l'industrie, de la marine marchande et militaire, de l'énergie et de l'électricité.	M. Neil WILKINSON	7 RUE JOHN MAYNARD KEYNES	13013 MARSEILLE	04 91 11 74 95	490366341-00025

Nom de l'entreprise	Activité	Nom du dirigeant	Adresse	Ville	Numéro de téléphone	Numéro Siret
CYBERNETIX	Entreprise spécialisée dans le contrôle d'intégrité des installations pétrolières ainsi qu'en systèmes télé-opérés pour des interventions en zones irradiées ou contaminées. Cybernetix conçoit, développe et industrialise un éventail de solutions technologiques conçues pour répondre aux problématiques de terrain.	M. Samuel ROCHER	306 RUE ALBERT EINSTEIN TECHNOPÔLE DE CHÂTEAU-GOMBERT	13013 MARSEILLE	04 91 21 77 00	331406637-00024
ERGOSUP	Entreprise spécialisée dans le domaine du développement de technologies de production d'hydrogène sous haute pression. La société propose un procédé de stockage et de conversion d'électricité en hydrogène sous pression.	M. Patrick PAILLÈRE	145 CHEMIN DE LA ROCHE DU GUIDE N7 ESPACE COMBELIÈRE SUD	26780 MALATAVERNE	04 75 92 55 18	521588236-00039
GAUSSIN S A	Société spécialisée dans la conception et la fabrication de systèmes de manutention roulants comme les remorques industrielles, portuaires et aéroportuaires, automoteurs ; l'étude, la fabrication et la commercialisation de remorques industrielles et de système de manutention, remorques portuaires et aéroportuaires, chaudronnerie et pièces mécano-soudées.	M. Christophe GAUSSIN	11 RUE DU 47 ^E RÉGIMENT D'ARTILLERIE	70400 HÉRICOURT	03 84 46 13 45	676250038-00012
H2SYS	Activités d'ingénierie et d'études techniques dans le domaine de l'hydrogène énergie. L'entreprise procède à la conception, fabrication, installation et maintenance de systèmes à piles à combustibles et de systèmes hybrides pour des applications nomades, embarquées et stationnaires.	M. Sébastien FAIVRE	33 RUE DE L'AS DE TRÉFLE	90000 BELFORT	03 84 58 36 53	831801840-00016
H2V PRODUCT (H2V INDUSTRY)	Société industrielle de production massive d'hydrogène par électrolyse de l'eau, à base d'énergie renouvelable certifiée sans carbone.	M. Lucien MALLET	RUE DU POIRIER	14650 CARPIQUET	01 42 89 10 22	822430633-00013
HAFFNER ENERGY	Société active dans le secteur de la production d'énergie à partir de matière organique solide et renouvelable. Propose également la conception et la livraison de solutions "clés en main" (EPC) pour des centrales de combustion et de cogénération biomasse.	M. Philippe HAFFNER	2 PLACE DE LA GARE	51300 VITRY-LE-FRANÇOIS	03 26 74 99 10	813176823-00017

Nom de l'entreprise	Activité	Nom du dirigeant	Adresse	Ville	Numéro de téléphone	Numéro Siret
HYDROGÈNE DE FRANCE	Opérateur de l'hydrogène, Hydrogène de France (HDF) accompagne les collectivités et les entreprises pour mettre en place la filière de l'hydrogène énergie.	M. Damien HAVARD	20 RUE JEAN JAURES	33310 LORMONT	05 56 77 11 11	789595956-00010
HYSEAS	Développement d'un système de pile à combustible de forte puissance pour les applications maritimes et fluviales.	M. Arnaud VASQUEZ	5 AVENUE MONTROSE RÉSIDENTE L'ARETHUSE	06400 CANNES	04 93 38 52 19	814697215-00014
HYSILABS	Solution innovante facilitant le transport de l'hydrogène.	M. Pierre-Emmanuel CASANOVA	AVENUE LOUIS PHILBERT TECHNOPÔLE ARBOIS MEDITERRANEE	13100 AIX-EN-PROVENCE	-	809599939-00018
INDEX SERVICES	Société de holding spécialisée en actions de contrôle, consolidation, gestion et aide au lancement d'entreprises dans le domaine de l'énergie et l'environnement. Elle propose également la gestion durable des bâtiments publics et privés dans un souci d'optimisation de leur efficacité énergétique, ainsi que la gestion active des sociétés, et prend en charge la planification et la direction stratégique de la société.	M. Jean-Pierre NEGRE	148 ROUTE DE LA REINE	92100 BOULOGNE- BILLANCOURT	01 46 03 08 15	632037982-00170
LHYFE	Production et commercialisation de l'hydrogène vert à partir de ressources renouvelables aux industriels et aux fournisseurs de carburant.	M. Matthieu GUESNE	8 T CHEMIN DES VIOLETTES	44000 NANTES	-	831018080-00026
MAHYTEC	Société spécialisée dans le domaine des solutions de stockage de l'hydrogène. Elle propose une large gamme de produits telles que les solutions de stockage comprimé, solide ou hybride.	M. Dominique PERREUX	6 RUE LÉON BEL	39100 DOLE	03 84 80 17 20	501640031-00024
MCPHY ENERGY	Fabrication d'accumulateurs, électrolyseurs, réservoirs de stockage d'hydrogène. McPhy produit des équipements valorisant l'électricité en s'appuyant sur une technologie de stockage d'hydrogène sous forme solide, associée à une technologie de production d'hydrogène par électrolyse de l'eau.	M. Laurent CARME	QUAI RIETIERE ZONE D'ACTIVITÉ	26190 LA MOTTE-FANJAS	04 75 71 15 05	502205917-00011

Nom de l'entreprise	Activité	Nom du dirigeant	Adresse	Ville	Numéro de téléphone	Numéro Siret
POWIDIAN	Société spécialisée dans le domaine des stations autonomes d'électricité. Elle propose également des solutions d'énergie renouvelable et des composants et services pour stations d'énergie renouvelables.	M. Jean-Marie BOURGEAIS	20 RUE MARIE DE LORRAINE	37700 LA VILLE-AUX-DAMES	09 72 49 50 83	797866407-00050
PRAGMA INDUSTRIES	Fournisseur d'équipements d'essai pour pile à combustible. L'entreprise est également positionnée sur le marché du vélo à hydrogène.	M. Pierre FORTE	40 RUE CHAPELET ZONE ARTISANALE LA NÈGRESE	64200 BIARRITZ	05 59 51 27 55	478038219-00042
ROUGEOT ENERGIE	Filiale du groupe de travaux publics et de construction Groupe Rougeot proposant des solutions "clés en main" pour les projets, l'étude à la construction et la maintenance des stations hydrogène.	-	CHAMP LAIN RD 23	21190 TAILLY	03 80 21 69 09	853948008-00018
SYLFEN	Société active dans le développement, la fabrication, la commercialisation de systèmes de production et de conversion d'énergie à partir notamment de technologies électrochimiques à haute température, et de services afférents.	M. Nicolas BARDI	7 PARVIS LOUIS NÉEL BHT BATIMENT 52	38000 GRENOBLE	-	811828086-00017
SYMBIO	Conception des kits de piles à hydrogène pouvant être intégrés dans plusieurs formats de véhicules électriques et associés à un bouquet de services digitaux (diagnostics, gestion des flottes à distance, etc.).	M. Fabio FERRARI	14 RUE JEAN PIERRE TIMBAUD	38600 FONTAINE	04 79 79 57 49	521148890-00085
TRONICO	Entreprise spécialisée dans la conception et l'intégration de système électronique. Solutions en électronique (du câblage de carte jusqu'à des solutions globales "clés en main"). Étude, prototypes, réalisation de cartes, intégration mécanique et électronique.	M. Pierre PRIEUX	28 RUE DU BOCAGE	85660 SAINT-PHILBERT-DE-BOUAIN	09 63 26 79 18	383871746-00012

Traitement IndexPresse Sources : Kompass, Societe.com, Athypac et sites web des entreprises concernées.

SOURCES UTILISÉES

- Angel Marina, "Toulouse, capitale de l'hydrogène", *L'Usine Nouvelle*, 17 mai 2018, p.39-41
- Anquart Alexandre, "HySilabs révolutionne le transport de l'hydrogène", www.wedemain.fr, 23 août 2018
- Austruy Emmanuel, "Pour une transition efficace vers l'hydrogène propre", www.lesechos.fr, 8 novembre 2019
- Barbaux Aurélie, "L'ère hydrogène peut enfin débiter", *L'Usine Nouvelle*, 4 juillet 2019, p.24-41
- Barbaux Aurélie, "ArcelorMittal intensifie sa chasse au CO₂", www.usinenouvelle.com, 16 décembre 2018
- Barbaux Aurélie, "Ergosup installe sa première station d'hydrogène vert produit à domicile", www.usinenouvelle.com, 10 juin 2019
- Barbaux Aurélie, "Le pari hydrogène vert d'Air Liquide et d'Engie", www.usinenouvelle.com, 24 novembre 2019
- Barbaux Aurélie, "Les 7 chiffres clés du démonstrateur power-to-gas Grhyd d'Engie à Dunkerque", www.usinenouvelle.com, 11 juin 2018
- Barbaux Aurélie, "Les beautés cachées de l'hydrogène", *L'Usine Nouvelle*, 12 octobre 2017, p.48-53
- Barbaux Aurélie, "Pourquoi Air Liquide choisit le Canada pour se lancer dans l'hydrogène décarboné", www.usinenouvelle.com, 26 février 2019
- Barbaux Aurélie, "Stocker et transporter l'énergie", *L'Usine Nouvelle*, 3 octobre 2019, p.37-45
- Barbaux Aurélie, "Total, nouveau meilleur ami de l'hydrogène", www.usinenouvelle.com, 9 décembre 2019
- Bembaron Elsa, "Atawey réinvente la station-service à hydrogène", www.lefigaro.fr, 9 janvier 2019
- Berest Pierre, "Stockage souterrain des gaz et hydrocarbures: des perspectives pour la transition énergétique", www.encyclopedie-environnement.org, 5 février 2018
- Berne Juliette, "À qui va profiter la future commande de quinze trains à hydrogène par la SNCF?", www.usinenouvelle.com, 29 août 2019
- Berrier Étienne, "Le fluvial, vers la transition énergétique", *Le Journal de la Marine marchande*, juin 2019, p.55
- Berthelot de la Glétais Jean, "Pragma Industries, petite reine de l'hydrogène", *L'Usine Nouvelle*, 7 novembre 2019, p.26
- Béziat Éric, "Voiture à hydrogène: un record de distance et un début de filière industrielle", www.lemonde.fr, 27 novembre 2019
- Blanchard Mathias, "Développer l'hydrogène: le projet Last Mile", *L'Officiel des transporteurs magazine*, mars 2019, p.48
- Bohlinger Philippe, "Sylfen dope l'autonomie énergétique des bâtiments", *Le Moniteur des travaux publics et du bâtiment*, 20 octobre 2017, p.27
- Bohlinger Philippe, "Une station produit son hydrogène sur place et alimente une flotte de dix véhicules hybrides", *La Gazette des communes, des départements et des régions*, 23 avril 2018, p.51
- Bourgeois Christophe, "Pédalez à l'hydrogène", *01net*, 4 décembre 2019, p.21
- Bovinet Xavier, "Comment fonctionnent les 27 trains à hydrogène d'Alstom vendus à RMV?", www.industrie-techno.com, 21 mai 2019
- Breton Agnès, "Les flottes captives, premières cibles de la filière hydrogène", *Environnement magazine*, mai 2018, p.46-47
- Cadet Étienne, "Les camions du futur de Mercedes", *L'Officiel des transporteurs*, 7 septembre 2018, p.44-46
- Cadet Étienne, "Un parc de Kangoo hydrogène en région parisienne", *L'Officiel des transporteurs*, 8 novembre 2019, p.36-37

SOURCES UTILISÉES

Cadet Étienne, "Véhicules et énergie, pour un transport plus vert", *L'Officiel des transporteurs magazine*, mars 2019, p.26-43

Cheminade Pierre, "Hydrogène de France produira ses piles à combustible à Bordeaux Métropole en 2022", www.objectifaquitaine.latribune.fr, 10 décembre 2019

Chênerie Antoine, "Ce poids lourd ne rejette que des particules d'eau", fr.motor1.com, 6 août 2018

Chenevoy Clotilde, "Se déplacer avec une énergie nouvelle", *L'Usine Nouvelle*, 3 octobre 2019, p.64-66

Chicheportiche Olivier, "Pourquoi le patron d'Air Liquide pense que le marché de l'hydrogène va bondir", www.bfmbusiness.com, 24 octobre 2019

Clemens Monique, "H2SYS invente le groupe électrogène à hydrogène", www.lesechos.fr, 7 janvier 2019

Clémens Monique, "La première semi-remorque frigorifique à l'hydrogène", www.lesechos.fr, 6 septembre 2019

Conesa Elsa, "Aux États-Unis, la voiture à hydrogène avance timidement", www.lesechos.fr, 21 décembre 2015

Cottineau Julien, "L'hydrogène vert pas (encore) assez mûr pour l'industrie", www.usinenouvelle.com, 2 août 2019

Courtiade Pierre, "Une pile à combustible expérimentale", *Ademe et vous*, novembre 2019

Couto Alexandre, "L'hydrogène dans les tuyaux", *Industrie & technologies*, mai 2019, p.19-32

Couto Alexandre, "Maritime. Le fret au pied du mur", *Industrie & Technologies*, septembre 2019, p.25-41

De Ravignan Antoine, "Les ressorts de l'hydrogène", *Alternatives Économiques*, mai 2018, p.82

De Ravignan Antoine, "Transport maritime : assez d'enfumage!", *Alternatives Économiques*, juillet-août 2019, p.64-67

De Sousa Marc, "ROAD: Chereau dévoile sa semi-remorque frigorifique à hydrogène", www.france-routes.fr, 26 août 2019

Delamarche Myrtille, "Air Liquide fournit l'hydrogène à Thyssenkrupp pour produire son acier bas-carbone", www.usinenouvelle.com, 19 juillet 2019

Delamarche Myrtille, "HDF efface l'intermittence des énergies renouvelables", *L'Usine Nouvelle*, 30 août 2018, p.24

Delpont Lea, "Ergosup lève 11 millions pour déployer son hydrogène vert", www.lesechos.fr, 18 février 2019

Descamps Olivier, "Impulser la transition énergétique", *L'Usine Nouvelle*, 3 octobre 2019, p.11-23

Dion Romain, "Bourse: les futurs gagnants de l'hydrogène", www.lerevenu.com, 21 août 2018

Dufeu Antoine, "Quelles énergies alternatives?", *L'Officiel des transporteurs magazine*, juillet 2019, p.31-53

Durville Jean-Louis, "Rapport filière hydrogène-énergie", septembre 2015

Feitz Anne, "Les ambitions de Plastic Omnium dans la voiture à hydrogène", *Les Échos*, 4 décembre 2019, p.18

Feitz Anne, "Véhicule à hydrogène: le casse-tête des stations de recharge", www.lesechos.fr, 5 novembre 2019

Fontaine Érick, "HysetCo, porte-drapeau pour une mobilité sous le signe de l'hydrogène", www.lesnumeriques.com, 22 février 2019

Franck Pierre-Etienne, "Cap sur l'hydrogène", www.energies.airliquide.com, 7 décembre 2018

Franck Sébastien, "Imaginer la déchetterie de demain", www.clubpyro.org, 25 janvier 2018

German Jean, "Smart Energies Summit Paris 2019", *Pétrole & Gaz - Énergies nouvelles*, septembre-octobre 2019, p.28-35

SOURCES UTILISÉES

- Gradt Jean-Michel, "Pourquoi l'hydrogène est l'un des candidats sérieux dans la course aux nouveaux carburants", www.lesechos.fr, 30 mai 2019
- Grouse Olivier, "Bosch entre sur le marché des piles à combustible mobiles", www.nexxdrive.fr, 7 mai 2019
- Guimard Emmanuel, "Lhyfe mobilise 11 millions d'euros pour produire de l'hydrogène vert", www.lesechos.fr, 16 janvier 2020
- Hamon Grégoire, "Hydrogène. En 2050, un camion sur cinq roulera avec", *L'Officiel des transporteurs*, 13 avril 2018, p.34
- Hamon Grégoire, "Hyundai dévoile son concept truck à hydrogène Neptune", *L'Officiel des transporteurs*, 13 décembre 2019, p.60
- Hamon Grégoire, "Iveco dévoile son futur camion électrique et hydrogène", *L'Officiel des transporteurs*, 13 décembre 2019, p.56-57
- Hamon Grégoire, "Sous le signe de l'hydrogène", *L'Officiel des transporteurs*, 25 octobre 2019, p.36
- Hamon Grégoire, "Zero Emission Valley inaugure sa première station hydrogène", *L'Officiel des transporteurs*, 22 novembre 2019, p.24-25
- Hauet Jean-Pierre, "Comment décarboner les transports lourds de marchandises?", *REE - Revue de l'électricité et de l'électronique*, juillet 2018, p.24-27
- Hébert Patrick, "La Chine mise sur la voiture à hydrogène", *Futuribles*, novembre-décembre 2019, p.118-120
- Hertel Olivier, "La voiture à hydrogène met les gaz", *Sciences et Avenir*, octobre 2018, p.94-98
- Hissel Daniel, "La pile à combustible PEM", *Industrie & Technologies*, septembre 2019, p.57-64
- James Olivier, "Voler sans polluer, le pari de l'aéro", *L'Usine Nouvelle*, 12 décembre 2019, p.36-40
- Jaussaud Christophe, "Hydrogène. Une montée en puissance", *Le Journal de l'Automobile*, juin 2019, p.46-47
- Joly Guillaume, "Nantes ouvre la voie au transport fluvial à hydrogène", *leshorizons.net*, 2 septembre 2019
- Jouanneau Isabelle, "Comment Engie veut devenir un acteur majeur de l'hydrogène renouvelable", www.entreprendre.fr, 11 janvier 2020
- Julian Sébastien, "Ascenseurs du futur: toujours plus haut!", *L'Express*, 1^{er} novembre 2017, p.88-91
- Julian Sébastien, "Une bouffée d'hydrogène", *L'Express*, 13 mars 2019, p.68-71
- Kerboua Najasse, "Energy Observer: un bateau démonstrateur de la stratégie d'Engie dans l'hydrogène", www.gomet.net, 19 avril 2018
- Lagarde Florence, "Hyundai annonce une capacité de 500 000 véhicules à hydrogène en 2030", www.autoactu.com, 13 décembre 2018
- Latieule Sylvie, "Haffner Energy vise la production décentralisée en milieu urbain", *Info Chimie magazine*, octobre 2019, p.42-43
- Lauraux Matthieu, "BMW i Hydrogen Next, un concept à l'hydrogène au Salon de Francfort 2019", www.automobile-propre.com, 10 septembre 2019
- Lauraux Matthieu, "Fabio Ferrari, Symbio: 'Il faut baisser le prix de l'hydrogène au niveau du diesel'", www.h2-mobile.fr, 17 janvier 2020
- Laurent Anthony, "La conversion de l'électricité en gaz fait ses preuves", *Environnement magazine*, septembre-octobre 2019, p.22-23

SOURCES UTILISÉES

Le Coz Cécile, "De nouveaux marchés pour un boom de l'hydrogène vert", *Investir - Le Journal des finances*, 16 juin 2018, p.18-19

Legay Yannick, "Les autorails Alstom à hydrogène", *Revue générale des chemins de fer*, septembre 2019, p.66-75

Leroux Hugo, "Les clés pour comprendre la voiture à hydrogène", *Science & Vie*, juillet 2018, p.44-45

Létard Valérie, "Sur les enjeux de la filière sidérurgique dans la France du XXI^e siècle: opportunité de croissance et de développement - Rapport", www.senat.fr, 9 juillet 2019

Loury Romain, "Piles à combustible: des enzymes pour remplacer les métaux rares?", www.journaldelenvironnement.net, 31 août 2017

Meijers Isabelle, "L'hydrogène concentre les espoirs et les investissements", www.lesechos.fr, 11 juin 2019

Meillaud Laurent, "8 millions de km parcourus dans le cadre du projet H2ME", *hydrogentoday.info*, 12 août 2019

Mesmer Philippe, "Hydrogène: depuis vingt-cinq ans, le Japon s'entête et croit dans ses chances", www.lemonde.fr, 10 juin 2018

Molga Paul, "Stockage d'énergie: la nouvelle ruée vers l'or", www.lesechos.fr, 5 novembre 2019

Moragues Manuel, "À la Foire de Hanovre, Areva H2Gen voit l'hydrogène en grand", www.usinenouvelle.com, 26 avril 2017

Moragues Manuel, "HySiLabs réinvente le transport de l'hydrogène", *L'Usine Nouvelle*, 17 mai 2018, p.22

Niedercorn Frank, "Hydrogène de France va construire son usine à Bordeaux", www.lesechos.fr, 17 janvier 2020

Niedercorn Frank, "L'hydrogène, avenir de la voiture électrique", www.lesechos.fr, 8 octobre 2019

Olivennes Bastien, "La révolution de l'hydrogène accélérée grâce à un stockage plus aisé?", www.les-smartgrids.fr, 18 décembre 2018

Passebon Philippe, "Hydrogène: Areva H2Gen inaugure la première usine de production d'électrolyseurs PEM en France", www.industrie-techno.com, 27 juin 2016

Passelac Anouk, "Le premier bus à hydrogène français fabriqué par l'entreprise Safrà à Albi", www.ladepeche.fr, 28 juin 2019

Perruchot Christiane, "Dijon, Auxerre, Chaumont, Belfort: Rougeot Énergie se positionne comme acteur de l'énergie hydrogène", www.tracescritesnews.fr, 13 mai 2019

Poirier Anne-Claire, "Stocker la production d'hydrogène dans le réseau de gaz, le modèle énergétique de demain?", *La Gazette des communes, des départements et des régions*, 12 novembre 2018, p.50

Pouzard Véronique, "Powidian participe aux alternatives énergétiques de demain", www.lesechos.fr, 24 avril 2019

Rébillon Hervé, "Mercedes produira des Actros roulant à l'hydrogène dès 2025", mai 2019, www.trm24.fr

Renaud Ninon, "L'Allemagne veut devenir le champion de l'hydrogène", www.lesechos.fr, 5 novembre 2019

Roussel Florence, "Fin du véhicule thermique, le compte à rebours commence", *Actu environnement*, juillet-août 2019, p.32-39

Saudemont Éric, "Continuer à adapter nos systèmes de confinement aux nouvelles demandes", *Pétrole & Gaz - Énergies nouvelles*, juillet-août 2018, p.12-16

Saudemont Éric, "Grhyd, le premier démonstrateur Power-to-Gas en France est entré en service", *Pétrole & Gaz - Énergies nouvelles*, juillet-août 2018, p.10

SOURCES UTILISÉES

- Saudemont Éric, "Hydrogène. La première ligne de bus en France mise en service cet été", *Pétrole & Gaz - Énergies nouvelles*, juillet-août 2019, p.15
- Schwoerer Philippe, "La CNR booste le développement de l'hydrogène à Lyon", www.h2-mobile.fr, 25 novembre 2019
- Schwoerer Philippe, "Sunfire et Total s'associent pour une production efficace d'hydrogène", www.h2-mobile.fr, 16 octobre 2019
- Scolbeltzine Romain, "L'hydrogène attend son heure", *Le Point*, 25 octobre 2018, p.93-94
- Simon Frédéric, "L'Europe s'interroge sur l'avenir de l'hydrogène vert", www.euractiv.fr, 23 juillet 2019
- Tabard Antonin, "La filière hydrogène met les gaz", *L'Usine Nouvelle*, 21 février 2019, p.40-41
- Torregrossa Michael, "La RATP va tester le bus à hydrogène de Caetano fin 2020", www.h2-mobile.fr, 27 novembre 2019
- Torregrossa Michael, "UGAP: une commande groupée pour 1 000 bus à hydrogène d'ici 2024", www.h2-mobile.fr, 11 juillet 2019
- Tshiamanga Chrislain, "Investir dans l'hydrogène et les piles à combustible", www.lynxbroker.fr, 26 septembre 2018
- Van Apeldoorn Robert, "La voie de l'hydrogène", *Trends*, 31 mai 2018, p.38-41
- Varoquier Jila, "Et maintenant, les taxis à l'hydrogène", www.leparisien.fr, 24 février 2019
- Verdevoye Alain-Gabriel, "Hype fait la course pour rouler propre", *Challenges*, 13 décembre 2018, p.62
- Verdevoye Alain-Gabriel, "Hyundai pousse les gaz sur l'hydrogène", *Challenges*, 11 octobre 2018, p.74
- Verdevoye Alain-Gabriel, "Le véhicule thermique est encore loin de la casse", *Challenges*, 11 octobre 2018, p.36-37
- Versieux Nathalie, "Allemagne, retard dans les transports propres et risque de sanctions", *L'Officiel des transporteurs magazine*, juillet 2019, p.72
- Versieux Nathalie, "Toyota et Linde misent sur le camion à hydrogène", *L'Officiel des transporteurs*, 31 mai 2019, p.17
- Wakim Nabil, "Énergie: les ambitions du plan hydrogène revues à la baisse", www.lemonde.fr, 2 février 2019
- Wanaverbecq Christiane, "GRTgaz veut adapter son réseau au transport de l'hydrogène", www.lemoniteur.fr, 2 mai 2019
- Wilson Samorya, "Le TRM dans un avenir vert", *L'Officiel des transporteurs*, 14 septembre 2018, p.6-7
- Wiltz Bruno, "Hydrogène décarboné: enjeux et solutions", *Pétrole & Gaz - Énergies nouvelles*, septembre-octobre 2019, p.37-39
- Zeau Pierre, "Le coût de production des énergies renouvelables baisse d'année en année", www.lefigaro.fr, 31 mai 2019
- "AAQIUS au 89^e salon de L'auto de Genève", www.aaqius.com, 19 avril 2019
- "Air Liquide, rationalisation du portefeuille d'activités", *Investir - Le Journal des finances*, 16 novembre 2019, p.10
- "Air Products continue de jouer un rôle de premier plan dans des projets hydrogène innovants", www.airproducts.com, 12 décembre 2018
- "Air Products lance un projet européen de certification de l'hydrogène renouvelable", www.airproducts.com, 7 février 2019
- "Chimie verte: Linde construit un pilote d'hydrogène vert", www.info-chimie.fr, 27 avril 2009
- "Daimler s'engage vers la neutralité CO₂ de sa gamme de bus et camions", www.avere-france.org, 31 octobre 2019

SOURCES UTILISÉES

- "Des centrales nucléaires américaines vont produire de l'hydrogène sans carbone" www.transitionsenergies.com, 24 septembre 2019
- "Développer une filière hydrogène en France", www.storengy.com, 3 décembre 2019
- "Développons l'hydrogène pour l'économie française, étude prospective", Afhypac - Étude prospective, 2018
- "DINAMHySE, un projet pour booster l'hydrogène", Afhypac - Communiqué de presse, 15 janvier 2019
- "EDF lance Hynamics, une filiale pour produire et commercialiser de l'hydrogène bas carbone", www.edf.fr, 2 avril 2019
- "Engie rejoint Michelin au capital de Symbio Fcell pour accélérer le développement de solutions de mobilité hydrogène", www.engie.com, 19 septembre 2016
- "Engie va co-développer un camion minier à l'hydrogène", *Pétrole & Gaz - Énergies nouvelles*, septembre-octobre 2019, p.6
- "Hydrogène: perspectives pour les énergies renouvelables", www.connaissancedesenergies.org, 30 septembre 2019
- "Hydrogène vert: le plus grand site de production au monde inauguré à Mayence", www.diplomatie.gouv.fr, 23 juillet 2015
- "Hydrogène, l'heure de la massification?", www.polenergie.org, 17 juillet 2019
- "Hyport, le développement de l'hydrogène vert en Occitanie", www.engie.com, 29 septembre 2017
- "Innovations dans l'hydrogène", *Environnement magazine*, mars-avril 2018, p.34-36
- "Innovations dans l'hydrogène", *Environnement magazine*, décembre 2019, p.36-38
- "La mobilité hydrogène dans le monde, Épisode 1: Japon et l'Allemagne, les pionniers", www.airliquide.fr, 28 août 2019
- "La mobilité hydrogène dans le monde, Épisode 2: États-Unis et Chine, les géants", www.airliquide.fr, 5 septembre 2019
- "La mobilité hydrogène dans le monde, Épisode 3: France et Corée, les outsiders", www.airliquide.fr, 27 septembre 2019
- "La région Occitanie lance un plan hydrogène vert ambitieux", www.agence-adocc.com, 2018
- "Le platine est-il un frein au développement des piles à combustible?", www.afhypac.org, 26 avril 2019
- "Le premier démonstrateur français de power-to-gas en construction", *Environnement magazine*, mars-avril 2018, p.34-36
- "Le stockage comprimé de l'hydrogène", www.cea.fr, 2 février 2018
- "L'hydrogène: l'avenir des énergies décarbonées et décentralisées?", www.engie.com, 2018
- "L'hydrogène: une solution de stockage de l'énergie avec le projet 'Hyaunais'", www.sdey.fr, 2018
- "L'hydrogène bas carbone, un enjeu majeur pour la transition énergétique", www.edf.fr, 6 juin 2019
- "L'hydrogène en France, le mouvement, le moment", Afhypac - Rapport d'activité, 2019
- "L'hydrogène énergie, levier de croissance en 2050", *Info Chimie magazine*, juin 2018, p.11
- "L'hydrogène veut sa place", *Le Journal de l'Automobile*, mai 2019, p.16
- "L'hydrogène, carburant vert des bus de demain?", www.lesechos.fr, 27 novembre 2019
- "L'hydrogène, vecteur pour une mobilité décarbonée", www.smartgrids-cre.fr, 2016
- "L'option hydrogène avance à nouveau", *L'Officiel du cycle et de la moto*, janvier 2018, p.10
- "Make shipping zero carbon?", *Le Journal de la Marine marchande*, mai 2019, p.16-19

SOURCES UTILISÉES

"McPhy Energy, toujours à la recherche d'un adossement", *Investir - Le Journal des finances*, 24 mars 2018, p.13

"Nos projets récents", www.storengy.com, 2019

"Ouverture de l'usine de production d'hydrogène par électrolyse de 1 MW de Gasunie aux Pays-Bas", www.itm-power.com, 27 juin 2019

"Plan de déploiement de l'hydrogène pour la transition énergétique", Ministère de la transition écologique et solidaire, 1^{er} juin 2018

"Pour un meilleur développement de la filière hydrogène avec H2V Industry", www.lexpress.fr, 26 novembre 2019

"PowerCell et Siemens en accord sur des systèmes piles à combustible pour la marine", www.erh2-bretagne.mystrikingly.com, 16 août 2018

"Powidian présente son nouveau produit: Mobhyl Power", www.hyvolution-event.com, 23 mars 2018

"Présentation AVERE", Mobilité Hydrogène France, 14 avril 2016

"Production de l'hydrogène", www.connaissancedesenergies.org, 15 mai 2019

"SNCF finalise la commande d'une quinzaine de trains régionaux à hydrogène", *Actu environnement*, octobre 2019, p.46

"Stocker l'hydrogène", www.airliquide.fr, 2019

"Un remorqueur à hydrogène", *Environnement magazine*, novembre 2019, p.34

"Un train à hydrogène britannique", *Revue générale des chemins de fer*, mars 2019, p.50

"Vers le stockage d'hydrogène en cavité saline", www.medium.com, 12 février 2019

"Versailles inaugure le premier bus à hydrogène", *Industrie & Technologies*, octobre 2019, p.12

"ZeroAvia parie sur l'avion à hydrogène", *Industrie & Technologies*, octobre 2019, p.18

LEXIQUE

- **Biogaz**

Gaz vert équivalent au gaz naturel, obtenu suite à un processus de méthanisation, de gazéification ou de power-to-gas.

- **Cluster**

Regroupement d'entreprises et d'institutions proches géographiquement et partageant le même domaine d'activité.

- **Consortium**

Groupement d'acteurs (entreprises, organismes, collectivités) collaborant dans un projet ou programme commun.

- **Corridor d'hydrogène**

Réseau de stations de production et d'avitaillement d'hydrogène disposées le long d'axes de transport, sur plusieurs centaines de kilomètres.

- **Électrolyse de l'eau**

Séparation de l'oxygène et de l'hydrogène contenu dans l'eau grâce au passage d'un courant électrique, suivant un procédé électrolytique.

- **Hydrogène bleu**

Hydrogène produit de manière traditionnelle à partir de ressources fossiles (gaz naturel, pétrole, charbon, lignite), mais où le CO₂ généré est capté et stocké.

- **Hydrogène gris/noir/brun**

Hydrogène produit de manière traditionnelle à partir de ressources fossiles (gaz naturel, pétrole, charbon, lignite), méthode dégageant du CO₂ dans l'atmosphère.

- **Hydrogène vert (décarboné)**

Hydrogène produit à partir d'énergies renouvelables grâce au procédé d'électrolyse, méthode ne dégageant rien de néfaste dans l'atmosphère.

- **Pile à combustible**

Pile générant de l'électricité grâce à un combustible réducteur, comme l'hydrogène, et un oxydant, comme l'oxygène.

- **Pôle de compétitivité**

Combinaison, sur un espace géographique donné, d'entreprises, centres de formation et unités de recherche publique ou privées engagés dans une synergie autour de projets innovants en commun.

- **Power-to-gas**

Processus d'obtention de gaz grâce à la conversion d'électricité verte en hydrogène, via un procédé d'électrolyse.

- **Power-to-power**

Processus d'obtention d'électricité grâce à la conversion d'électricité verte en hydrogène, puis à nouveau en électricité via une pile à combustible.

La collection IndexPresse *Business Etude*

Comment accéder à des données fiables, pertinentes et surtout synthétisées, alors que l'information n'a jamais été aussi accessible en apparence ?

Voilà une question à laquelle sont confrontés quotidiennement les décideurs dans les entreprises lorsqu'il s'agit de prendre les bonnes décisions.

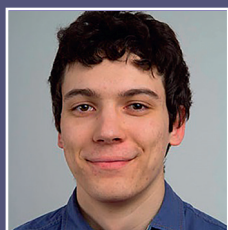
C'est pourquoi nous avons créé la collection **IndexPresse Business Etude**, des études sectorielles complètes, réalisées à partir des plus grands titres de la presse

économique et professionnelle. En s'appuyant sur des informations fiables et de qualité, les études d'IndexPresse offrent des synthèses analytiques et éclairées sur les secteurs d'activité émergents ou en mutation.

Vous aurez ainsi toutes les clés en main pour accompagner votre réflexion stratégique, en vous appuyant sur l'examen des enjeux de votre marché, afin d'anticiper ses évolutions et valider, ou modifier, votre positionnement dans le jeu concurrentiel.

IndexPresse *Business Etude*

Date de parution - janvier 2020.



Samuel ARNAUD

samuel.arnaud@indexpresse.fr

Rédacteur

Étude rédigée en collaboration avec Chrystèle REYNIER

La transition énergétique offre à l'hydrogène l'opportunité de devenir l'une des principales sources d'énergie de demain. Utilisable dans l'industrie, les transports, l'énergie, ce gaz s'octroie un nouveau statut et impacte de nombreux secteurs d'activité. Pour que l'essor du marché soit effectif sur le long terme, la filière va devoir accélérer son développement et lancer son industrialisation, tant en ce qui concerne sa production que sa présence au sein des territoires.

Pourquoi l'hydrogène est-il amené à changer de statut ? En quoi la transition de l'hydrogène gris vers l'hydrogène vert est-elle indispensable ? Comment se positionnent les producteurs et les équipementiers face à cette expansion ? Quelles opportunités s'offrent aux start-up et à leurs solutions novatrices ? Quels secteurs vont être concernés par la montée en puissance de ce gaz ? Comment réagissent les acteurs du transport et de l'énergie ? Pourquoi la recherche et développement occupe-t-elle une place primordiale dans la progression du marché ?

Cette étude apporte les éléments de réponse et de réflexion pour comprendre les enjeux et les perspectives du secteur, identifier les mutations à l'œuvre ou à venir, et se positionner dans le jeu concurrentiel.

Photo de couverture : © gallofilm - stock.adobe.com



IndexPresse

IndexPresse
19 rue René Thomas
38024 Grenoble cedex 1
Tél. 04 76 92 05 25
indexpresse@indexpresse.fr