



LES CONSEILLERS DU COMMERCE
EXTÉRIEUR DE LA FRANCE

The Climate Group of the CNCCEF
La trajectoire de Paris à l'export

HYDROGÈNE

L'HEURE EST VENUE

Recommandations pour l'avenir de la filière industrielle française à l'export





Ce rapport est une production du Groupe Climat des Conseillers du Commerce Extérieur de la France (CNCCEF) en collaboration avec l'Association Française pour l'Hydrogène et les Piles à Combustible (AFHYPAC), dans le cadre des consultations réalisées auprès des principaux industriels français de la filière hydrogène.

Les 4500 Conseillers du Commerce Extérieur de la France, présents dans plus de 150 pays et dans les territoires, mettent leur expérience au service du développement de la France.

Ils exercent au quotidien des actions concrètes en partenariat avec les acteurs publics et privés ayant un rôle dans la promotion et l'appui à l'internationalisation des entreprises françaises avec quatre missions : appui aux PME, attractivité des territoires, formation des jeunes à l'international et conseil aux pouvoirs publics.

AVANT-PROPOS

« *Le commerce mondial ne peut pas se réformer en passant à côté du plus grand défi planétaire du xx^e siècle, qui est le défi du changement climatique* »: cette déclaration du ministre de l'Économie et des Finances pose les termes de la compétition mondiale actuelle, qui s'intensifie pour asseoir des positions dominantes dans les filières industrielles de l'économie bas carbone.

Aborder l'hydrogène sous cet angle de filière industrielle bas carbone peut sembler paradoxalement quand aujourd'hui sa production mondiale reste principalement d'origine fossile. Mais l'hydrogène jouit d'atouts incomparables: sa combustion ne produit ni particules, ni polluants, et il peut être produit autrement, sans émission de Gaz à Effet de Serre ni pollution de l'air. Cela en fait un vecteur très regardé dans le monde actuel pour la transformation des systèmes de production et de transport.

Produit de manière propre et substitué aux combustibles fossiles, l'hydrogène est un levier massif de décarbonation de la mobilité, de la production de chaleur et des processus industriels intensifs en énergie. Utilisé comme matière première, il contribuera à décarboner les secteurs industriels de la sidérurgie, de la chimie, et d'autres encore. Il participera au recyclage du carbone pour la production de méthane de synthèse. En d'autres termes: « L'hydrogène est une solution d'avenir pour réussir la transition écologique ».

Lenjeu industriel est bien compris. Et l'année 2019 aura été marquée par une accélération très significative des plans de développement de la filière mondiale de l'hydrogène, en Asie-Pacifique notamment. La Chine entend accélérer l'industrialisation de sa filière en massifiant très rapidement de nouveaux usages de l'hydrogène en ville notamment pour améliorer la qualité de l'air. La Corée du Sud développe une stratégie similaire. Le Japon affirme sa volonté de devenir la première « société hydrogène » au monde, en mettant en œuvre une industrialisation à grande échelle de ses équipements et technologies.

Le défi est de taille pour l'Europe et l'avenir de la filière industrielle française. C'est aussi une opportunité stratégique incontournable pour réussir une transition vers des sources d'énergie décarbonées, qui s'appuierait sur des savoir-faire et technologies du continent. Lenjeu pour la filière est celui du passage rapide à grande échelle pour baisser significativement les coûts. Car seules des réalisations d'envergure en France et en Europe pourront offrir à nos acteurs de l'hydrogène, la visibilité nécessaire pour investir et asseoir la compétitivité de cette filière en évolution rapide au plan mondial.

Le tissu des PME et ETI de la filière française est historiquement étendu et ancré dans les territoires. Il est en mesure de répondre au défi industriel de réalisations collectives d'ampleur, sur le continent

européen comme au grand export. Une part importante de cet exercice de prise de confiance de la filière française en elle-même, résidera dans sa capacité d'entraîner son ensemble autour des grands groupes, à l'occasion de projets d'envergure et complexes sur le sol national et en Europe.

Il ressort de la réalisation de ce rapport du Groupe Climat des Conseillers du Commerce Extérieur en collaboration avec l'AFHYPAC, une conviction partagée profonde: l'industrialisation accélérée de la filière à l'international et en particulier en Asie-Pacifique, exige une réponse immédiate et d'ampleur de l'Europe et de la France. Le rapport propose sept recommandations en ce sens afin, pour la filière, de compter demain au plan mondial.

Les Conseillers du Commerce Extérieur, forts de leur réseau de 4 000 managers expérimentés dans 150 pays, interviennent ici dans leur rôle de conseil et d'accompagnement de la politique publique et des entreprises à l'international, à partir du diagnostic de leur réseau sur le terrain. L'AFHYPAC fédère les acteurs de l'hydrogène et des piles à combustible en France, avec pour ambition d'accélérer le développement des solutions hydrogène au bénéfice de la transition écologique et solidaire. Nous nous félicitons que cette initiative ait permis un dialogue approfondi avec les grandes entreprises consultées du secteur quant à leurs ambitions pour la filière. Nous les en remercions.

Cette approche collective s'inscrit très exactement dans l'esprit des Contrats Stratégiques de Filière dont l'AFHYPAC pilote les travaux spécifiques à l'hydrogène pour le Comité Stratégique de Filière (CSF) « Industrie des nouveaux systèmes énergétiques ». Le riche dialogue établi avec le CSF promet des avancées certaines pour la filière. Avec l'appui déterminant des pouvoirs publics, nous espérons que ce rapport contribuera à mobiliser rapidement les parties prenantes de la filière française et européenne. Car pour l'Hydrogène, l'heure est venue.

Alain Bentéjac
Président du CNCCEF



Philippe Boucly
Président de l'AFHYPAC



DÉCLARATION DES DÉPUTÉS DU GROUPE D'ÉTUDES « HYDROGÈNE » DE L'ASSEMBLÉE NATIONALE

En qualité de membres du groupe d'études « Hydrogène » de l'Assemblée nationale, nous saluons la publication de ce rapport écrit par le groupe Climat du Comité National des Conseillers du Commerce Extérieur de la France (CNCCEF), après avoir consulté les grands acteurs français de l'hydrogène. Ce rapport alerte les pouvoirs publics sur l'accélération très significative des plans de développement de la filière hydrogène à l'échelle mondiale, en particulier dans la région Asie-Pacifique. L'heure est aujourd'hui à la création d'une filière industrielle française de l'hydrogène.

Alors que la compétition mondiale s'intensifie dans le secteur de l'hydrogène, ce rapport analyse les stratégies mises en œuvre par différents pays en vue de consolider des positions dominantes. La Chine entend notamment asseoir le développement de ses technologies sur une massification des nouveaux usages de l'hydrogène propre en ville. Elle est aussi devenue le premier fabricant mondial d'électrolyseurs. Le Japon, la Corée du Sud et l'Australie déplient des stratégies similaires de massification des nouveaux usages de l'hydrogène et de sa production.

Le défi est considérable pour l'avenir de la filière industrielle française de l'hydrogène et de ses savoir-faire ancrés dans les territoires. Il impose une réponse immédiate à la mesure de l'enjeu international pour accélérer l'introduction des usages de l'hydrogène à travers des projets structurants d'ampleur qui agrègent des compétences françaises et européennes. C'est dans les territoires que se joue l'excellence de cette filière nationale essentielle à la transition vers une économie bas carbone.

La France a rappelé au plus haut niveau sa détermination à être au premier plan des initiatives internationales pour assurer le succès de l'Accord de Paris. Ce *leadership* assumé engage chacun d'entre nous et offre aux entreprises françaises et aux territoires l'opportunité de faire valoir leurs atouts nombreux sur la trajectoire de Paris à l'international.

Nous nous associons aux recommandations exprimées dans ce rapport visant à faire du vecteur hydrogène l'un des axes fédérateurs de l'excellence du savoir-faire français à l'international.

Les députés signataires du groupe d'études « Hydrogène »

Michel DELPON, Gérard MENUEL, coprésidents du groupe

Philippe CHALUMEAU, Olivier DAMAISIN, Frédérique DUMAS, Bruno DUVERGÉ, Jean-Luc FUGIT, Pierre VATIN, vice-présidents du groupe

Danièle HÉRIN, Jean-Bernard SEMPASTOUS, secrétaires du groupe

Bérangère ABBA, Anne-France BRUNET, Sylvie CHARRIÈRE, Paul CHRISTOPHE, Jean-Charles COLAS-ROY, François CORMIER-BOULIGEON, François DE RUGY, Laurent GARCIA, Stéphanie KERBARH, François-Michel LAMBERT, Célia de LAVERGNE, Gaël LE BOHEC, Jean-Claude LECLABART, Paul MOLAC, Claire O'PETIT, Mathieu ORPHELIN, Anne-Laurence PETEL, Maina SAGE, Frédérique TUFFNELL, Laurence VANCEUNE BROCK, Jean-Marc ZULESI, membres du groupe

RÉSUMÉ

L'hydrogène, l'heure est venue

Les signaux de brusque accélération du développement de l'hydrogène sur la scène internationale annoncent un tournant décisif pour les acteurs français engagés dans la filière. Les plans d'investissement visant le passage à grande échelle du vecteur énergétique, avec un volontarisme marqué en Asie-Pacifique, reflètent une dynamique mondiale nouvelle : celle d'une massification annoncée des nouveaux usages de l'hydrogène à l'international.

Trois processus alimentent cette dynamique : un engagement politique au plus haut niveau pour accroître la contrainte légale et de prix sur les émissions mondiales de gaz à effet de serre dans le cadre des Accords de Paris, la baisse tendancielle du coût des énergies renouvelables, et la réduction des coûts des technologies de l'hydrogène permettant son déploiement vers de nouveaux usages dans l'industrie, le transport et la mobilité, les réseaux.

Conséquence directe de cet essor, la filière industrielle française doit faire face à un changement de dimension important de la compétition mondiale. La taille des projets hydrogène augmente significativement, et nécessite d'engager une réponse renforcée et rapide de la filière française. Le marché des équipements et composants est au cœur des enjeux de cette massification : leur processus de fabrication recèle un important potentiel de réduction des coûts, qui baissent significativement avec une production industrialisée. Jusqu'à présent utilisés dans le cadre de projets pilotes, les éléments-clés de la chaîne de valeur hydrogène doivent pouvoir rapidement répondre aux besoins de projets de grande envergure dans les nouveaux usages de l'hydrogène.

Les entreprises françaises sont jusqu'à présent en position favorable. Disposant d'une certaine avance en recherche & développement, la France demeure un centre de compétence sur les applications et les systèmes de l'hydrogène. Cependant des déploiements de projets industriels et de mobilité dépassant la centaine de mégawatts sont présentés sur les marchés étrangers, bénéficiant d'un fort soutien de leurs pouvoirs publics ou de prix de l'électricité particulièrement bas.

Pour conserver ses atouts, la filière française de l'hydrogène doit aujourd'hui relever le double défi de la massification des marchés et de l'industrialisation de ses fabrications qui demeure encore largement artisanale. Cette industrialisation est non seulement nécessaire pour atteindre les objectifs du Plan National Hydrogène, mais également pour réaliser le potentiel de marché de l'ensemble de la filière des nouveaux usages de l'hydrogène à l'export, qui pourrait représenter 50 % de ses débouchés en 2030. La France doit consolider ses savoir-faire technologiques pour porter des solutions hydrogène complètes sur les marchés à l'international, dans des projets d'envergure.

Se positionner sur les marchés à l'export impacte l'ensemble de la chaîne de valeur de l'hydrogène dans nos territoires : industriels historiques, énergéticiens, équipementiers, PME, ETI, centres de recherche, investisseurs et start-ups. L'appui à la filière doit favoriser le développement de cet écosystème pour agréger les besoins, les compétences, et réussir la montée en puissance. Il permettra de consolider un tissu industriel créateur d'emplois tout en préservant la capacité d'innovation de la filière française.

Les prochaines années constitueront un point de bascule pour le marché mondial de l'hydrogène. Nos recommandations visent à permettre à la filière française de prendre part, dès à présent, à l'accélération de cette mutation pour préserver ses atouts :

« pour la filière industrielle française de l'hydrogène, l'heure est venue. »

NOS RECOMMANDATIONS

1. Changer d'échelle pour compter à l'international

L'année 2019 aura été marquée par une accélération très significative des plans de développement de la filière mondiale de l'hydrogène, en Asie-Pacifique notamment. Le rapport présenté par l'Agence Internationale de l'Énergie au G20 d'Osaka montre en particulier [que des politiques volontaristes sont à l'œuvre pour la prise de positions dominantes dans la filière mondiale de l'hydrogène](#) désormais compris comme un vecteur-clé de la décarbonation.

Des stratégies conquérantes sont déployées pour développer technologies et savoir-faire et devenir incontournables. La Chine entend notamment asseoir le développement de ses technologies aval sur une massification immédiate des nouveaux usages d'un hydrogène propre en ville, dont la production sera d'abord carbonée de fait, pour être ensuite progressivement décarbonée sous la contrainte croissante du prix du carbone. Elle est aussi déjà le premier fabricant mondial d'électrolyseurs. La Corée du Sud et le Japon développent de façon similaire des projets à grande échelle, faisant appel à des technologies déjà éprouvées. L'enjeu est industriel.

Face à cette situation, nous préconisons une réaction rapide et forte de la France et de l'Europe afin de peser dans la course internationale qui s'ouvre. Le développement des nouveaux usages de l'hydrogène et des moyens de production bas carbone doit s'appuyer sur un [déploiement à grande échelle](#) en France et Europe pour atteindre le seuil critique de centaines de mégawatts cumulées et s'élever ainsi au niveau de la concurrence internationale. Cela passe notamment par une augmentation du soutien financier des pouvoirs publics français et européens à la filière, qui soit proportionnelle aux efforts des pays où le marché est le plus avancé (Chine, Japon, Corée du Sud, États-Unis).

2. Initier des projets structurants d'ampleur associant partenaires publics et privés

Les approches partenariales entre acteurs privés et publics sont au cœur de la massification amorcée des nouveaux usages de l'hydrogène à l'international. Elles permettent de démultiplier les capacités d'investissement par une [mobilisation élargie du secteur privé et bancaire](#), grâce à une répartition équilibrée des garanties et des risques d'investissement, liés notamment à la sous-utilisation momentanée des infrastructures en particulier en mobilité. En France, les initiatives des collectivités territoriales pourront être soutenues en élargissant à l'hydrogène l'article 109 de la loi de transition énergétique permettant à celle-ci de prendre part aux sociétés de projets dédiées à la production d'énergie renouvelable. Les marchés publics de performance offrent à cet égard également, un cadre flexible intéressant

pour l'introduction d'objectifs quantifiables de performance et de garanties entre partenaires publics et privés (contenu carbone, prix de reprise, utilisation).

À l'échelle européenne comme en France, nous préconisons de privilégier cette approche partenariale public-privé pour la réalisation de nouveaux projets d'ampleur, afin de rapidement massifier de nouveaux usages de l'hydrogène et [fédérer les acteurs de la filière à l'international](#).

De tels projets doivent s'appuyer sur les atouts des territoires, essentiels dans le déploiement de l'hydrogène. L'Europe dispose à ce titre d'excellentes infrastructures industrielo-portuaires et urbaines tout au long de son artère historique Danube-Rhin-Rhône reliant la mer du Nord, la Manche, la Méditerranée et la mer Noire. Des *hubs* de production d'hydrogène et des corridors multiusages y sont réalisables à moindre coût, en lien avec les réseaux de transports lourds et les centres urbains qui bordent cette artère. Ils permettraient de tirer le meilleur parti des opportunités offertes par cette route continentale exceptionnelle, pour massifier de nouveaux usages de l'hydrogène et fédérer les acteurs européens de la filière dans le cadre privilégié d'un « [Airbus territorial de l'hydrogène](#) » associant public et privé. Les territoires français disposent d'atouts clés pour déployer la filière technologique, et parmi ceux-ci les territoires ultramarins aux réseaux non interconnectés qui présentent un fort enjeu d'autonomie énergétique et de décarbonation. L'introduction de premiers *hubs* d'hydrogène, en lien avec le déploiement accru des énergies renouvelables, y offre de sérieuses opportunités multiusages pour [démontrer l'excellence française](#) (stockage, réseau, mobilité terrestre, navettes inter-îles), en particulier aux portes des marchés extérieurs à fort potentiel de l'Asie-Pacifique.

3. Favoriser l'approche holistique des projets sous forme de *hubs* hydrogène multiusages

La mise en œuvre de projets fédérateurs s'appuyant sur des « [hubs hydrogène](#) » pour mutualiser les usages de l'hydrogène à l'échelle du territoire, est une étape essentielle pour la consolidation de la filière. Le développement des projets autour d'industries déjà consommatrices d'hydrogène (raffinage, pétrochimie, chimie...) permet l'amorçage de nouveaux usages de l'hydrogène. Cette logique de *hub* conduit à [profiter pleinement des effets d'échelle](#) et des synergies offertes par les usages traditionnels de l'hydrogène carboné qui pourront être ainsi progressivement décarbonés.

Les complexes industrielo-portuaires présentent à cet égard le double avantage d'avoir des besoins industriels existants d'hydrogène et de nouveaux, très immédiats et significatifs, en mobilité portuaire et de proximité de type logistique. Ils sont interconnectés aux réseaux de transports lourds et aux centres urbains, ouvrant ainsi la voie à la création rapide de *hubs* multiusages d'hydrogène pouvant également servir à terme les usages fluviaux et maritimes. Les axes de transport lourds, les bassins d'échanges, et la périphérie des agglomérations offrent également ces mêmes atouts déterminants pour [ancrer la croissance des nouveaux usages de l'hydrogène dans les territoires](#) et fédérer les acteurs de la filière.

Nous préconisons de privilégier cette approche holistique des projets multiusages, tout en conservant et renforçant une approche différenciée des incitations et appuis publics en fonction du contenu carbone de l'hydrogène produit et de ses usages. Le développement de la filière nécessite un **accompagnement de la transition vers des usages bas carbone**. L'objectif légal de 20 à 40 % d'hydrogène décarboné dans l'industrie devra s'accompagner de mesures réglementaires assurant sa réalisation à travers des mécanismes incitatifs adaptés. En matière de mobilité, des incitations sur le modèle du programme d'aide aux véhicules propres en Californie peuvent être développées, et l'objectif de conversion des flottes des entités publiques et des opérateurs de service public renforcé (transport public, déchets) en intégrant l'hydrogène dans les appels d'offres. Ces mesures pourront être assorties d'une prime à la reprise de véhicules diesel utilitaires, notamment en direction des artisans. Enfin, l'intégration des solutions hydrogène dans le système énergétique français nécessite la mise en place d'un cadre économique et réglementaire favorable au développement des solutions « Power-to-Hydrogen ».

4. Soutenir la filière industrielle française

La filière industrielle française de l'hydrogène doit massifier ses productions pour réduire les coûts et devenir durablement compétitive. Les investissements nécessaires à cette transformation doivent s'appuyer sur une **stratégie de changement d'échelle partagée par l'ensemble des acteurs industriels**, stratégie qui pourra être élaborée dans le cadre du Comité Stratégique de Filière « Industries des Nouveaux Systèmes Énergétiques ». Le potentiel de la filière française à l'exportation est essentiel pour son développement national : il repose sur la capacité à porter des offres complètes, cohérentes et reconnues, sur les marchés à forte croissance.

Si la France dispose historiquement d'atouts décisifs pour le développement d'une industrie compétitive de l'hydrogène, une impulsion politique volontariste associée à un soutien financier sont néanmoins indispensables pour l'essor de champions industriels autour des équipements, de l'intégration des systèmes hydrogène et des services, capables de se positionner durablement sur les marchés mondiaux. Elle devra **viser le leadership sur les éléments-clés de la chaîne de valeur** tout en mobilisant un écosystème spécialisé dans les territoires.

5. Renforcer la coopération en Europe

Le renforcement de la coopération européenne sur l'hydrogène doit permettre de positionner la filière comme enjeu industriel partagé et ouvrir la voie à des réalisations communes d'envergure. En complément d'une reconnaissance de l'hydrogène comme chaîne de valeur stratégique dans les politiques publiques énergétiques, climatiques et industrielles européennes, les **Projets Importants d'Intérêt Européen Commun (PIIEC)** permettent de protéger les capacités de conception et de production en Europe. Dans la continuité des initiatives en faveur de la batterie pour véhicules électriques, de la microélectronique et des supercalculateurs, la mise en place de PIIEC dédiés à l'hydrogène, notamment sur la fabrication des équipements clés relevant de l'électrolyse ou encore les piles à combustible et les

matériaux, permettrait de coordonner les efforts de recherche & développement entre les pays européens au service d'une politique industrielle européenne ambitieuse pour la filière.

Les initiatives prises à cet égard, notamment la plateforme S3 « **Hydrogen Valleys** », sont déterminantes pour asseoir le développement technologique de la filière. Nous préconisons qu'elles soient renforcées et étendues à de nouveaux projets européens d'envergure permettant de rapidement **associer le développement technologique aux réalisations d'ampleur** et fédérer la croissance de la filière européenne et de ses acteurs à partir des atouts du continent (recommandation n° 2).

6. Construire une filière soudée pour le grand export

Le soutien à la structuration de la filière de l'hydrogène à l'export doit viser l'entraînement du tissu des PME et ETI du secteur, en s'appuyant sur les capacités d'intégration des grands groupes par un **accroissement des actions collectives** à l'international. Une part importante de cet exercice de prise de confiance de la filière française en elle-même réside également dans la réalisation commune de projets complexes sur le sol national et en Europe. Il permettra d'accroître la force de frappe des innovations de la *cleantech* française. L'accompagnement à l'internationalisation de l'écosystème français de la filière pourrait se traduire par un **renforcement du soutien à l'export des PME, ETI et primo-exportateurs** dédiés à l'hydrogène, dans le cadre des assurances export et de la garantie des projets stratégiques, mais aussi dans le cadre renouvelé du partenariat État-Régions pour l'export et des alliances entre grands groupes et PME/ETI. Enfin, le développement de partenariats stratégiques à l'international impliquant le tissu des PME et ETI est indispensable pour assurer la robustesse de la filière française et des débouchés durables au grand export (Chine, Japon, Corée du Sud, États-Unis, Australie notamment).

7. Renforcer l'action normative, règles et certifications d'usage

La réglementation sur les usages et les normes technologiques de la filière hydrogène doit être renforcée, de sorte qu'un **level playing field** puisse être obtenu en France et en Europe face à la concurrence mondiale, et permette un déploiement compétitif de la filière des nouveaux usages de l'hydrogène. En certifiant notamment l'origine et les attributs environnementaux de l'hydrogène, la garantie d'origine assure la transparence de sa provenance et de son mode de production, et permet la traçabilité des attributs liés à sa production et en particulier de son impact climatique. La mise en place d'un **mécanisme de garanties d'origine à l'échelle européenne** permettra d'instituer un complément de rémunération adapté selon les modes de fabrication de l'hydrogène bas carbone. À cette fin, la plateforme CertifHy développée avec l'appui des institutions européennes, propose un système pilote de garanties d'origine de l'hydrogène qui a déjà émis plus de 75 000 garanties d'origine. Cette expérience pourra éclairer la mise en place d'un système élargi de traçabilité, et venir soutenir la définition de labels et de terminologies permettant de garantir la contribution de l'hydrogène à la décarbonation des usages selon son origine et son cycle de vie.

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS	4
DÉCLARATION DES DÉPUTÉS	6
RÉSUMÉ	8
NOS RECOMMANDATIONS	10
INTRODUCTION	17
1. LA DYNAMIQUE MONDIALE	21
Les tendances-clés	21
Un décollage impulsé par les investissements public-privé	22
2. UN MARCHÉ PORTÉ PAR LES NOUVEAUX USAGES	25
L'industrie	25
La mobilité	26
Stockage et flexibilité des réseaux	28
3. L'HYDROGÈNE À L'EXPORT, ENJEU INDUSTRIEL	31
Les atouts technologiques	31
Le passage à l'échelle, clé de la filière	32
Stockage et transport d'hydrogène	37
4. RÉUSSIR L'HYDROGÈNE À L'EXPORT	39
Rechercher l'excellence dans les « hubs hydrogène »	40
Renforcer les centres de compétence	41
Les coopérations en Europe	42
Pour une approche stratégique des partenariats internationaux	43
COMITÉ DE PILOTAGE	44
BIBLIOGRAPHIE	46

INTRODUCTION

L'hydrogène, l'heure est venue

Avec les Accords de Paris signés à l'issue de la COP21 en 2015, la France a placé l'action climatique au cœur de ses relations économiques et diplomatiques et suscité une dynamique internationale sans précédent. Cette action est construite autour de l'objectif central de limiter le réchauffement climatique à 2 °C au-dessus des niveaux préindustriels.

À la suite de l'engagement des parties à limiter le réchauffement climatique, le rôle de l'hydrogène pour la décarbonation a été souligné par de nombreuses organisations internationales, telles que l'Agence Internationale de l'Énergie (AIE) et l'Agence Internationale pour les Énergies Renouvelables (IRENA). Elles établissent que l'hydrogène est un important **levier de décarbonation progressive des économies**.

L'hydrogène est utilisé depuis plus d'un siècle dans l'industrie dans les procédés et en tant que matière première. La molécule n'existe pas à l'état naturel et doit donc être produite. L'atome d'hydrogène (H) est l'élément le plus abondant dans l'univers, présent dans l'eau, la matière organique et les hydrocarbures. La molécule H₂, que l'on appelle l'hydrogène, contient de l'énergie de liaison sous forme chimique, énergie qui peut être transportée et stockée: on parle de **vecteur énergétique**. Produit à partir d'eau ou d'hydrocarbures, l'hydrogène peut libérer de l'énergie via sa combustion dans une pile à combustible par exemple ou être utilisé comme matière première dans certains procédés industriels. **L'hydrogène a une densité énergétique massique particulièrement élevée**: la combustion d'un kilogramme d'hydrogène libère trois fois plus d'énergie qu'un kilogramme d'essence, et ne produit que de l'eau. **Il présente néanmoins une très faible densité énergétique volumique à pression atmosphérique**: il doit être comprimé à haute pression ou liquéfié pour être stocké et transporté.

Lorsque les procédés de production d'hydrogène sont associés à une source d'énergie sans carbone ou neutre en carbone, ils permettent d'éliminer les émissions de gaz à effet de serre de la consommation d'énergie finale:

- **Hydrogène produit à partir d'hydrocarbures ou de charbon, associé au Captage et Stockage ou Utilisation du CO₂ émis par le processus (CCUS en anglais):** cette technique vise à réduire ou neutraliser les émissions de CO₂ liées à la production traditionnelle de l'hydrogène à partir des fossiles dans les processus industriels mais peut s'appliquer à toute production de CO₂. Elle est actuellement envisagée dans les secteurs de l'ammoniac, du méthanol ou du raffinage, dans lesquels l'hydrogène est principalement produit par reformage de gaz ou de pétrole, ainsi que dans la production finale d'hydrogène à partir de charbon, en Chine notamment. Le CO₂ peut être acheminé par pipeline ou bateaux pour être reinjecté et stocké en sous-sol dans des réservoirs ou des aquifères salins. Un ré-usage du CO₂ peut également être envisagé. L'Agence Internationale de l'Énergie estime que la CCUS pourrait contribuer à réduire les émissions industrielles de dioxyde de carbone de 20 % à l'horizon 2050 (SDS).
- **Hydrogène produit par électrolyse de l'eau avec de l'électricité d'origine renouvelable ou issue d'un mix électrique bas carbone.** L'électrolyse de l'eau connaît une croissance portée à la fois par le dynamisme des applications industrielles utilisant de l'hydrogène, la baisse du coût de l'électricité d'origine renouvelable pouvant être utilisée pour l'électrolyse, et l'essor de la demande mondiale en énergie bas carbone. Plusieurs technologies d'électrolyse sont actuellement utilisées selon le type d'électrolyte (alcalin, membrane à échangeur de protons - PEM, ou oxydes solides - SOEC).

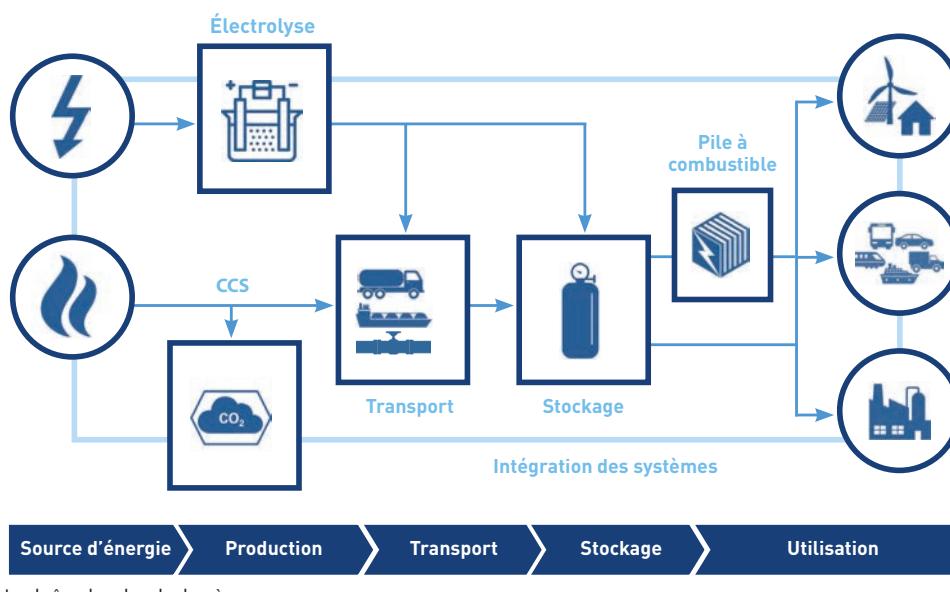
Le vecteur hydrogène présente donc un potentiel significatif de décarbonation des économies. Cependant, les pays ayant fait le choix d'un développement massif et à court terme de l'hydrogène envisagent dans l'immédiat de faire appel aux procédés traditionnels de production d'hydrogène, sur la base d'hydrocarbures ou de charbon. C'est ainsi le cas de la Chine, du Japon et de Corée du Sud où sont développés des projets à grande échelle, faisant appel à ces technologies traditionnelles déjà largement éprouvées. L'hydrogène y est utilisé comme vecteur de transition vers une production bas carbone, permettant le développement immédiat de la filière aval des usages et la réduction des pollutions locales, et dont la production sera progressivement décarbonée en amont avec la croissance des prix du carbone (taxes et permis).

L'essor des capacités de production d'hydrogène et des technologies associées crée un marché mondial pour de nouvelles applications du vecteur:

- **Décarbonation de la mobilité:** le développement de la pile à combustible contribue à décarboner le secteur des transports. Dans un véhicule électrique à pile à combustible, l'alimentation électrique du moteur est fournie par réaction électrochimique entre hydrogène et oxygène dans la pile à combustible, avec l'eau et la chaleur comme seuls sous-produits de cette conversion. Le transport lourd (bus, camions), la propulsion des trains et tramways, les flottes automobiles, la navigation fluviale et maritime sont autant d'applications nouvelles sur ce marché.

• **Décarbonation de l'industrie:** l'hydrogène est largement utilisé comme matière première dans de nombreux procédés industriels. L'installation par ces industriels d'électrolyseurs ou de petites unités de reformage de biométhane ou de gaz naturel avec captage et séquestration du CO₂, réduit leur empreinte carbone et leur permet, en s'affranchissant du transport, d'améliorer la qualité de l'air des territoires environnants. L'hydrogène permet également de réduire les émissions carbonées des procédés sidérurgiques. Les surplus d'hydrogène fatal dans les complexes industriels peuvent être utilisés de façon privilégiée en symbiose entre différents procédés ou pour d'autres usages. Enfin, l'hydrogène permet la production directe de chaleur à haute température pour des applications industrielles dont la décarbonation reste jusqu'à présent difficile. S'il est d'origine renouvelable, l'hydrogène peut être aussi combiné à du dioxyde de carbone pour produire du méthane de synthèse et éventuellement fournir ainsi une matière première bas carbone à la chimie dans les complexes intégrés.

• **Intégration des renouvelables et résilience des réseaux:** l'hydrogène produit par électrolyse permet de stocker l'énergie à moyen ou long terme, puis de la libérer en la convertissant de nouveau en électricité en réponse à la demande. Ceci permet d'accroître la flexibilité opérationnelle et la résilience des futurs systèmes énergétiques.



L'hydrogène et la pile à combustible ouvrent ainsi la voie à des systèmes énergétiques bas carbone, permettant de répondre aux défis climatiques tout en apportant une flexibilité aux réseaux favorisant le développement des énergies renouvelables. 20 % d'hydrogène bas carbone dans la consommation finale d'énergie en France représenterait une baisse des émissions de CO₂ de 55 mégatonnes soit une réduction d'un tiers de l'écart entre le scénario technologique de référence et les engagements pris par la France dans le cadre de l'Accord de Paris. Au niveau européen, le potentiel des applications hydrogène représente la moitié de l'écart entre le scénario technologique de référence et le scénario à deux degrés.

1. LA DYNAMIQUE MONDIALE

À l'ère de l'hydrogène à grande échelle

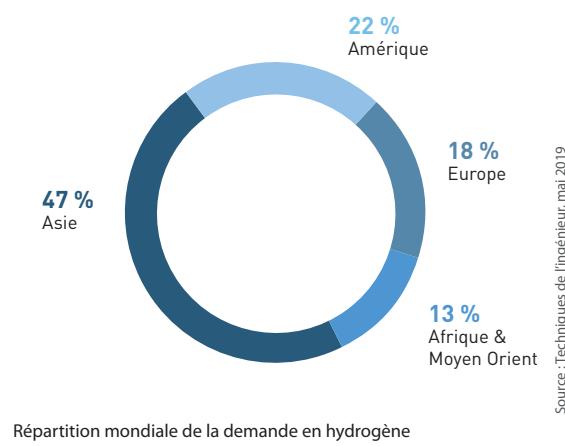
La forte croissance qui s'annonce des nouveaux usages l'hydrogène à l'international, portée par des plans d'investissement importants des acteurs étatiques, traduit une rapide montée en puissance de cette filière à l'international. Japon, Chine, Corée du Sud et États-Unis renforcent notamment leurs atouts technologiques pour se lancer vers le marché de masse. Les stratégies d'amorçage de ces marchés débouchent sur une augmentation des capacités installées de production d'hydrogène bas carbone et le développement de filières industrielles dédiées dans l'amont comme dans l'aval. Elles constituent à la fois une opportunité de développement pour les industriels français positionnés sur ces marchés, et un risque d'intensification à court terme de la concurrence.

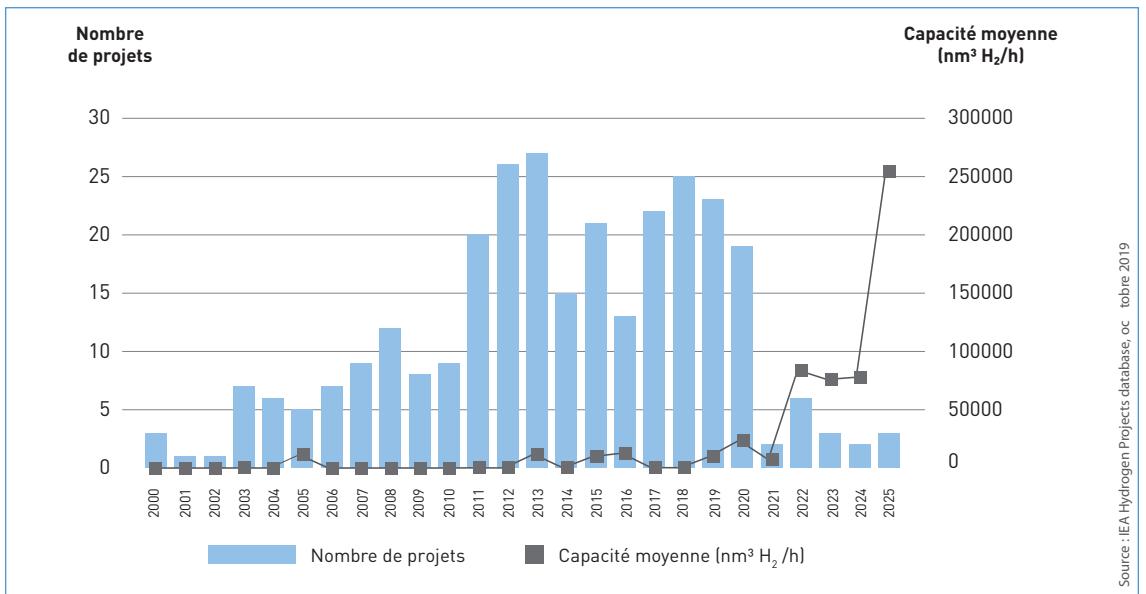
LES TENDANCES CLÉS

Malgré la prise en compte croissante du fait climatique dans les modèles économiques des acteurs industriels et financiers internationaux, les émissions mondiales annuelles de Gaz à Effet de Serre (GES) continuent de croître. Elles sont tirées par une demande soutenue de combustion des énergies fossiles dans les transports et la production d'énergie électrique et thermique. L'Asie représente actuellement près de la moitié des 35 milliards de tonnes de GES émises environ chaque année sur la planète. La pression publique s'intensifie cependant partout dans le monde, pour soutenir les acteurs économiques de la transition et réencherir le coût des émissions de GES, à travers le renforcement notable des taxes et des droits d'émission. L'introduction de ces prix explicites du carbone reste encore partielle et de niveau variable à travers le monde: de 20 à 100 USD/tCO₂e en Europe contre de zéro à 20 USD/tCO₂e en Asie. Mais la

tendance est là, irréversible, et offre au vecteur hydrogène de décarbonation, des opportunités croissantes de renforcer sa présence dans l'industrie, les transports et la production électrique. Dans ce contexte, la filière industrielle de l'hydrogène est stratégique pour répondre, à l'ère du carbone cher, à la nécessité qui s'impose aux acteurs de ces secteurs, de réduire leur exposition carbone en introduisant de nouvelles sources renouvelables et bas carbone dans leurs modèles économiques.

Le marché mondial des technologies et systèmes hydrogène est déjà en nette expansion, porté par l'essor de la demande en énergie bas carbone et les avancées technologiques qui parviennent au stade de la commercialisation. Le marché de l'hydrogène représente aujourd'hui un volume de production de 60 millions de tonnes par an (dont 1 million de tonnes en France) pour une valeur de 100 milliards de dollars environ; issu du vaporeformage des hydrocarbures ou du charbon, il est destiné au raffinage du pétrole et à la chimie. Il s'agit d'être présents et puissants lorsque la demande naissante s'affirmera massivement pour décarboner





Évolution des projets de production d'hydrogène bas carbone

les secteurs industriels et du transport, notamment en Inde et en Asie où le potentiel de décarbonation est considérable.

Mais son positionnement sur le marché des nouveaux usages constitue un levier de croissance significatif: 1 Mt seulement de la production mondiale est aujourd’hui destinée à des usages non industriels. Le développement de la filière est porté par la décarbonation du vecteur d'une part, et par la croissance des applications nouvelles d'autre part. L'essor de la production d'hydrogène bas carbone permet d'envisager à terme une parité de prix avec les technologies reposant uniquement sur les sources fossiles, et une intensification de ses usages dans les secteurs des transports, de l'industrie et des réseaux. Ainsi, la part de l'hydrogène dans la consommation mondiale d'énergie pourrait bondir de 1,3 % actuellement à 18 % en 2050, pour un marché représentant alors une valeur de 2 500 milliards de dollars (Hydrogen Council, 2017).

Les prochaines années connaîtront un point de bascule décisif: l'Agence Internationale de l'Énergie prévoit une baisse substantielle des coûts de production de l'hydrogène bas carbone à l'horizon 2030. Cette baisse résulte d'un changement de dimension dans sa production, qui se positionne sur un marché massifié de

nouveaux usages et tourné vers la décarbonation. L'accélération des projets de massification de solutions hydrogène marque le démarrage d'une nouvelle phase pour les marchés de l'hydrogène: celle du développement à grande échelle.

UN DÉCOLLAGE SOUS L'IMPULSION DES INVESTISSEMENTS PUBLIC-PRIVÉ

L'hydrogène fait l'objet de plans d'investissement massifs dans le monde, avec un volontarisme notable en Asie-Pacifique. Cette accélération de la croissance du marché, largement soutenue par les acteurs étatiques, constitue à la fois une opportunité de développement pour les industriels positionnés sur la filière, et un risque d'intensification de la concurrence issue de marchés ayant plus rapidement atteint la maturité.

Les stratégies de développement de l'hydrogène ne se limitent pas aux préoccupations climatiques, mais s'inscrivent également dans le cadre de priorités politiques plus larges:

• Compétitivité de l'industrie: l'hydrogène fait partie de certaines stratégies nationales de

développement d'une industrie de pointe et est identifié comme un levier de croissance significatif. En Chine, l'hydrogène fait pleinement partie de la stratégie « Made in China 2025 » et vise à développer une industrie complète de la pile à combustible et des véhicules, y compris l'infrastructure de recharge.

• Indépendance énergétique: avec l'objectif climatique, il s'agit du second pilier de la stratégie hydrogène du Japon, dont l'énergie primaire est importée à 94 %. Le développement de nouvelles chaînes d'approvisionnement en hydrogène, destiné à une très large gamme d'applications, vise à diversifier les ressources énergétiques du pays.

• Qualité de l'air: les métropoles, qui concentrent les enjeux d'émissions de polluants atmosphériques, jouent un rôle central dans l'adoption de solutions hydrogène. En Chine, les municipalités de Shanghai, Wuhan et Suzhou complètent ainsi les objectifs nationaux par leurs propres plans de développement de l'hydrogène.

• Valorisation des renouvelables: les régions présentant un fort potentiel d'énergie d'origine renouvelable peuvent s'appuyer sur un prix de l'électricité favorable pour développer d'ambitieux projets d'hydrogène bas carbone, à l'instar de l'Australie qui met en place des investissements visant à la fois le marché domestique et l'export d'hydrogène.

L'enjeu des stratégies nationales de développement de l'hydrogène est le développement de systèmes hydrogène complets de l'amont à l'aval: elles soutiennent à la fois la démonstration de technologie, son passage à l'échelle et l'optimisation des coûts. Il s'agit donc à la fois de mécanismes d'amorçage de la demande et d'accompagnement de la commercialisation, en vue de faciliter la mise sur le marché de nouvelles solutions pour de nouveaux usages.

La course au développement du marché est engagée:

• Le Japon veut devenir la première « société hydrogène » au monde, avec l'objectif d'atteindre à terme la parité coût avec l'essence et le GNL. Cette vision fixe des objectifs quantifiés mais

aussi tarifaires au développement de l'hydrogène. Le Japon a investi près de 1,5 milliard d'euros en six ans en recherche & développement sur la baisse des émissions de CO2 de la production d'hydrogène, les infrastructures d'importation et de distribution, et le développement de ses nouveaux usages (mobilité, co-génération, power-to-gas).

• En Chine, l'hydrogène fait pleinement partie des domaines de développement prioritaires et est intégré au 13^e Plan Quinquennal (2016-2020) ainsi qu'à l'initiative « Made in China 2025 ». La « China Hydrogen Alliance » regroupe l'ensemble des acteurs du secteur, avec un fort soutien gouvernemental. La Chine est déjà le premier producteur d'hydrogène au monde, avec vingt-deux millions de tonnes par an essentiellement issues des hydrocarbures et du charbon, et destinées à la chimie et au raffinage. C'est aussi déjà le premier fabricant mondial d'électrolyseurs. La stratégie de développement de l'hydrogène vise notamment ses nouveaux usages en aval (transport, énergie, matières premières alternatives) et la décarbonation progressive du vecteur.

• En Corée du Sud, le gouvernement et le secteur privé se sont engagés à investir conjointement plus de deux milliards d'euros pour le développement d'une « économie hydrogène » avec un rôle central pour la mobilité. L'ambition affichée est de conserver les avances du pays dans l'industrie de l'automobile à pile à combustible, en accroissant la production de véhicules (6,2 millions en 2040), de piles à combustible, et en standardisant la fabrication de stations de recharge.

• Les États-Unis ont été précurseurs de l'économie hydrogène, ayant favorisé l'émergence de leaders mondiaux de l'électrolyse et de la pile à combustible. Les efforts de recherche & développement au niveau fédéral y ont cependant connu une baisse substantielle à partir de 2008. La Californie y demeure un centre majeur de déploiement des technologies hydrogène, pour la mobilité ainsi que pour les applications stationnaires. Le président Donald Trump vante les mérites d'un « charbon propre » intégrant la CCUS, qui pourrait notamment être utilisé pour la production d'hydrogène comme en Chine.

• **L'Union européenne** élabore la suite des travaux de son partenariat public-privé « Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking (FCH JU) » associant pouvoirs publics et industriels qui vise un investissement total de 1,33 milliard d'euros pour l'amélioration des performances des équipements, la diminution de leur coût, et la mise en conditions de la technologie hydrogène. Cette évolution a fait l'objet d'une consultation de la Commission européenne sur la reconduction du partenariat, visant à évaluer l'intérêt pour une troisième période pour le « Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking » sous la forme d'un Partenariat européen pour l'hydrogène propre.

• **L'Allemagne** a annoncé le 18 juillet 2019 un programme de financement de 100 millions d'euros par an dédiés à vingt consortiums développant les technologies hydrogène dans le cadre de « laboratoires en conditions réelles de la transition énergétique (Reallabore) », avec l'ambition de faire du pays « le numéro un mondial sur les technologies hydrogène ». Le processus de dialogue Gaz 2030 acte par ailleurs le potentiel de l'hydrogène en remplacement du gaz fossile, avec une importance décisive pour la coopération transfrontalière en matière de sources d'énergie gazière respectueuses du climat, y compris hors Union européenne. Plusieurs installations de production d'hydrogène bas carbone à grande échelle y sont actuellement en projet.

• **Au nord des Pays-Bas**, les entreprises et gouvernements des provinces de Groningue et de

Drenthe ont élaboré un plan de 2,8 milliards d'euros pour transformer leur région en une « vallée de l'hydrogène ».

En France, la loi Énergie-Climat promulguée le 8 novembre 2019 facilite et encadre le déploiement de l'hydrogène, et ouvre la voie à un cadre législatif et réglementaire spécifique à l'hydrogène. La loi prévoit notamment « de développer l'hydrogène bas-carbone et renouvelable et ses usages industriel, énergétique et pour la mobilité, avec la perspective d'atteindre environ 20 à 40 % des consommations totales d'hydrogène et d'hydrogène industriel à l'horizon 2030 ». Le Plan National Hydrogène de juin 2018 a été doté pour 2019 d'un budget de 100 millions d'euros dédiés aux déploiements dans les domaines de la mobilité et de l'industrie dans le cadre d'appels à projets de l'ADEME.

À l'instar des stratégies internationales, le développement de l'hydrogène en France doit prioriser le déploiement à grande échelle. 650 millions d'euros par an en moyenne sont nécessaires au déploiement des moyens de production de l'hydrogène, des infrastructures de stockage et de distribution de l'hydrogène, et à la production des composants et systèmes nécessaires aux applications d'utilisation (AFHYPAC, 2018). La mise en place de projets structurants, associant d'ambitieux investissements privés et publics, est une étape essentielle pour l'amorçage du marché en France et en Europe. Elle permettra de consolider la filière française pour être en mesure de gagner des parts de marché à l'export.

Plan National Hydrogène	2023	2028
Démonstrateur de puissance power-to-gas (MW)	1 à 10	10 à 100
Part de l'hydrogène bas carbone dans l'industrie (%)	10 %	20 à 40 %
Véhicules utilitaires légers à hydrogène (nombre)	5 000	20 000 à 50 000
Véhicules lourds à hydrogène (nombre)	200	800 à 2 000
Stations de recharge (nombre)	100	400 à 1 000

Source : ministère de la Transition écologique et solidaire, jan. 2019

Les objectifs du Plan National Hydrogène (2018), repris dans la PPE

2. UN MARCHÉ PORTÉ PAR LES NOUVEAUX USAGES

Pour l'équilibre économique

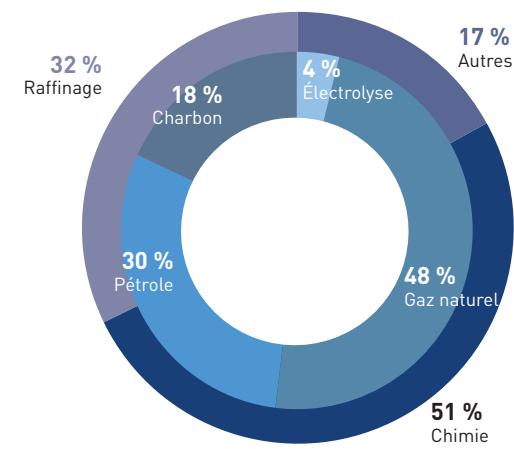
Les stratégies d'amorçage du marché des nouveaux usages de l'hydrogène conduisent à l'adoption du vecteur sur plusieurs segments : transports, mobilité, industrie, réseaux. Pour les fournisseurs de technologies et systèmes hydrogène, cela se traduit par la possibilité de gagner en capacité et d'industrialiser la production d'équipements et systèmes. Les équilibres économiques de l'hydrogène demeurent néanmoins fragiles. En matière de transports et de mobilité, le déploiement combiné des infrastructures et des véhicules en aval, avec de nouvelles productions d'hydrogène permet de sortir du « dilemme de l'œuf et de la poule ». Le développement de ces nouveaux segments nécessite d'accompagner les équipementiers du transport lourd, des usages intensifs et de la longue distance. Le soutien à la production d'hydrogène bas carbone, combiné aux incitations à la baisse des émissions et à la réglementation, permet de développer plus largement les usages dans l'industrie.

L'INDUSTRIE

L'industrie bénéficie d'un important retour d'expérience sur la filière. L'hydrogène bas carbone s'implante dans un secteur où les procédés hydrogène sont déjà largement incorporés à la production. Les principales utilisations d'hydrogène sont à l'heure actuelle l'ammoniac, entrant dans la composition des engrains, le méthanol, pour la production de polymères, et le raffinage du pétrole. De nombreuses autres applications

industrielles existent: métallurgie, verre, composants électroniques notamment.

L'industrie représente un débouché potentiel significatif pour l'hydrogène bas carbone. L'approvisionnement actuel du secteur de la chimie provient majoritairement du gaz naturel (65 %) et du pétrole, à l'exception de l'Asie où le charbon est davantage utilisé (deux tiers de la production). L'Agence Internationale de l'Énergie estime que l'alimentation exclusive de l'ammoniac et du méthanol en hydrogène bas carbone en 2030 requerrait 323 milliards de mètres cube par an de gaz naturel combiné à du CCS-CCU ou 3 020 térawattheures par an d'électricité renouvelable. Le besoin accru d'hydrogène dans le raffinage de pétrole provient principalement des restrictions croissantes sur la teneur en soufre des carburants en Europe, États-Unis et en Chine.



Sources et usages de l'hydrogène industriel

Segment	Échelle (t/an)	Transport
Chimie (ammoniac, méthanol, polyuréthane et nylon)	60 000 à 300 000	Pipeline Vaporeformage sur place
Raffinerie	7 000 à 300 000	Pipeline Vaporeformage sur place
Métallurgie	40 à 800	Tube trailers, cylindre
Électronique, Aérospatial, Verre, Agroalimentaire, Refroidissement	< 200	Liquide, Tube trailers, cylindre, Électrolyse, Cylindre, Électrolyse

Consommations-types des applications industrielles

Une large part de l'hydrogène est actuellement produite par le consommateur sur le site où il est utilisé (tableau ci-dessus). Pour les acteurs de grande échelle disposant de leur propre unité de vaporeformage du méthane, l'association de procédés de vaporeformage au captage et à l'utilisation de carbone (CCUS) représente une voie de production d'hydrogène bas carbone. La production d'hydrogène industriel bas carbone par électrolyse se développe également chez de nombreux acteurs du raffinage, de la production d'ammoniac ou de méthanol. Cette seconde voie de production peut être encouragée pour les installations de plus petite capacité, réduisant ainsi les surcoûts et émissions éventuelles liées au transport et améliorant la qualité de l'air des territoires, villes et zones rurales.

Aux côtés des applications historiques de l'hydrogène dans l'industrie de nouvelles applications se préparent pour décarboner le secteur:

• **Sidérurgie:** l'hydrogène peut être substitué au coke pour la production d'acier par réduction du minerai de fer. Plusieurs procédés sont testés en Suède, en Autriche et en Allemagne.

• **Chaleur haute température:** la production de chaleur supérieure à 400 °C est difficile à électrifier et décarboner. Des brûleurs à hydrogène peuvent compléter la chaleur d'origine électrique pour générer de la chaleur à haute température et répondre aux besoins de l'industrie. Cette technique est peu utilisée à date.

• **Méthane de synthèse:** L'hydrogène peut être combiné à du CO₂ issu du captage du carbone pour produire du méthane de synthèse, qui

devient alors une matière première pour l'industrie chimique. La production de ce méthane de synthèse associant hydrogène bas carbone et CO₂ est considérée en particulier dans le secteur du ciment.

La décarbonation du secteur industriel suppose une délicate adaptation des procédés, dans un contexte de forte sensibilité aux variations du prix de l'énergie et des matières premières. L'adoption de solutions innovantes doit donc s'inscrire dans le cadre d'une approche globale de réduction des émissions, de maintien de la compétitivité, et de valorisation des produits industriels bas carbone. Le prix de la tonne de CO₂ évitée et les capacités de stockage impactent par exemple directement la faisabilité économique des solutions d'hydrogène bas carbone. Le soutien à la production d'hydrogène bas carbone, combiné aux incitations à la baisse des émissions et à la réglementation, est nécessaire afin de favoriser le développement des usages de l'hydrogène bas carbone dans l'industrie.

LA MOBILITÉ

La mobilité hydrogène a dépassé le stade de la démonstration de concept pour s'engager sur la voie des déploiements commerciaux. L'existence de systèmes complets permettant l'usage de moyens de transport à pile à combustible repose d'une part sur la mise sur le marché de nouveaux véhicules, et d'autre part sur le déploiement d'une infrastructure de recharge dédiée. Les deux sont interdépendants: le déploiement de véhicules et d'une infrastructure

de recharge dédiée doit être synchrone afin de surmonter le dilemme de « l'œuf et de la poule » (pas de développement d'infrastructure de recharge en l'absence de véhicules, pas d'achat de véhicules en l'absence de stations de recharge).

Dans le secteur automobile, les progrès significatifs sur les composants utilisés dans les véhicules électriques à pile à combustible (FCEV)

réduisent les coûts de production et font envisager un avenir bas carbone pour l'industrie automobile. L'augmentation des capacités des piles à combustible et des réservoirs hydrogène accroît l'autonomie des véhicules (de 450 à 600 km, proche de celle d'un moteur thermique). Caractérisé par un temps de recharge limité et une autonomie importante, l'hydrogène est particulièrement adapté à la mobilité intensive, à la grande autonomie et au transport lourd.

Les investissements des pays leaders font envisager une importante pénétration du parc mondial de véhicules par les FCEV :

Pays	Véhicules		Infrastructure de recharge	
	2018	2025	2018	2025
États-Unis	5 899	*40 000	63	*200
Japon	2 926	200 000	100	320
Chine	1 791	50 000	15	300
Corée	900	**81 000	14	**310

Objectifs de déploiement 2025 (* Californie ; ** 2022)

Source : AFCTCP Survey 2019 et ERIA, mai 2018

Les annonces sur les perspectives à moyen terme font entrevoir un net accroissement de la tendance à l'horizon 2030: la Chine vise ainsi le déploiement de plus d'un million de véhicules hydrogène en 2030, dont des bus et l'infrastructure associée, et près de 1 000 stations de recharge.

Corollaire de la mise en circulation des véhicules, le maillage en infrastructure de recharge accélère. Japon, Allemagne et Californie concentrent à date plus de la moitié des près de 400 stations de recharge mondiales. La sous-utilisation de l'infrastructure de recharge demeure néanmoins une préoccupation majeure pour les dévelopeurs de services de mobilité hydrogène. Les premiers bilans du projet Hydrogen Mobility Europe (H2ME), qui déploie un réseau de stations de recharge dans huit pays européens, font par exemple apparaître une très bonne performance des systèmes, avec des temps de recharge moyens de 170 secondes

et une disponibilité supérieure à 95 %, mais une demande inférieure à 2 kg/jour.

Sur les marchés porteurs, le modèle-type de développement de la filière s'appuie sur le financement conjoint de l'infrastructure et des véhicules. Le déploiement d'infrastructure de recharge s'appuie sur des partenariats public-privé: H2mobility Germany en Allemagne, HySUT au Japon, H2USA aux États-Unis. De nouveaux modèles économiques sont par ailleurs expérimentés pour pallier le risque de sous-utilisation. En Californie, industriels et équipementiers investissent conjointement dans la production d'hydrogène et dans un réseau de stations de recharge pour accompagner la politique de décarbonation des villes. Des offres de services de mobilité zéro émission s'appuient sur des flottes de véhicules destinés à un usage captif (flottes de taxis, livraisons urbaines).

Priorité au transport lourd, aux usages intensifs et à la longue distance

Le développement de services commerciaux de mobilité hydrogène, où le risque de l'utilisation est maîtrisé, constitue un levier de croissance majeur de la filière. L'électrification des systèmes embarqués mobilise un savoir-faire déjà appliqué aux mobilités électriques, et pouvant être mis en œuvre sur les systèmes de piles à combustible ainsi que sur les systèmes hybrides électrique-hydrogène (ferroviaire, naval...).

Les entreprises françaises contribuent ainsi aux mises en service sur plusieurs segments de la mobilité hydrogène:

- **Bus:** les bus électriques à pile à combustible (FCEB) ont typiquement une autonomie de 300 à 450 km et une consommation de 8 à 9 kg aux cent kilomètres pour 2 PAC 100 kW, offrant ainsi des conditions d'opération similaires au diesel. Expérimentés depuis les années 1990, ils connaissent dorénavant des déploiements importants dans les grandes agglomérations en Chine et dans une moindre mesure en Californie et en Europe.

- **Transport lourd:** malgré des autonomies bien moindres que les poids lourds à motorisation conventionnelle, le transport lourd connaît de premières mises en service sur des parcours urbains (camions, bennes à ordure) ou la logistique de courte distance.

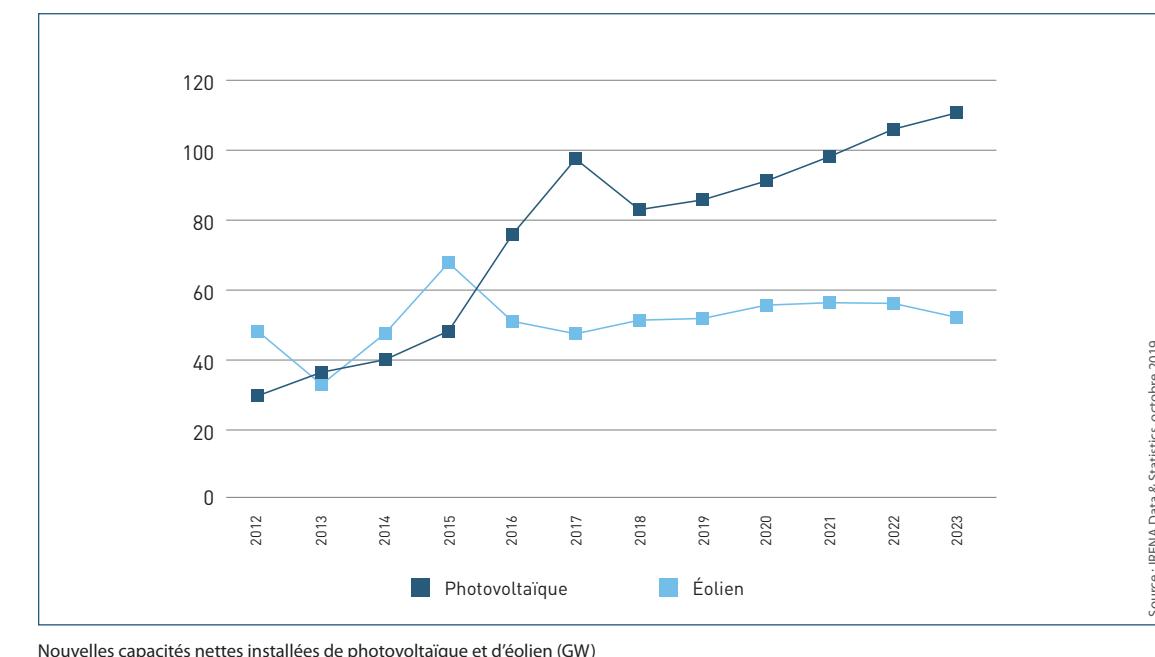
- **Ferroviaire:** les trains à pile à combustible offrent une solution avantageuse aux lignes ferroviaires non électrifiées, pour les lignes connaissant un trafic de faible intensité. Le Land de Basse-Saxe en Allemagne a inauguré la première ligne commerciale de transport de passagers au monde, avec 14 autorails iLint construits par Alstom. Des projets de déploiement sont prévus ou à l'étude en France mais aussi au Royaume-Uni, au Canada, au Japon et en Malaisie. La propulsion hydrogène est également attractive pour les engins ferroviaires de travaux de la voie, qui doivent intervenir de nuit et sur des installations hors tension, ainsi que pour les tramways.

• **Navigation fluviale et maritime:** l'utilisation de la pile à combustible est appliquée à la propulsion et ouvre la voie au « zéro émission » pour la navigation. Les déploiements-pilotes de navires hydrogène ont essentiellement lieu en Europe. Faisant suite à des preuves de concept de l'ordre de quelques centaines de kilowatts, les navires à hydrogène peuvent aujourd'hui être propulsés par des piles à combustible de plus grande capacité, permettant d'envisager la conversion de navires destinés au transport de passagers (navettes, ferries, navires de croisière), au transport de fret et aux services en mer (remorqueurs, maintenance offshore...).

STOCKAGE ET FLEXIBILITÉ DES RÉSEAUX

Le **Power-to-Hydrogen** permet de transformer l'électricité issue d'énergies renouvelables ou bas carbone en hydrogène. Il consiste à convertir de l'électricité (*power*) en hydrogène. Plus précisément il s'agit d'utiliser de l'électricité bas carbone pour produire, par électrolyse de l'eau, de l'hydrogène qui peut être injecté dans le réseau de gaz naturel ou utilisé dans différents secteurs (mobilité, industrie...). L'énergie peut également être de nouveau convertie en électricité: le *Power-to-Gas-to-Power* (PtP) permet de stocker les énergies renouvelables et de les restituer au réseau électrique en réponse à la demande, après reconversion en électricité via une pile à combustible, en application résidentielle par exemple. Les systèmes « Power-to-Hydrogen » apportent ainsi une réponse aux besoins de transport, stockage de l'énergie et de flexibilité du réseau.

L'hydrogène comme solution de stockage de l'énergie complète ainsi d'autres technologies comme le stockage en batterie électrochimique ou les centrales de pompage-turbinage (STEP) entre autres. L'intégration massive de sources d'énergie intermittente dans les systèmes électriques, avec 57 % de renouvelables dans la production mondiale d'énergie en 2030 (IRENA, scénario REmap) implique des périodes de plus en plus importantes durant lesquelles la production dépassera la demande, avec notamment des épisodes de prix négatifs.



Source : IRENA Data & Statistics, octobre 2019

La conversion en un autre vecteur énergétique stockable apparaît donc comme une solution pour accompagner la pénétration croissante des énergies renouvelables électriques :

- Problématiques de gestion de congestion locales, auxquelles ce stockage pourrait répondre
- Équilibre offre-demande à l'échelle du système interconnecté

Les services de stockage ou de flexibilité que peut rendre l'hydrogène trouvent donc un intérêt naturel dans le maintien de l'équilibre offre-demande, bien qu'ils soient en compétition avec d'autres solutions (raccordement intelligent, renforcements du réseau, STEP, batteries, pilotage de la demande...). La pénétration des énergies renouvelables électriques variables augmente surtout à court terme le besoin de flexibilité infra-journalière et journalière. La contribution de l'hydrogène à la flexibilité saisonnière apparaît comme une perspective de plus long terme.

La baisse du coût de l'électricité d'origine renouvelable, respectivement de 71 et 58 % d'ici 2050 pour le photovoltaïque et l'éolien (IRENA) a un impact direct sur le développement de l'hydrogène bas carbone, favorisé par les faibles coûts de l'électricité.

Les marchés à fort développement des renouvelables sont donc porteurs pour l'hydrogène électrolytique: Chine, Inde, États-Unis, Brésil, Australie notamment. Le développement d'installations hydrogène de plusieurs centaines de mégawatts permet d'y approvisionner à grande échelle des utilisateurs industriels ou de mobilité.

L'hydrogène électrolytique et les piles à combustibles peuvent également constituer une alternative à l'approvisionnement en électricité carbonée (par groupe électrogène par exemple) pour les territoires isolés ou insulaires. Le renforcement de la résilience de leurs systèmes énergétiques et l'intégration des renouvelables répondent à des problématiques de coûts de production élevés de l'électricité, de décarbonation et de sécurisation de leur approvisionnement énergétique. Plusieurs projets démonstrateurs associant renouvelables et stockage hydrogène sont mis en œuvre, dans les Orcades au large de l'Écosse, à Porto Santo dans l'archipel de Madère mais aussi dans les zones non interconnectées en France (Corse, La Réunion).

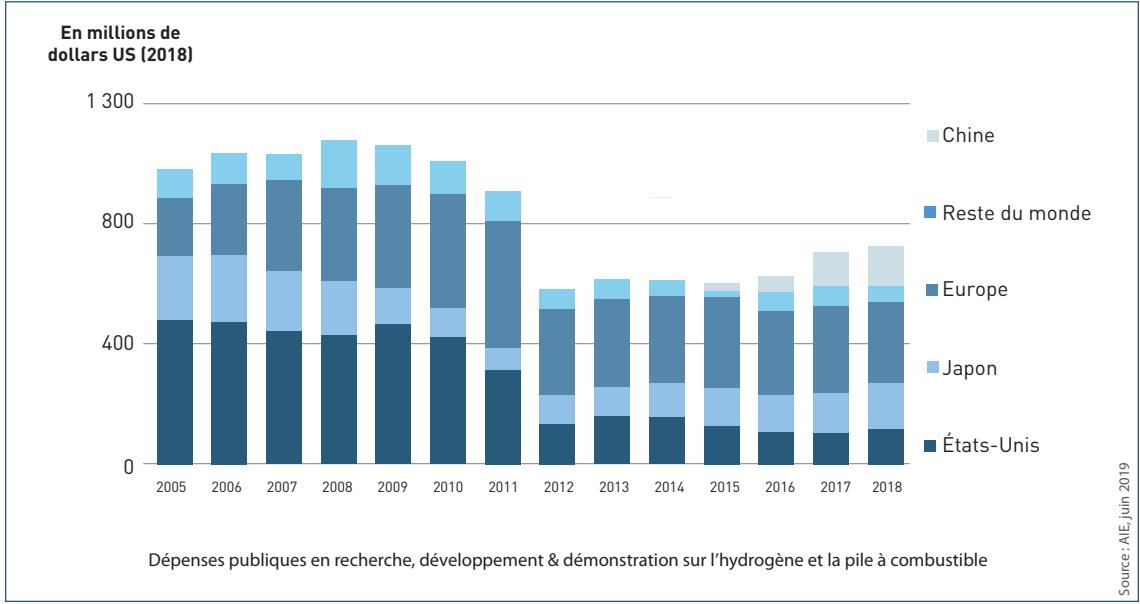
3. L'HYDROGÈNE À L'EXPORT, ENJEU INDUSTRIEL

L'industrialisation s'accélère

Plusieurs décennies d'efforts de recherche & développement ont permis de lever les verrous technologiques des nouveaux usages de l'hydrogène. L'industrialisation de la production d'équipements et composants des systèmes hydrogène, et en premier lieu des électrolyseurs et piles à combustible, présente un fort potentiel de baisse des coûts : les annonces d'investissement dans des usines de production à grande échelle s'accélèrent. La filière française doit pouvoir également changer de dimension pour répondre aux objectifs du Plan National Hydrogène et assurer dans la durée sa position internationale.

LES ATOUTS TECHNOLOGIQUES

L'évolution du soutien à la recherche & développement en matière d'hydrogène et de pile à combustible, stable en Europe et au Japon, connaît une forte croissance en Chine depuis 2015, liée au 13^e Plan Quinquennal 2016-20. Résultat de la montée en maturité des procédés, l'essentiel de la recherche & développement n'est pas consacré à la levée de verrous technologiques mais à l'amélioration des équipements et procédés de toute la chaîne de valeur de l'hydrogène ainsi qu'à la facilitation de son déploiement à grande échelle dans les nouveaux usages.



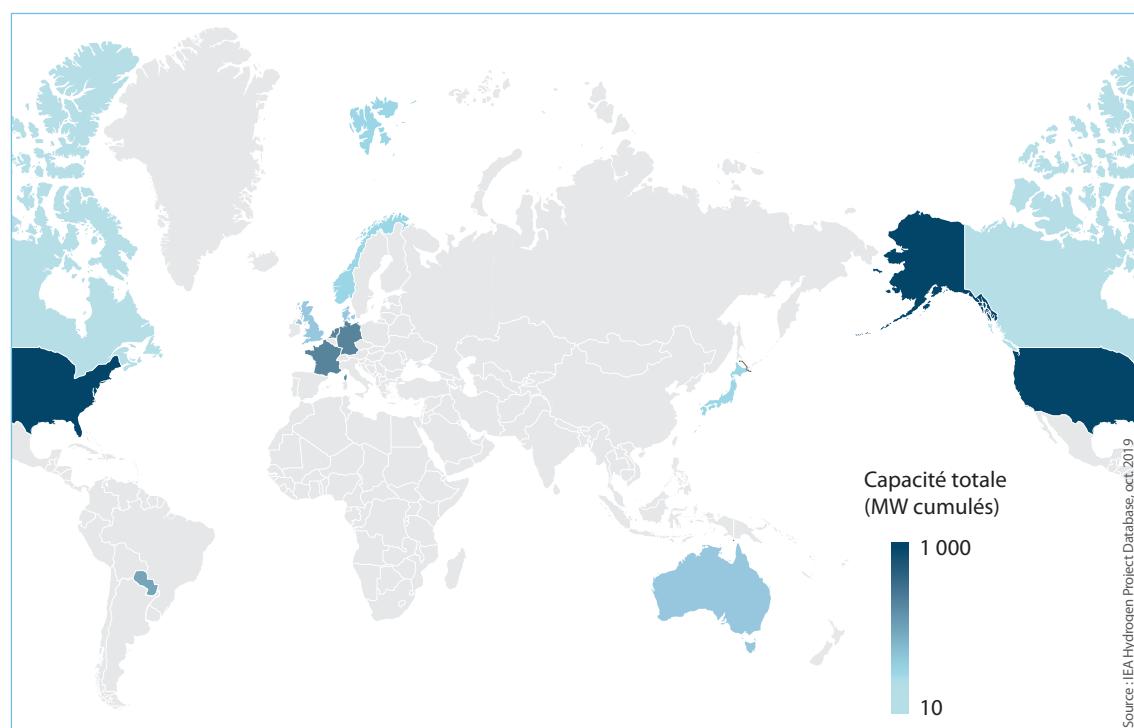
La France peut s'appuyer sur un savoir-faire déjà reconnu à l'international et recèle des entreprises au potentiel mondial, notamment sur les segments de la production et des équipements spécialisés. Les bénéfices des efforts de recherche & développement sont encore préservés par la faible intensité de la concurrence dans les technologies et systèmes hydrogène bas carbone sur les marchés internationaux. La baisse du coût des équipements, engendrée par la massification de la production, fait néanmoins envisager à court terme un accroissement de la concurrence.

Technologie	Unité	2018	2050
Électrolyseur (alcalin)	€/kWel	800-1 700	400-700
Électrolyseur (PEM)	€/kWel	1 300-3 200	300-700
Vaporeformage et CCS	€/kW ²	600-1 300	400-600
Stockage embarqué	€/kW ²	13-20	8
Pile à combustible embarquée	€/kWel	38-152	34
Stockage géologique	€/kW ²	0,1-2,0	0,1-2,0
Pile à combustible stationnaire	€/kWel	640-2 900	330-1 500

Estimation de baisse des CAPEX

Source : Quarton et al., 2019

Une intensification de la concurrence, notamment sur les marchés des électrolyseurs et des piles à combustible, est susceptible de fragiliser la position des équipementiers. C'est notamment le cas en matière d'électrolyse, secteur déjà fortement concentré. Les investissements en recherche & développement des entreprises, qui ont jusqu'ici mobilisé d'importantes ressources, peuvent affecter la capacité à investir dans l'appareil productif et les fragiliser dans la consolidation agressive qui s'ouvre du marché.



Le graphique ci-dessous décompose schématiquement les facteurs de coût d'un électrolyseur. Les ordres de grandeur sont indicatifs et varient notamment avec la technologie et la capacité de l'équipement.

Matière première	Membrane & électrode	Stack	Balance of plant
-15 %	-10 %	-5 %	-70 %
Réduction des matières première	Automatisation de l'assemblage et économies d'échelle	Standardisation et optimisation de l'électronique de puissance	

Facteurs de coût d'un électrolyseur et potentiel de réduction

Le développement des électrolyseurs est favorisé par plusieurs facteurs :

• **La réduction des coûts de l'assemblage et des équipements** est portée par les économies d'échelle résultant de la croissance des volumes et l'automatisation et l'optimisation des chaînes de production. La poursuite de l'industrialisation et le déploiement de solutions standardisées sur les auxiliaires de l'électrolyseur et les

équipements électriques représentant notamment 20 % des coûts, permettront d'accentuer cette tendance. Plusieurs projets d'unités de production annuelle supérieure à 300 MW par an sont annoncés en Europe et en Asie.

• **L'amélioration du rendement** : il varie de 60 % à plus de 90 % selon les technologies d'électrolyse (alcaline, PEM ou SOEC). L'électrolyse alcaline est aujourd'hui la plus répandue et la plus mature, même si une amélioration de ses performances reste encore atteignable. Une croissance des rendements peut être obtenue par les autres technologies (PEM et SOEC), qui présentent une maturité technologique moins avancée.

• **L'optimisation de l'utilisation** : l'allongement des durées d'utilisation a un impact positif sur la rentabilité des électrolyseurs, tandis que l'ajustement du fonctionnement de l'électrolyseur au signal-prix de l'électricité permet de réduire les coûts d'exploitation (essentiellement composés du coût de l'électricité). Les systèmes de pilotage de l'électrolyse peuvent donc en réduire le coût pour les utilisateurs finaux.

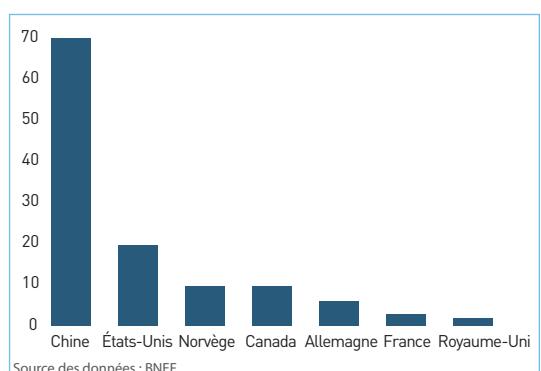
LE PASSAGE À L'ÉCHELLE, CLÉ DE LA FILIÈRE

Les électrolyseurs

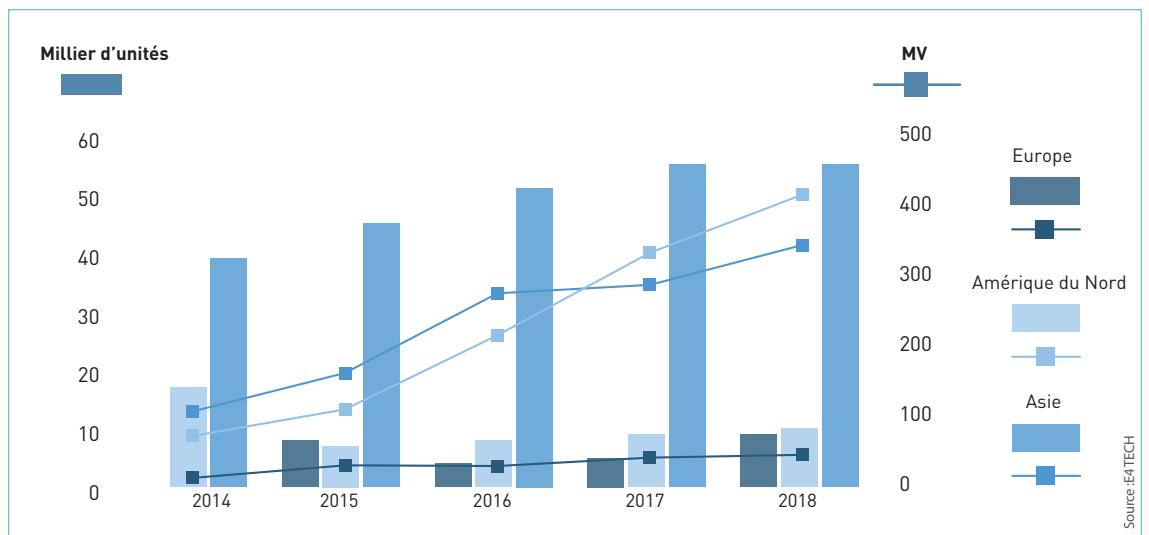
L'électrolyse est un procédé par lequel un courant électrique est utilisé pour séparer les deux composants de l'eau, l'hydrogène et l'oxygène. Plusieurs types d'électrolyseurs existent : électrolyseurs alcalins, à membrane à échangeur de protons (PEM) ou à oxydes solides (SOEC).

La commercialisation d'électrolyseurs représentait 135 MW en 2018. Les fabricants chinois concentrent la majorité des ventes (59 %), essentiellement destinées au marché domestique, et se positionnent donc devant les fabricants issus d'Europe et d'Amérique du Nord. Le marché des électrolyseurs est fortement concentré, les 10 principaux fournisseurs étant des entreprises spécialisées assurant près de 90 % des ventes. Corollaire de la croissance de la demande en

hydrogène bas carbone, plus d'une vingtaine de projets d'électrolyse d'une capacité supérieure à 10 MW sont prévus d'ici 2024 dans le monde. De telles opérations, largement supérieures aux moyennes actuelles (typiquement 2 à 4 MW), traduisent une forte accélération du marché à court terme.



Origine des 10 principaux fabricants d'électrolyseurs, par ventes en 2018 en MW



Évolution des ventes de piles à combustible par région

Les piles à combustible

Les piles à combustible génèrent de l'électricité par réaction électrochimique entre l'hydrogène et l'oxygène. Elles sont au cœur des nouveaux usages de l'hydrogène: systèmes embarqués sur les véhicules et applications stationnaires, qu'elles alimentent en énergie. Leur amélioration et leurs gains en capacité permettent de développer de nouvelles applications utilisatrices d'hydrogène, et créent donc de nouveaux débouchés pour les constructeurs (automobile et véhicules légers, train, transport lourd) et équipementiers. De façon similaire aux électrolyseurs, il en existe plusieurs types: alcalines, à membrane à échangeur de protons (PEM), à oxydes solides (SOFC) ou à carbonate fondu (MCFC).

Reflétant le dynamisme des secteurs d'application utilisateurs d'hydrogène, les ventes de piles à combustible sont en nette croissance, avoisinant les 75 000 unités et 800 MW en 2018 - dont 560 MW destinés au secteur des transports et 240 MW pour les applications stationnaires telles que les micro-unités de cogénération pour un usage résidentiel (principalement au Japon, en Californie et dans une moindre mesure en Allemagne). Le marché de la mobilité hydrogène en Amérique du Nord et en Asie alimente donc largement cette croissance.

L'accélération des déploiements est favorisée par le soutien des gouvernements aux fabricants, aux États-Unis et en Corée en premier lieu. L'adoption de piles à combustible est favorisée par la présence de fabricants locaux, le prix de l'énergie ainsi que l'existence de mécanismes de soutien (tarif de rachat ou normes d'inclusion de renouvelables dans la production):

• **États-Unis:** avec environ 500 MW installés, dont 240 MW en Californie, les piles à combustible d'une capacité supérieure à 200 kW sont relativement répandues dans l'alimentation de bâtiments et entreprises, notamment en raison des fragilités du réseau d'électricité. En 2016, les trois principaux fabricants aux États-Unis (Bloom Energy, Doosan Fuel Cell America et FuelCell Energy) exportaient plus de la moitié de leur production vers la Corée.

• **Corée du Sud:** avec un objectif de doublement des déploiements de 300 à 600 MW d'ici 2022, les subventions aux projets de démonstration peuvent atteindre jusqu'à 80 % en Corée. La production de piles à combustible y repose essentiellement sur les technologies américaines, bien que le groupe Doosan y mène actuellement un programme local de développement de piles à combustible d'une capacité à l'échelle du mégawatt.

Reflétant le dynamisme des secteurs d'application utilisateurs d'hydrogène, les ventes de piles à combustible sont en nette croissance, avoisinant les 75 000 unités et 800 MW en 2018 - dont 560 MW destinés au secteur des transports et 240 MW pour les applications stationnaires telles que les micro-unités de cogénération pour un usage résidentiel (principalement au Japon, en Californie et dans une moindre mesure en Allemagne). Le marché de la mobilité hydrogène en Amérique du Nord et en Asie alimente donc largement cette croissance.

• **Japon:** la stratégie hydrogène du Japon privilie le déploiement de piles à combustible pour la production décentralisée à petite échelle et la création d'un marché des piles à combustible résidentielles généralement inférieurs à 5 kilowatts. Une particularité du marché japonais est que les investissements y sont réalisés par des grands groupes (Toshiba, Mitsubishi, Panasonic) plutôt que par des entreprises spécialisées, comme c'est le cas ailleurs.

La pile à combustible présente un important gisement d'économies d'échelle: jusqu'à 65 % de baisse des coûts de l'équipement en passant de 1 000 à 100 000 unités par an, selon l'Agence Internationale de l'Énergie, avec donc un effet déterminant sur les usages auxquels elle est associée. C'est dans cette perspective que le fabricant chinois de piles à combustibles Snowman Group a annoncé un investissement de 679 millions USD lui permettant d'atteindre le seuil des 100 000 unités par an à partir de 2025. À titre

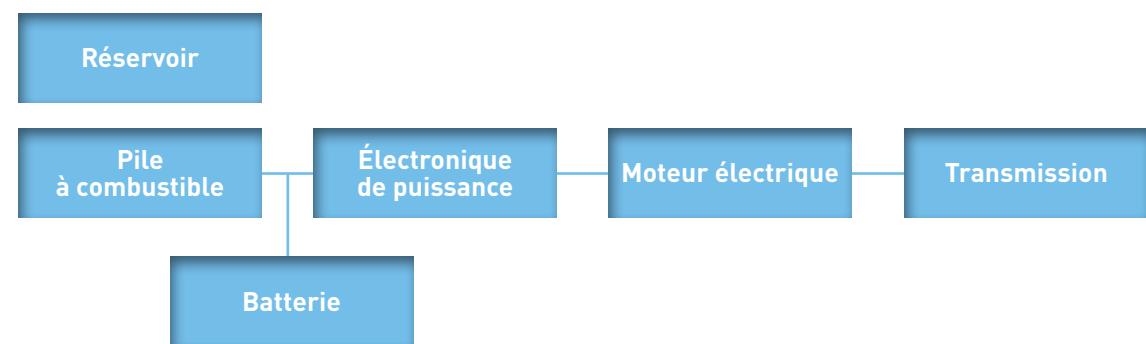
d'illustration, ce seuil représente 1 % du marché mondial de l'utilitaire léger, toutes propulsions confondues.

Le marché des piles à combustible se développe donc avec l'accroissement des usages de l'hydrogène. Pour les applications stationnaires de grande capacité, il permet d'alimenter de nouveaux segments du marché tels que les data centers et les installations de cogénération dans l'industrie, au potentiel considérable.

Équipements et systèmes pour la mobilité

Le développement de la mobilité hydrogène nécessite un appui aux constructeurs et équipementiers pour réduire le surcoût des technologies hydrogène, accélérer les partenariats industriels et envisager un développement sur les marchés internationaux. Les entreprises françaises se positionnent déjà sur plusieurs segments de la mobilité hydrogène, qui connaît de nettes avancées chez les constructeurs et équipementiers européens, nord-américains et asiatiques:

• **Automobile:** le marché est actuellement dominé par les constructeurs japonais (Toyota, Honda) et coréen (Hyundai). En France, le marché de l'équipement automobile connaît des innovations à fort potentiel avec par exemple les prolongateurs d'autonomie pour véhicules utilitaires développés par Symbio, entreprise commune entre Michelin et



Principe d'un véhicule électrique à pile à combustible

Faurecia. Les gains d'autonomie des utilitaires permettent la mise sur le marché de modèles tels que la Renault Kangoo ZE et le Renault Master ZE. Le développement de l'hydrogène dans le secteur automobile est notamment accompagné par le pôle Véhicule du Futur qui regroupe 420 membres dont 345 entreprises autour de trois missions: l'innovation, l'excellence industrielle et l'accompagnement de la croissance des entreprises.

- Ferroviaire:** le Coradia iLint construit par Alstom et mis en exploitation commerciale en Allemagne en septembre 2018 est le premier train de passagers au monde alimenté par des piles à combustible. Le constructeur a également lancé le développement d'un modèle de train destiné au marché français. Cette avance peut avoir un impact positif sur la production de matériel ferroviaire pour lesquels de nouveaux segments hydrogène se développent (tramways, engins ferroviaires) et sur ses débouchés à l'export. Le chiffre d'affaires à l'export est largement lié à la signature de grands contrats, avec un rôle clé de la vente de matériel roulant et la constitution de partenariats avec les acteurs locaux.

- Bus:** une dizaine de constructeurs européens, dont le français Safra, proposent des modèles de bus électriques à hydrogène en phase de commercialisation et de déploiement. Au Japon, Toyota a annoncé le lancement d'une flotte de cent bus pour les Jeux Olympiques et Paralympiques de Tokyo en 2020. Mais c'est en Chine que l'accélération de la production de bus électriques à hydrogène est la plus forte: un partenariat entre les fabricants de piles à combustible chinois Synergy et canadien Ballard, associés au constructeur Feichi, à l'intégrateur de systèmes de pile à combustible Re-Fire et au dévelopeur de stations de recharge Furuisse mène depuis 2016 un programme de production de 300 bus à Foshan et Yunfu.

- Camions:** le développement de plusieurs modèles de poids lourds à pile à combustible est annoncé. CNH Industry, maison mère de Iveco a ainsi massivement investi dans la start-up Nikola Motor Company aux États-Unis, tandis

que plusieurs modèles asiatiques (Hyundai, Toyota) sont attendus. En France, PVI (Power Vehicle Innovation), filiale du Groupe Renault, produit des camions hydrogène pouvant être utilisés pour les bennes à ordures ménagères, le transport de liquides, la distribution frigorifique et logistique et le transport de *containers*.

Le marché se développe également sur les véhicules logistiques légers (chariots de manutention), le transport maritime et fluvial comme par exemple le projet «Flagship» sur le Rhône, mais aussi l'aéronautique, principalement les drones à ce stade.

Intégration des systèmes et électrification

L'intégration des systèmes vise à comprendre et optimiser les interactions complexes entre composants, coûts des systèmes et besoins énergétiques. Elle permet d'aboutir à des systèmes d'hydrogène et de piles à combustible intégrés et optimisés. À ce titre, la filière hydrogène mobilise une vaste gamme de savoir-faire des industriels de l'infrastructure, de l'ingénierie, de la conception, de l'opération et maintenance. Ces compétences peuvent être appliquées à la fois au niveau des équipements mais également au niveau des systèmes énergétiques pour permettre à l'hydrogène de devenir un important vecteur d'électrification et de transition énergétique. C'est ainsi le cas en matière de maîtrise des perturbations électromagnétiques sur les réseaux électriques générées par la production d'hydrogène par électrolyse (« harmoniques ») mobilisant des compétences électrotechniques de pointe.

Au niveau des systèmes énergétiques, les flexibilités offertes par l'hydrogène permettent à l'utilisateur final d'adapter sa consommation à la disponibilité et au prix de l'électricité. Ce savoir-faire sur l'effacement des consommations et l'optimisation de l'injection des renouvelables est déjà mobilisé à l'échelle de sites industriels mais également de zones géographiques étendues (Virtual Power Plants). Elles permettent également de proposer des services réseau tels que la régulation de fréquence, comme c'est actuellement le cas par batterie électrique.

Pays	Longueur (km)
États-Unis	2 608
Belgique	613
Allemagne	390
France	303
Pays-Bas	237
Canada	147

Source des données : HyARC

Gazoducs d'hydrogène par pays

STOCKAGE ET TRANSPORT D'HYDROGÈNE

Si l'hydrogène n'est pas consommé sur son site de production, il doit être conditionné, stocké et transporté ce qui suppose l'adaptation des équipements existants ou la mise en place d'une infrastructure dédiée:

- Stockage:** l'hydrogène peut être stocké sur de longues durées et en quantité, mais nécessite d'être comprimé ou de changer d'état afin d'accroître sa densité énergétique. Il peut être stocké sous forme gazeuse (à haute pression), liquide (à très basse température) ou solide (par hydrure). En grande quantité, il peut être stocké dans les infrastructures gazières: réseaux de gaz naturel, cavités creusées dans les massifs salins. Le dimensionnement des installations de stockage doit être adapté aux niveaux de consommation et aux pressions de distribution, par conséquent à l'activité des utilisateurs finaux.

- Transport:** l'hydrogène offre une solution au transport d'énergie bas carbone. En petites quantités, l'hydrogène peut être conditionné en

réservoir ou en bouteilles pour être transporté par camion. Sur de plus grandes distances et en grandes quantités, il peut être transporté par gazoduc mélangé au gaz naturel. L'adaptation des infrastructures de transmission existantes (canalisations, compresseurs, postes de détente, etc.) permet d'envisager une conversion des actifs pour intégrer l'hydrogène, qui présente des volumes plus élevés et a une densité moindre que le gaz naturel. L'hydrogène peut également être injecté seul dans un réseau dédié. Il existe ainsi aux États-Unis un réseau de 2 600 km de transport d'hydrogène, et de 1 600 km en Europe. Des gazoducs de longueur beaucoup plus limitée existent également en Asie et en Amérique du Sud.

Enfin, des projets de transport sur longue distance d'hydrogène destiné à l'export sont actuellement en cours. Le Japon et l'Australie ont lancé un projet conjoint de construction d'un terminal de liquéfaction, stockage et chargement d'hydrogène dans l'État de Victoria pour un export vers le Japon, où il sera destiné à la mobilité, la chaleur résidentielle et la production d'énergie. Un projet similaire est envisagé entre Brunei et le Japon.

4. RÉUSSIR L'HYDROGÈNE À L'EXPORT

Pour une approche stratégique de l'hydrogène à l'international

La filière de l'hydrogène contribue à la décarbonation des pays tout en favorisant leur dynamisme économique et l'amélioration de la qualité de l'air pour leurs populations. L'hydrogène est de ce point de vue un vecteur clé de développement durable et solidaire. Sur les marchés de l'hydrogène en forte croissance, les territoires sont des acteurs-clés de l'essor de la filière: par la mise en place de démarches partenariales innovantes, ils sont les moteurs de la mutualisation des infrastructures et du développement des usages. L'approche que nous proposons repose sur une mutualisation plus approfondie des usages et une agrégation des compétences en France et en Europe, permettant d'accroître la force de frappe des acteurs de la filière dans le cadre de partenariats européens et internationaux renforcés. La réalisation du potentiel export de la filière industrielle française doit pouvoir s'appuyer sur une approche stratégique des partenariats européens et internationaux pour renforcer sa position sur les chaînes de valeur mondiales de l'hydrogène.

Dans la course au développement du marché des nouveaux usages de l'hydrogène, la stratégie d'internationalisation doit être intégrée très tôt aux efforts de montée en puissance de la filière hydrogène. Le potentiel à l'export de la filière française est estimé à 6,5 milliards d'euros

en 2030 par l'étude de l'AFHYPAC « Développons l'hydrogène pour l'économie française », avec un solde commercial positif pouvant permettre à l'industrie française de devenir un fournisseur mondial majeur des technologies de l'hydrogène. Cette opportunité dépend évidemment de la capacité de la filière à se structurer pour se positionner sur les marchés en plein essor.

La démarche de développement de la filière hydrogène à l'international peut s'inspirer de la French Tech, qui établit une ambition partagée pour la croissance et le rayonnement international des jeunes pousses liées à la France. Elle s'appuie sur les initiatives de ses membres, réunies sous une appellation commune pour créer un effet « boule de neige », avec trois objectifs: fédérer l'écosystème agissant en faveur de l'innovation technologique (*start-ups*, entreprises, associations, institutions...), accélérer l'émergence et le développement d'entreprises innovantes à l'international, et rayonner en offrant de la visibilité aux acteurs innovants et en promouvant l'attractivité de la France. Les mêmes ambitions peuvent animer la filière industrielle française de l'hydrogène en France et en Europe.

C'est dans ce cadre que des projets concrets d'ampleur pourront être efficacement conduits pour placer la filière française au tout premier rang des nouveaux usages de l'hydrogène à l'international.

RECHERCHER L'EXCELLENCE DANS LES « HUBS HYDROGÈNE »

La création de « hubs hydrogène » est au cœur du déploiement des nouveaux usages de l'hydrogène à l'international. Les infrastructures lourdes que nécessite ce déploiement sont ainsi mutualisées vers des usages multiples en un lieu industriel connecté aux réseaux de transport lourds, à l'électricité, et aux systèmes urbains. Les complexes industrialo-portuaires sont notamment très appropriés pour la création de ces *hubs*.

Leur mise en œuvre à grande échelle est une étape essentielle pour la consolidation de la filière française à l'exportation. La conduite de projets d'ampleur autour des industries déjà consommatrices d'hydrogène bas carbone (raffinage, pétrochimie, chimie...) permet de fédérer l'ensemble des savoir-faire techniques, historiques et nouveaux de la filière, autour de réalisations ancrées dans les territoires aux côtés d'acteurs publics et de financeurs. C'est une expérience à valeur ajoutée déterminante pour le potentiel de filière française à terme sur les marchés extérieurs.

La réalisation de ce potentiel nécessite de passer d'expériences-pilotes en silo au développement d'un marché, s'appuyant sur un écosystème d'entreprises et d'organisations dédiées. Au-delà des réductions des émissions de Gaz à Effet de Serre et de l'amélioration de la qualité de l'air, les investissements pour le développement de l'hydrogène génèrent localement de nombreuses externalités positives :

- développement de l'innovation industrielle ;
- créations d'emplois générés par les investissements ;
- amélioration de la visibilité et de l'attractivité des territoires.

Reflet de cette tendance mondiale à la création de *hubs* hydrogène, la Métropole de Tokyo investit dans le déploiement d'infrastructures hydrogène en vue des Jeux Olympiques et Paralympiques de Tokyo 2020, un point d'étape décisif dans la stratégie de développement du vecteur. En Chine, la ville de Wuhan veut être *leader* de la

technologie et accueille un parc industriel d'une centaine d'entreprises du secteur. En Corée du Sud, le gouvernement prévoit trois « villes hydrogène » pour 2022, intégrant un système complet d'infrastructures de production, stockage, transport et utilisation d'hydrogène. Enfin dans son rapport « The Future of Hydrogen », l'AIE propose d'intensifier les nouveaux usages de l'hydrogène autour de *hubs* industrialo-portuaires. Ceux-ci accueillent le plus souvent déjà des activités de raffinage et de chimie utilisant de l'hydrogène, et peuvent alimenter les navires, trains et camions qui les desservent ainsi que les installations industrielles à proximité.

En Europe, 31 collectivités issues de 13 régions participent au partenariat « Hydrogen Valleys » pour consolider le rôle des régions comme utilisateurs d'hydrogène bas carbone, coordonner leurs investissements, renforcer leur capacité d'innovation dans le cadre des stratégies de recherche & innovation régionales, et développer des projets européens sur l'ensemble de la chaîne de valeur. L'Europe dispose également d'excellentes infrastructures industrialo-portuaires le long de son artère fluviale Danube-Rhin-Rhône reliant la mer du Nord à la Méditerranée et à la mer Noire. Des *hubs* de production d'hydrogène et des corridors multiusages y sont réalisables à moindre coût, qui permettraient de tirer le meilleur parti de cet atout continental très reconnaissable tout au long d'une « route de la soie » européenne, fédératrice des nouveaux usages de l'hydrogène et des acteurs européens.

En France, la Vallée de la Chimie joue un rôle précurseur sur les multi-usages de l'hydrogène et prévoit l'installation d'un électrolyseur de grande capacité (20 à 30 MW) alimenté en énergie hydroélectrique. Par ailleurs, les ports qui concentrent les usages industriels et de mobilité tout en étant proches de centres urbains soumis aux impératifs de qualité de l'air, apparaissent ainsi comme un cas-type de fort potentiel de développement des applications hydrogène. La France dispose également d'atouts particuliers dans ses territoires ultramarins aux réseaux non interconnectés, qui présentent un fort enjeu d'autonomie énergétique et de décarbonation. L'introduction de premiers *hubs* d'hydrogène

en lien avec le déploiement accru des énergies renouvelables, offre de sérieuses opportunités multiusages démonstratrices de l'excellence française dans ces territoires (stockage réseau, mobilité terrestre, navettes inter-îles notamment), tout en assurant une porte d'entrée vers les marchés extérieurs à fort potentiel, notamment vers la zone Asie-Pacifique.

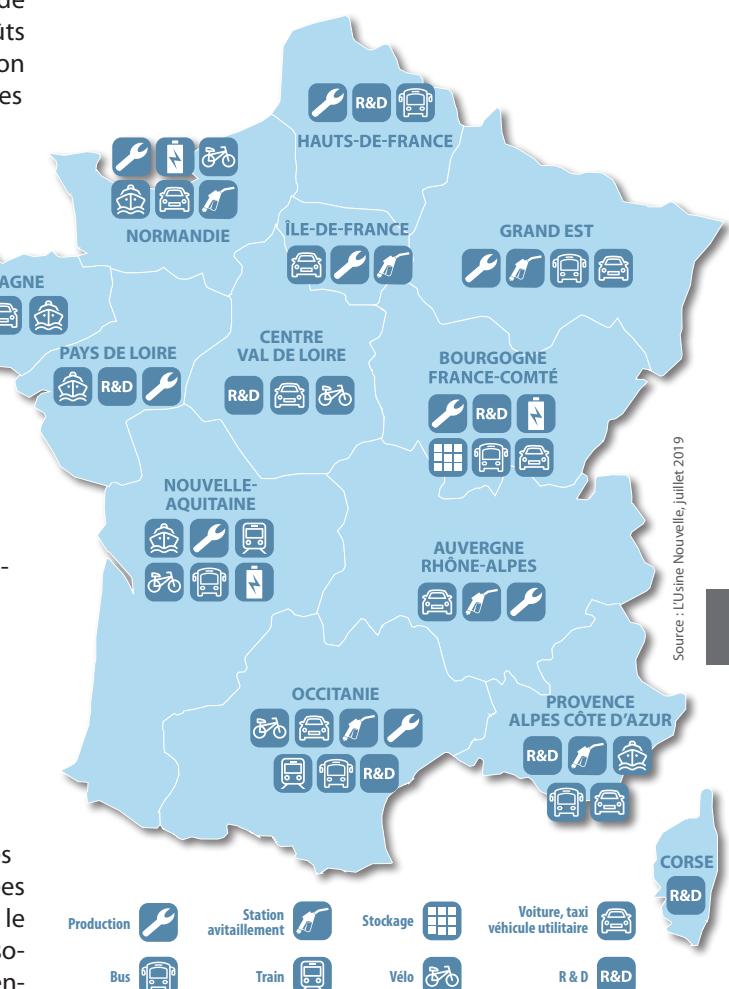
Les collectivités ont un rôle essentiel à jouer dans l'essor des nouveaux usages de l'hydrogène. La mutualisation de la demande dans le cadre de projets de territoire permet de réduire les coûts de stockage, de transport et de distribution pour les utilisateurs. La combinaison des usages historiques et nouveaux de l'hydrogène au sein d'un écosystème local intégré permet d'augmenter les volumes produits et d'améliorer la performance économique globale des projets. L'organisation en « hub », associant plusieurs utilisateurs d'hydrogène, est un élément-clé du développement de l'hydrogène.

Le déploiement de solutions hydrogène à l'échelle d'un territoire suppose la mise en place de partenariats entre collectivités et industriels, permettant d'intégrer des solutions technologiques nouvelles aux cahiers des charges des maîtres d'ouvrage. De nombreux clusters de recherche, participant au développement des technologies bas carbone, organisent des ateliers autour des technologies et projets et contribuent à définir les priorités de R&D tout en participant à l'émergence des projets dans les territoires. La concrétisation industrielle de ces démarches partenariales et innovantes portées par les collectivités pourrait être facilitée dans le cadre de sociétés d'économie mixte (SEM) associant financements privés et publics. Mieux encore, pourrait être mise en place dans le cadre de la Loi de Transition Énergétique la possibilité pour les collectivités publiques d'investir en direct dans les sociétés de projet dédiées à la production d'hydrogène bas carbone, sur le modèle de la production d'énergie renouvelable, leur permettant de s'affranchir de la création de SEM.

Enfin, en associant les enjeux climatiques,

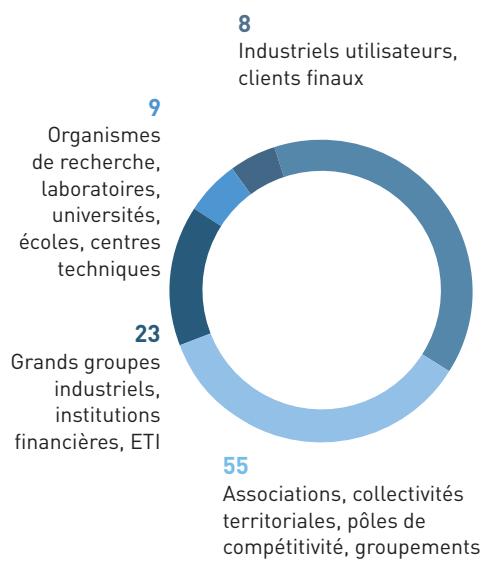
socioéconomiques et industriels au sein de projets de territoire ambitieux, les collectivités améliorent la connaissance des solutions technologiques innovantes auprès du grand public et facilitent leur généralisation, ainsi que leur acceptabilité sociétale.

REFORCER LES CENTRES DE COMPÉTENCE



Positionnement des régions françaises sur la chaîne de valeur hydrogène

Le développement d'un tissu entrepreneurial dédié à l'hydrogène s'est amplifié en France avec les avancées technologiques, celles-ci ayant été



Les membres de l'AFHYPAC, l'Association Française pour l'Hydrogène et les Piles à Combustible (octobre 2019)

Source : AFHYPAC, octobre 2018

Le développement d'une filière hydrogène orientée vers l'export permet de créer et pérenniser des emplois en France. Le secteur de l'hydrogène y emploie aujourd'hui près de 2000 personnes. L'émergence d'une industrie dédiée à l'hydrogène bas carbone et aux piles à combustible représenterait plus de 40 000 emplois créés en 2030 (AFHYPAC, *ibid*), 6 à 7,5 emplois étant en moyenne créés par million d'euros investi par la filière.

Cette évolution permet de pérenniser les bassins d'emploi de certains secteurs industriels (auto-

mobile, chimie, équipement) mais également d'accompagner la création de nouvelles qualifications et compétences, à l'image des nouveaux métiers du renouvelable et des flexibilités réseaux. Cette mutation devra donc s'accompagner de formations dédiées, permettant de maintenir et développer un savoir-faire industriel lié à l'hydrogène dans les territoires.

LES COOPÉRATIONS EN EUROPE

Reflétant la dynamique internationale, les initiatives se structurent en Europe pour accélérer les déploiements. Élément central des coopérations européennes, le partenariat public-privé européen Fuel Cells and Hydrogen (FCH JU) vise l'accélération de l'introduction des piles à combustible et de l'hydrogène sur le marché. Il associe industriels, centres de recherche et la Commission européenne pour mener des activités de recherche, de développement technologique et de démonstration sur les technologies. **Il a soutenu 245 projets depuis 2008 pour un montant total de plus de 900 millions d'euros, portant sur les domaines suivants :**

- **Production d'hydrogène bas carbone :** augmentation de l'efficacité et réduction des coûts de production d'hydrogène, principalement à partir de l'électrolyse de l'eau et des énergies renouvelables.
- **Mobilité :** réduction des coûts des systèmes de pile à combustible pour les applications de transport et logistique.
- **Stockage et réseaux :** démonstration à grande échelle de la capacité de l'hydrogène à exploiter l'énergie produite à partir de sources renouvelables et à favoriser son intégration dans les systèmes énergétiques;
- **Cogénération de chaleur et d'électricité :** augmentation de l'efficacité et de la durée de vie des piles à combustible.
- **Minimisation des matières premières :** réduction des besoins en platine notamment.

Complémentaire du travail du partenariat public-privé FCH JU sur la montée en maturité technologique et la préparation des mises sur le marché, un récent mécanisme européen est dédié

au renforcement des chaînes de valeur stratégiques. Le Forum Stratégique pour les Projets Importants d'Intérêt Européen Commun (PIIEC) accompagne le cadre politique et réglementaire sur les chaînes de valeur jouant un rôle-clé pour l'industrie européenne. Les PIIEC consistent en des investissements de grande ampleur, coordonnés entre États membres pour relever des défis technologiques communs. Ils relèvent d'un régime favorable d'encadrement des aides publiques à la recherche, développement & innovation. Ce régime s'applique aux premiers déploiements industriels, c'est-à-dire au passage de pilotes ou démonstrateurs à la production de masse. L'hydrogène est notamment identifié comme chaîne de valeur stratégique pouvant faire l'objet de projets industriels européens coordonnés. À l'initiative des échanges entre États membres, de premiers consortiums sont formés sur la batterie pour véhicules électriques, la microélectronique et les supercalculateurs.

POUR UNE APPROCHE STRATÉGIQUE DES PARTENARIATS INTERNATIONAUX

L'hydrogène bas carbone fait déjà l'objet de plusieurs coopérations internationales, essentiellement dans un cadre multilatéral. Le « Hydrogen Implementation Agreement » (Accord de mise en œuvre de l'hydrogène) de l'Agence Internationale de l'Énergie a été conclu en 1977 entre vingt-et-une parties contractantes et se revendique comme la première ressource mondiale d'expertise technique en R&D sur l'hydrogène. Le Partenariat International pour l'Hydrogène et les Piles à combustible dans l'Économie (IPHE), fondé en 2003 à l'initiative des États-Unis, porte sur la coopération en matière de recherche et développement, de normes et réglementation, de partage d'information et de sensibilisation.

À la suite des Accords de Paris, de nouvelles structures de coopération intergouvernementale sur l'hydrogène bas carbone ont été créées :

- L'initiative **Mission Innovation**, qui rassemble 24 pays et la Commission européenne, a adopté l'hydrogène comme l'un de ses huit

Challenges faisant l'objet d'une coopération renforcée en matière de recherche & développement. Ses membres représentent 80 % des investissements publics mondiaux en R&D en faveur de l'énergie propre.

• Le forum des ministres de l'Énergie **Clean Energy Ministerial** a mis en place l'Initiative Hydrogène, visant à accélérer les coopérations pour les déploiements en matière industrielle, de transports et d'approvisionnement en énergie.

• À l'initiative du Japon, le **G20** a initié une coopération dédiée à l'hydrogène dans le cadre des Réunions Ministérielles de l'Hydrogène, réunies pour la première fois en octobre 2018. Les ministres de l'Énergie du G20 se sont ainsi engagés à accroître les efforts internationaux pour réaliser le potentiel de l'hydrogène comme source d'énergie propre, fiable et sûre.

• La création du **Hydrogen Council** à l'occasion du sommet de Davos de 2017, autour d'une vision partagée de l'hydrogène bas carbone, acte l'engagement des industriels en faveur d'une économie hydrogène.

• Enfin, accompagnant l'essor des commercialisations, un travail de standardisation est mené à l'échelle internationale pour encadrer les normes de sécurité et de performance des systèmes. Le comité ISO/TC 197 « Technologies Hydrogène » est chargé de la normalisation des systèmes et dispositifs pour la production, le stockage, le transport et l'utilisation d'hydrogène. Il est constitué de membres représentant l'Allemagne, le Canada, la Chine, la Corée du Sud, la France, les États-Unis, le Japon, la Norvège, les Pays-Bas, le Royaume-Uni et la République tchèque.

Ces partenariats permettent d'alimenter un dialogue riche sur le potentiel et les avancées du marché de l'hydrogène. Ils envoient un signal encourageant sur le soutien à son potentiel économique et climatique. Dans le même temps, l'intensification des investissements constitue un enjeu grandissant de compétitivité industrielle, de développement économique et de maîtrise des savoir-faire. Elle appelle une vision industrielle ambitieuse et partagée du marché international, permettant de renforcer le positionnement des entreprises françaises sur les chaînes de valeur de l'hydrogène bas carbone.

COMITÉ DE PILOTAGE

MEMBRES DU GROUPE CLIMAT DES CONSEILLERS DU COMMERCE EXTÉRIEUR DE LA FRANCE



Thierry POUPEAU, président du Groupe Climat du Comité National des Conseillers du Commerce Extérieur de la France, est ingénieur-économiste, expert des technologies et des marchés du secteur énergétique. Après vingt ans d'expérience au sein de grands groupes français de l'ingénierie industrielle et de la recherche, il fonde en 2005 le bureau d'études et conseil stratégique Neutroclimat qu'il dirige actuellement, et qui accompagne les entreprises et les acteurs publics dans le domaine de la transition climatique en France et à l'international.



Nicolas DELAPORTE est président de la section Berlin et Nouveaux Bundesländer du Comité National des Conseillers du Commerce Extérieur de la France et directeur général de GRTgaz Deutschland GmbH. Il a plus de trente ans d'expérience au sein de grands groupes dans les secteurs de l'énergie et de l'industrie en Allemagne et en France, et notamment dans les domaines du gaz et des services énergétiques.



Alain GÉRARD, vice-président du comité Île-de-France des Conseillers du Commerce Extérieur de la France, il est en charge des relations avec la CCI Paris – Île-de-France et des pôles de compétitivité franciliens, président d'honneur du comité Yvelines et membre du Groupe d'Expertise Économie Maritime des CCE. Il a plus de quarante ans d'expérience à l'international passés au sein du Groupe Thales en Asie-Pacifique, en Europe et en Amérique latine dans les secteurs de l'aéronautique, des télécommunications, de l'électronique et de la défense.



Franck LE BARON, conseiller du Commerce Extérieur depuis 2008, est Senior vice-président au sein de la « Hydrogen Business Unit » d'Engie, dédiée à l'hydrogène renouvelable et à vocation mondiale. Il évolue depuis près de 30 ans dans le Groupe GDF SUEZ, devenu Engie, entre la conduite de projets d'envergure et le développement d'activités dans les domaines de l'énergie et de l'environnement, avec de nombreux postes à l'étranger (Moyen-Orient, Afrique du Nord, Asie centrale...).



André POIRSON, conseiller du Commerce Extérieur, est vice-président en charge du développement international chez Ariane Strategy Consulting et vice-président Europe et Moyen-Orient chez Greyscan PTY Ltd. Il a plus de vingt ans d'expérience dans la direction de projets complexes impliquant acteurs publics et privés dans les domaines de l'énergie, de l'aéronautique, de la défense, du transport, de l'environnement et des services aux Collectivités Territoriales.



René REBATEL, conseiller du Commerce Extérieur, est directeur général exécutif de la société GEOs4D (« Geosciences for Development », anciennement GOLDER) proposant une expertise internationale de haut niveau dans les domaines des infrastructures, des énergies renouvelables, des mines, de l'industrie et du tourisme sur l'ensemble de la zone Pacifique. Il est référent Intelligence Économique de l'IHEDN dans la région, membre de l'Australian Pacific Islands Business Council et du Cluster Maritime Nouvelle-Calédonie.

MEMBRES DES ENTREPRISES CONSULTÉES



Frédéric DEJEAN est directeur Industrie chez Hynamics, filiale du Groupe EDF dédiée à l'hydrogène pour l'industrie et la mobilité, et développe des projets d'hydrogène bas carbone en France et à l'international. Il a auparavant assuré plusieurs fonctions de direction technique, de conduite de grands projets, de direction des opérations et de développement dans les domaines des services énergétiques et des solutions d'efficacité énergétique.



Sébastien MEUNIER est directeur du Développement chez ABB France et exerce depuis 25 ans sur le marché de la convergence numérique de l'énergie et des services dans les infrastructures techniques. Contributeur au sein de la filière électro-numérique au GIMELEC, il est en charge des relations institutionnelles des secteurs de l'industrie, de la mobilité durable, du bâtiment et des infrastructures énergétiques.



Annick NOBLE est Senior Manager H2 Direction Carbon Neutrality Businesses au sein du Groupe Total. Elle a auparavant assuré plusieurs fonctions de direction commerciale et marketing dans les domaines du gaz naturel et dans la distribution et fourniture d'énergie sur les marchés des particuliers, des collectivités locales, des entreprises, et des grands comptes industriels.



Geneviève SAMSON est directrice marketing et affaires publiques pour l'activité mondiale Hydrogène Énergie d'Air Liquide. Elle a plus de vingt ans d'expérience de direction stratégique et opérationnelle, de développement d'activité et de conduite de projets dans le domaine des gaz industriels au sein du Groupe, en France mais également en Allemagne, et a conduit plusieurs programmes de production à l'international.



Paul SERRAT est analyste stratégie senior au sein de la « Hydrogen Business Unit » d'Engie, où il fournit recommandations et analyses sur l'évolution des marchés de l'hydrogène. En tant que spécialiste en économie de l'énergie, il a auparavant mené au sein d'Engie diverses études prospectives, étant notamment responsable des scénarios internes de demande énergétique européenne et mondiale.

BIBLIOGRAPHIE

Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (ADEME) ; « *La recherche au service de la transition énergétique: Hydrogène et Piles à Combustibles, retour sur 6 ans de soutien à 22 projets de recherche et d'innovation* » mars 2018.

Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (ADEME), « *Étude sur l'hydrogène et la méthanation comme procédé de valorisation de l'électricité excédentaire* », septembre 2014

Agence Internationale de l'Énergie (AIE), « *Hydrogen and Fuel Cells Technology Roadmap* », juin 2015

Agence Internationale de l'Énergie (AIE) – International Renewable Energy Agency (IRENA), « *Perspectives for the Energy Transition: Investment Needs for a Low-Carbon Energy System* », mars 2017

Agence Internationale de l'Énergie (AIE), « *Global Trends and Outlook for Hydrogen* », décembre 2017

Agence Internationale de l'Énergie (AIE), « *The Future of Hydrogen, Seizing Today's Opportunities* », juin 2019

Association Française pour l'Hydrogène et les Piles à Combustible (AFHYPAC), « *Hydrogène: agissons aujourd'hui pour la mobilité de demain* », juillet 2017

Association Française pour l'Hydrogène et les Piles à Combustible (AFHYPAC), « *Développons l'hydrogène pour l'économie française* », 2018

Australian Renewable Energy Agency (ARENA), « *Opportunities for Australia from hydrogen exports* », août 2018

Association Technique Énergie Environnement (ATEE), « *Étude PEPS4 sur le potentiel national du stockage d'électricité et du Power-To-Gas* », juillet 2018

Bulletin du Droit de l'Environnement Industriel (BDEI), « *L'hydrogène, c'est aujourd'hui* », décembre 2015

Bloomberg New Energy Finance (BNEF), « *Hydrogen: The Economics of Production from Renewables* », août 2019

CertifHy, « *Overview of the market segmentation for hydrogen across potential customer groups, based on key application areas* », juin 2015

Commissariat Général au Développement Durable (CGDD), « *Les Chiffres-Clés du Climat, Édition 2019* », novembre 2018

Conseil Général de l'Environnement et du Développement Durable, Conseil Général de l'Économie, de l'Industrie, de l'Énergie et des Technologies, « *Filière hydrogène-énergie* », septembre 2015

Commission européenne, Joint Research Centre (JRC), « *Hydrogen use in EU decarbonisation scenarios* », avril 2019

Commission européenne, Joint Research Centre (JRC), « *Global deployment of large capacity stationary fuel cells-Drivers of, and barriers to, stationary fuel cell deployment* », septembre 2019

DNV GL, « *Hydrogen in the Electricity Value Chain - Group Technology & Research Position Paper* », mars 2019

E4TECH, « *Fuel Cell Industry Review 2018* », décembre 2018

Economic Research Institute for ASEAN and East Asia (ERIA), « *Demand and Supply Potential of Hydrogen Energy in East Asia* », mai 2018

Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking (FCH JU), « *Trends in investments, jobs and turnover in the Fuel Cells and Hydrogen sector* », février 2013

Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking (FCH JU), « *Study on Early Business Cases for Hydrogen in Energy Storage and More Broadly Power to Hydrogen Applications* », August 2017

Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking (FCH JU), « *Fuel Cells and Hydrogen for Green Energy in European Cities and Regions* », septembre 2018

Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking (FCH JU), « *Hydrogen Roadmap Europe, A Sustainable Pathway for the European Energy Transition* », janvier 2019

France Stratégie, « *Y a-t-il une place pour l'hydrogène dans la transition énergétique ?* », août 2014

Future Fuels Cooperative Research Centre (CRC), « *Advancing Hydrogen: Learning from 19 plans to advance hydrogen from across the globe* », juillet 2019

Hydrogen Council, « *Hydrogen, Scaling-up - A Sustainable Pathway for the Global Energy Transition* », novembre 2017

Institute For Climate Economics -I4CE « *Les comptes mondiaux du carbone en 2019* » mai 2019.

Institut Français des Relations Internationales (IFRI), « *Japan's Hydrogen Strategy and Its Economic and Geopolitical Implications* », octobre 2018

Institut Français des Relations Internationales (IFRI), « *La dimension stratégique de la transition énergétique. Défis et réponses pour la France, l'Allemagne et l'Union européenne* », avril 2019

IHS Markit, « *Hydrogen: The Missing Piece of the Zero-Carbon Puzzle* », juillet 2018

International Association of Oil & Gas Producers (IOGP), « *The Potential for CCS and CCU in Europe* », mai 2019

International Renewable Energy Agency (IRENA), « *Global Energy Transformation: A Roadmap to 2050* », avril 2018

International Renewable Energy Agency (IRENA), « *Hydrogen from Renewable Power: Technology Outlook for the Energy Transition* », septembre 2018

International Renewable Energy Agency (IRENA), « *Hydrogen: A Renewable Energy Perspective* », septembre 2019

Liu Zhixiang, Kendall Kevin et Yan Xieqiang, « *China Progress on Renewable Energy Vehicles: Fuel Cells, Hydrogen and Battery Hybrid Vehicles* », Énergies, décembre 2018

Ministère de la Transition Écologique et Solidaire, « *Plan de Déploiement de l'Hydrogène pour la Transition Énergétique* », juin 2018

Ministère de la Transition Écologique et Solidaire, Commissariat Général au Développement Durable « *Chiffres clés du Climat* » Édition 2019

New Zealand Government, « *Green Paper: A Vision for Hydrogen in New Zealand* », septembre 2019

National Renewable Energy Laboratory (NREL), « *Hydrogen Station Compression, Storage, and Dispensing: Technical Status and Costs* », mai 2014

Organisation de Coopération et de Développement Économiques (OCDE) - Agence Internationale de l'Énergie (AIE), « *Energy Technology Perspectives 2017* », juin 2017

Office Parlementaire d'Évaluation des Choix Scientifiques et Technologiques, « *L'Hydrogène, Vecteur de la Transition Énergétique ?* », décembre 2013

Quarton Christopher, Tlili Olfa, Welder Lara, Mansilla Christine, Blanco Herib, Heinrichs Heidi, Leaver Jonathan, Samsatli Nouri, Lucchese Paul, Robiniusc Martin et Samsatli Sheila, « *The curious case of the conflicting roles of hydrogen in global energy scenarios* », Sustainable Energy & Fuels, octobre 2019

Surla Karine, « *Hydrogène* », Techniques de l'ingénieur - Fabrication des grands produits industriels en chimie et pétrochimie, mai 2019

Éditeur

Comité National des Conseillers du Commerce Extérieur de la France
22 avenue Franklin Delano Roosevelt 75008 Paris

Coordination de l'ouvrage : Manon Esperandieu

ISBN : 978-2-9548638-9-4 – **EAN :** 9782954863894

1^{re} édition : décembre 2019

Dépôt légal : décembre 2019

Crédits photographiques

Photos de couverture : ©fotomek - stock.adobe.com ©malp - stock.adobe.com

4^e de couverture : Energy Explorer source Wikipedia auteur nc sous licence Creative

Commons CC BY SA 4.0.

Photos des auteurs : DR

Mise en pages

Structure Visuelle : Véronique Loisier & Aurélie San Emeterio

Téléphone : +33 (0)6 71 61 37 34 - Mail : structurevisuelle@orange.fr

