
LIVRE BLANC

Ecrire le futur de l'hydrogène bas carbone

Enjeux et solutions





Résumé

L'hydrogène, vecteur d'innovation bas carbone

Facteur de flexibilité des systèmes énergétiques, l'hydrogène contribue à la décarbonation des consommations et des usages de l'énergie tout en créant des liens entre les secteurs du gaz et de l'électricité. Le futur de l'hydrogène bas carbone s'écrit avec un renforcement des capacités d'intégration et d'électrification des systèmes.

L'hydrogène (H₂) est un vecteur énergétique léger et compact, avec une densité énergétique massique particulièrement élevée : il contient de l'énergie sous forme chimique, qui peut être transportée et stockée. Produite à partir de réactions chimiques, l'hydrogène peut être utilisé comme matière première dans des procédés industriels ou libérer de l'énergie à travers une pile à combustible pour des applications mobiles ou stationnaires.

Le vecteur hydrogène permet donc aux industries de transformation et aux systèmes énergétiques de gagner en flexibilité, et peut contribuer à la réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES) lorsqu'il est associé à des procédés de production d'hydrogène à faible teneur en carbone. L'hydrogène a cependant une

très faible masse volumique : il doit être comprimé à haute pression ou liquéfié à des températures cryogéniques pour être stocké et transporté.

L'hydrogène est principalement utilisé comme matière première dans l'industrie chimique et dans l'industrie du raffinage, et le marché de l'hydrogène dans les secteurs de la mobilité et de l'énergie est en forte croissance. Les progrès rapides des technologies de l'hydrogène et de la pile à combustible entraînent une accélération du déploiement des équipements et des systèmes, avec des unités de production atteignant une échelle de plusieurs mégawatts et une augmentation significative de l'utilisation de l'hydrogène dans l'industrie, la mobilité et les réseaux énergétiques.

Renforcer la chaîne de valeur hydrogène

Le renforcement de la chaîne de valeur de l'hydrogène repose sur le développement de systèmes complets s'appuyant sur une industrie compétitive. Pour les promoteurs et développeurs de projets, cela implique de pouvoir agir sur l'ensemble des facteurs de performance industrielle :

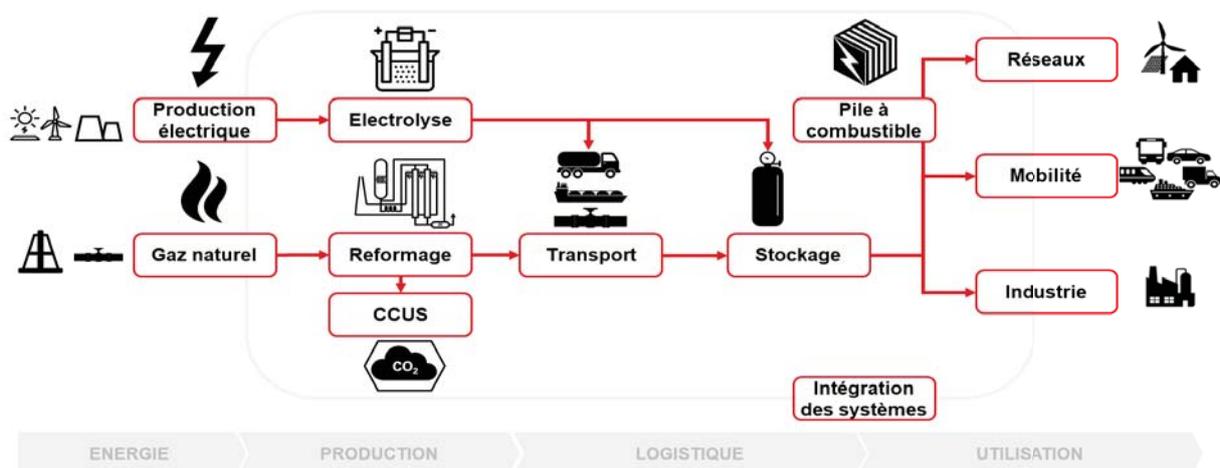
- **Technologie** : identifier les solutions technologiques pertinentes pour chaque application et chaque usage ;
- **Capacités d'intégration** : des systèmes conçus et installés de façon à maximiser le potentiel des solutions hydrogène ;
- **Capacités financières** : permettre le passage à l'échelle des déploiements, pour gagner en capacité de production d'hydrogène et de fabrication d'équipements ;
- **Gestion des risques** : maîtriser les risques technologiques, financiers et de projet, propres au déploiement de toute technologie émergente ;
- **Agrégation d'un véritable écosystème de l'hydrogène**, réunissant les compétences des grands groupes, des entreprises de taille intermédiaire, des start-ups, des organismes de recherche, les pouvoirs publics et les investisseurs.

Ces facteurs de performance conduisent à des réductions de coût de mise en œuvre et exploitation, résultant d'économies d'échelle par la production en masse et l'innovation, et par l'optimisation des systèmes, avec une amélioration continue des installations et de leur opération. Ils doivent pouvoir intervenir dans un environnement favorable à l'industrie de l'hydrogène, avec des **politiques publiques de soutien** au développement de l'hydrogène, établissant des feuilles de route spécifiques pour l'industrialisation et le passage à l'échelle, un cadre réglementaire favorable, ainsi que des programmes de soutien à la recherche et développement.

Décarboner et flexibiliser les systèmes énergétiques

L'hydrogène représente une opportunité majeure en matière d'innovation industrielle et d'atténuation du changement climatique car il apporte **une capacité de pilotage des énergies renouvelables intermittentes**, un fort potentiel de réduction des émissions de gaz à effet de serre et de nouveaux modèles économiques pour les procédés industriels, l'énergie et la mobilité :

- L'industrie, les pouvoirs publics, les entreprises et les citoyens doivent **agir rapidement** pour développer et structurer une chaîne de valeur compétitive pour l'hydrogène, soutenue par des écosystèmes complets permettant l'adoption et le passage à l'échelle de solutions innovantes ;
- **Toutes les technologies de production d'hydrogène** sont nécessaires, y compris celles associant hydrocarbures et séquestration carbone, et qui constituent des technologies de transition importantes permettant la production d'hydrogène à grande échelle. L'hydrogène « vert » issu d'énergie renouvelable par électrolyse de l'eau et dans le cadre d'un mix énergétique bas carbone doit être fortement encouragé ;
- L'hydrogène peut jouer **un rôle essentiel et multi-sectoriel pour la décarbonation : foisonnement énergétique** pour une intégration accrue des énergies renouvelables et **réduction de la dépendance à l'égard des combustibles fossiles**, plus particulièrement en ce qui concerne la mobilité.



Vue d'ensemble de la chaîne de valeur hydrogène

Par conséquent, à mesure que les technologies de l'hydrogène atteignent leur pleine échelle industrielle, des **approches systémiques** de la réduction des coûts et des émissions de GES sont nécessaires, de l'approvisionnement en énergie à l'utilisation de l'hydrogène afin de :

- Veiller à ce que l'hydrogène **tire pleinement profit de son potentiel énergétique** en industrialisant sa production ;
- Exploiter **toutes les ressources énergétiques bas carbone disponibles localement** en jouant sur leurs complémentarités, y compris avec des solutions multi-énergies ;
- Concevoir et mettre en œuvre des **solutions d'électrification intégrées** pour l'approvisionnement en hydrogène, qui répondent aux besoins opérationnels des utilisateurs finaux ;
- Développer des **stratégies de réduction des coûts** basées sur la flexibilité, le digital, et qui englobent l'ensemble du cycle de vie de la chaîne de valeur hydrogène ;
- Maximiser l'**efficacité des processus de conversion d'énergie** et tenir compte des interdépendances dans la production, la gestion et l'utilisation de l'hydrogène ;
- Proposer des **systèmes complets de sûreté et de sécurité** ;
- Atténuer les impacts liés à la production d'hydrogène sur le **système énergétique au sens large**, y compris les réseaux électriques.

ABB : Votre partenaire pour l'hydrogène en résumé

- ABB est un acteur des énergies propres et décarbonées, de la production à l'acheminement et jusqu'à leur utilisation. A ce titre, nous sommes fortement engagés autour des enjeux énergie-climat et de la contribution de l'hydrogène comme élément d'un mix énergétique décarboné
- ABB s'appuie sur sa vaste expérience dans les secteurs de l'électricité, des infrastructures publiques, des énergies conventionnelles et renouvelables, de l'eau, du pétrole et du gaz, de la chimie et de la pétrochimie, des transports, des métaux et des industries de transformation, pour relever les principaux défis des clients et agir comme un partenaire de confiance dans le déploiement des technologies et des solutions de l'hydrogène ;
- ABB propose des approches globales de la création de valeur pour les systèmes et les équipements de la filière hydrogène ;
- ABB dispose d'un portefeuille complet de produits, systèmes, services et solutions digitales qui comprennent la conception, l'ingénierie et le conseil pour les nouveaux projets, les extensions et les mises à niveau, ainsi que les services pour les opérations de maintenance.
- ABB possède une organisation industrielle et des compétences en gestion de projets complexes, reconnus dans le monde entier, adaptés aux secteurs et environnements les plus contraignants. Ce savoir-faire est la garantie d'une bonne maîtrise des risques, des délais et une optimisation du coût total de possession (TCO) ;
- ABB fournit des solutions complètes d'électrification et d'automatisation, des équipements de connexion aux réseaux, des logiciels et des services, pour soutenir et optimiser les opérations de façon fiable et sûre, en collaboration étroite avec les équipes de ses clients ;
- ABB a la capacité d'intégrer des équipements et des solutions pour apporter une gestion complète (MAC/MEC) y compris dans les domaines de la sécurité, des télécoms et de la robotique ;
- ABB est déjà positionné dans les différents secteurs applicatifs de l'hydrogène (Industries, flexibilité des réseaux, bâtiments, mobilités) en maîtrisant les spécificités de chacun des segments cibles ;
- Le positionnement international d'ABB et sa structure d'acteur global sont une garantie pour faciliter la production, la logistique et l'utilisation de l'hydrogène partout dans le monde. Son expertise avancée de l'hydrogène, comprenant des procédés maîtrisés et des innovations tournées vers l'avenir, est un gage de performance et de compétitivité de vos projets ;
- ABB possède une solide expérience des marchés réglementés et des mécanismes d'incitation à l'adoption de nouvelles technologies à faible émissions dans l'industrie, la mobilité et les systèmes énergétiques ;
- ABB est acteur de la dynamique de développement de la filière hydrogène, par son implication dans les différentes structures institutionnelles et professionnelles concernées.

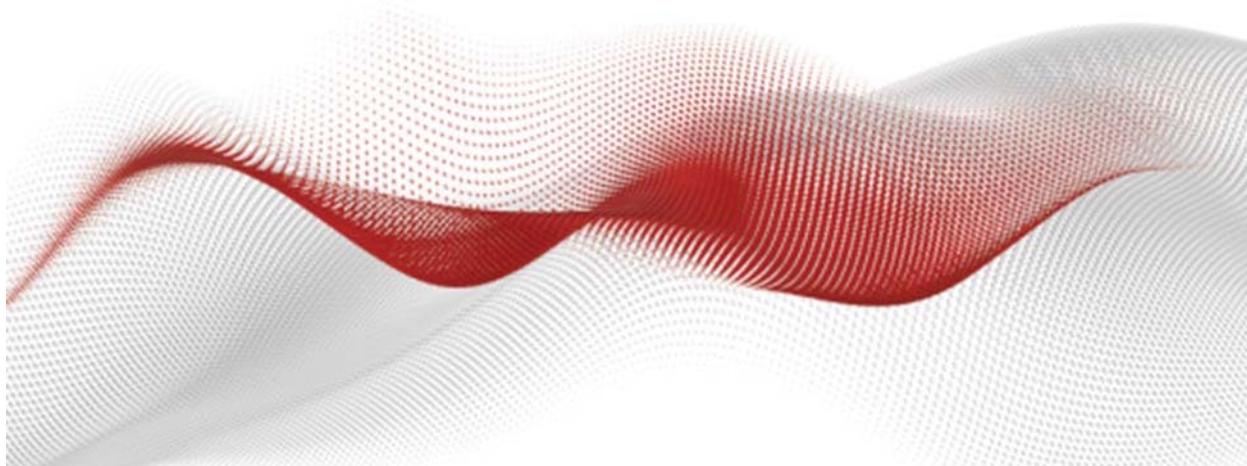
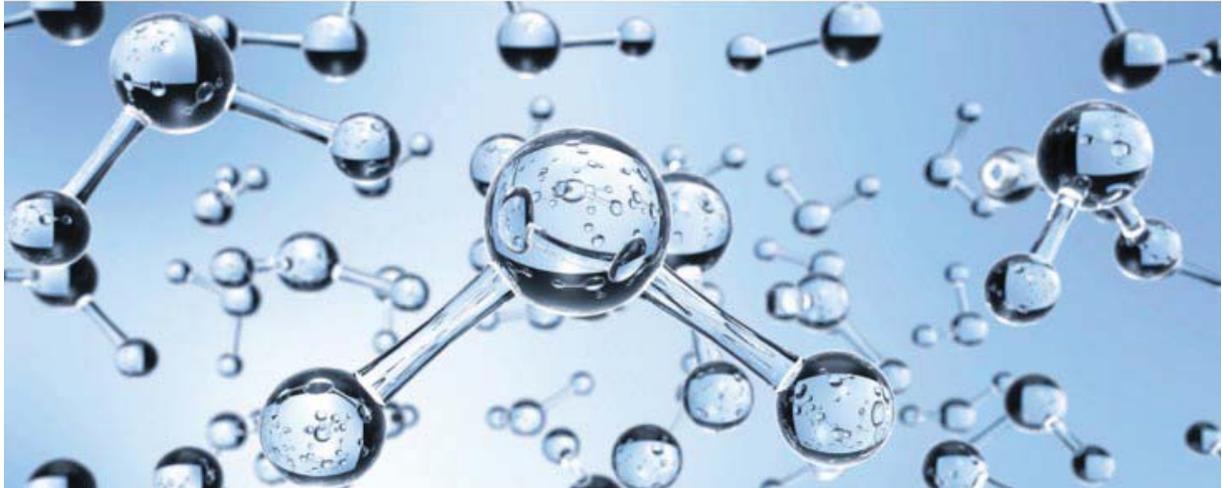


Table des matières

Résumé	3
Table des matières	6
Introduction	7
L'hydrogène : innovation, compétitivité et climat	9
Contribution d'ABB à la chaîne de valeur de l'hydrogène	14
Cas d'usage	18
Electrifier la production d'hydrogène	19
Intégrer l'hydrogène aux réseaux électriques	27
Développer la mobilité zéro émission	31
Installer et opérer des stations de recharge hydrogène	36
L'hydrogène au service de la chimie et des industries de transformation	39
Assurer une logistique complète de l'hydrogène	43
Développer le Power-to-Gaz	47
A propos d'ABB	50
Glossaire	53
Annexes	54
Bibliographie	57

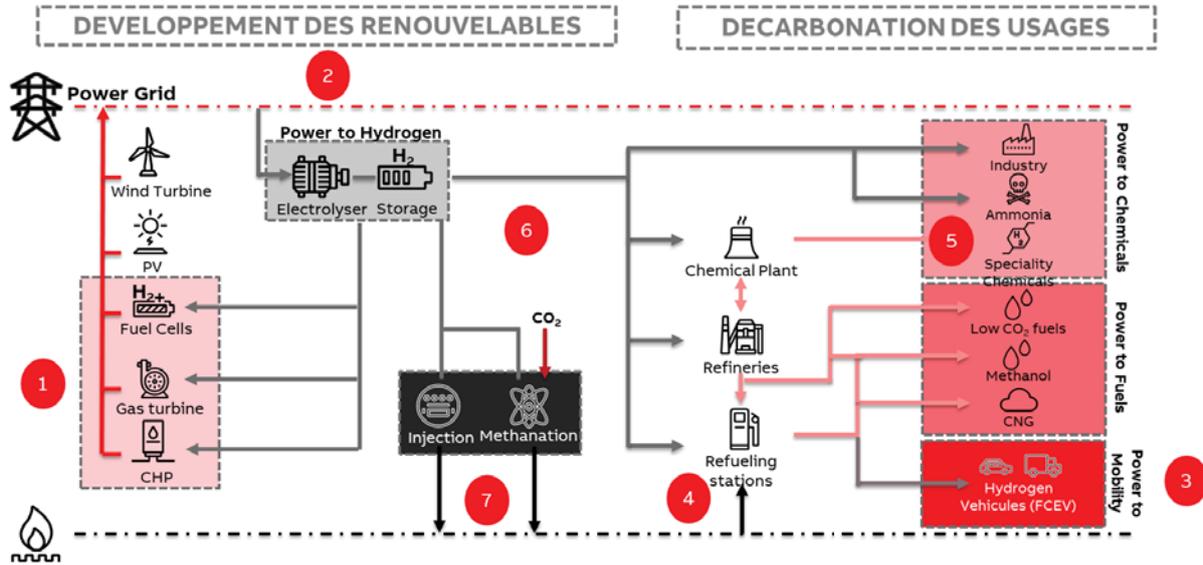


Introduction

La décarbonation de l'activité économique est un important levier de développement industriel et d'innovation. Dans un contexte de croissance des énergies renouvelables, l'hydrogène constitue à la fois une chaîne de valeur stratégique et un vecteur essentiel pour la réduction des émissions de gaz à effet de serre.

Renforcer le rôle des technologies hydrogène et de la pile à combustible au service d'un mix énergétique décarboné performant constitue un défi en termes de compétitivité, de sécurité et d'acceptabilité des solutions, équipements et services. Pour l'ensemble des acteurs de l'écosystème hydrogène, cela repose sur un renforcement des capacités d'intégration et d'électrification permettant le développement d'une chaîne de valeur hydrogène performante et efficiente.

L'hydrogène est un facteur d'accélération de la transition énergétique en facilitant l'émergence de systèmes énergétiques reposant plus largement sur les énergies renouvelables et la décarbonation des usages finaux de l'énergie. En tant que vecteur énergétique stockable et transportable, l'hydrogène permet une intégration à grande échelle des énergies renouvelables dans le mix énergétique, une distribution de l'énergie dans de nombreux secteurs et géographies, et la mise en place de systèmes d'appoints pour renforcer la résilience des systèmes énergétiques. L'hydrogène permet également la décarbonation des usages finaux de l'énergie, dans la mobilité, l'industrie et les bâtiments, et peut constituer un vecteur supplémentaire d'intégration des énergies renouvelables.



Cas d'usage : Les différentes applications de l'hydrogène

- 1 Electrifier la production d'Hydrogène
- 2 Intégrer l'Hydrogène au réseau électrique
- 3 Développer les véhicules à piles à combustible
- 4 Installer et opérer des stations de recharge
- 5 Hydrogène au service de la chimie et des industries de transformation
- 6 Assurer la logistique complète de l'Hydrogène
- 7 Développer le Power to Gas



L'hydrogène : innovation, compétitivité et climat

Vers un cadre institutionnel dédié

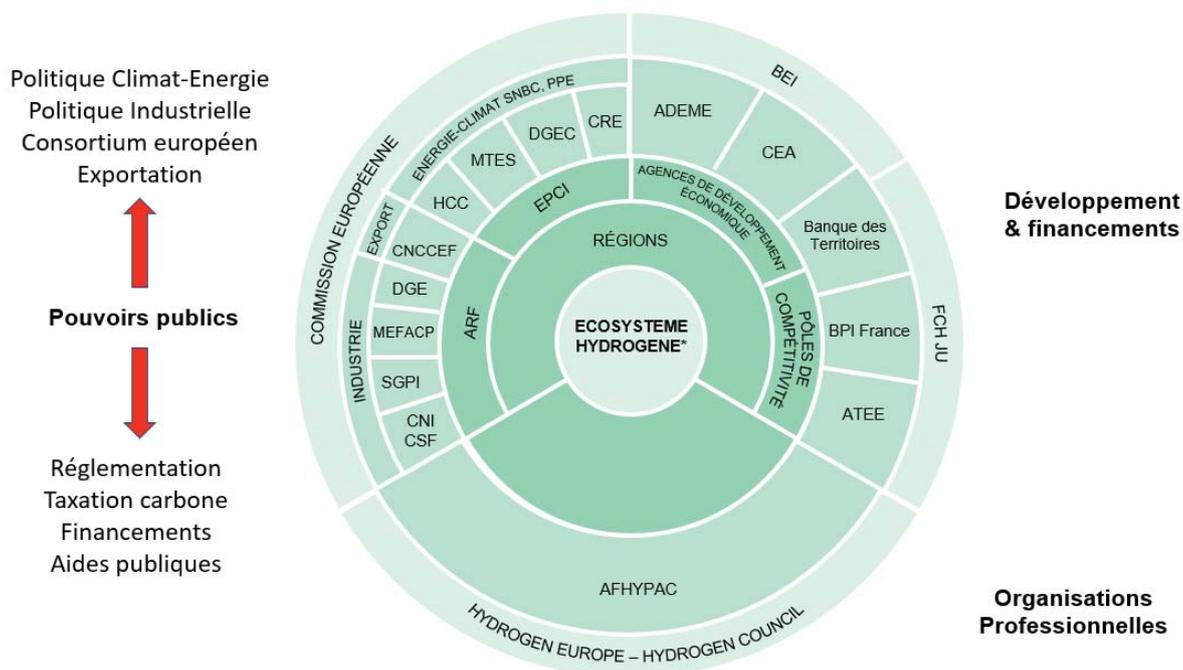
L'évolution du mix énergétique vers une part accrue de renouvelables impacte à la fois les réseaux et les usages. L'hydrogène est un élément central dans la chaîne de valeur de cette transformation.

Le secteur de l'énergie est marqué par deux tendances structurantes : la **globalisation des enjeux de transport et de distribution de l'électricité**, appelant le développement d'interconnexions à l'échelle européenne, ainsi que le **développement de micro-grids**, c'est-à-dire d'ensembles de production et points de consommation décentralisés pouvant avoir un fonctionnement autonome du réseau interconnecté. L'hydrogène comme facteur de flexibilité et de décarbonation a un rôle central à jouer pour l'évolution vers une économie bas carbone, la gestion de flux énergétiques intégrant une part croissante de sources de production non pilotables (intermittentes) d'électricité comme le solaire ou l'éolien et le développement des moyens de stockage d'énergie locaux.

La filière hydrogène est donc au cœur des enjeux de financement des solutions bas carbone, de régulation du marché, de développement de nouveaux modèles économiques et de massification des solutions innovantes. ABB propose une approche parfaitement en phase avec l'évolution des priorités réglementaires et politiques :

- **Compréhension approfondie des processus politiques, avec une équipe chargée des affaires réglementaires et institutionnelles aux niveaux nationaux et mondial et comprenant un bureau ABB UE à Bruxelles ;**
- **Une expérience très importante du cadre réglementaire des marchés de l'industrie ;**
- **Capacité à s'insérer dans les mécanismes publics d'incitations et de financement ;**
- **Force de proposition dans la rédaction de recommandations pour favoriser l'émergence de la filière tout en maîtrisant les risques.**

ABB est un acteur de la dynamique de développement de la filière hydrogène pour lui permettre de réaliser son potentiel économique dans les territoires. ABB s'implique dans les différentes structures institutionnelles et professionnelles concernées. Notamment, à chaque étape de la chaîne de valeur hydrogène grâce à ses nombreuses technologies, ABB apporte un savoir-faire et une expertise à l'ensemble de la filière dans la mise en place d'un cadre institutionnel et réglementaire dédié.



* Écosystème hydrogène France: <https://www.afhypac.org/association/membres/>

L'environnement institutionnel de l'hydrogène en France

Acronymes

ADEME	Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie
AFHYPAC	Association Française pour l'Hydrogène et les Piles à Combustible
ARF	Association Régions de France
BEI	Banque européenne d'investissement
BPI	Banque publique d'investissement
CEA	Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives
CNCCECF	Conseillers du commerce extérieur de la France
CNI	Conseil national de l'industrie
CRE	Commission de régulation de l'énergie
CSF	Comités stratégiques de filière
DGE	Direction générale des Entreprises
DGEC	Direction générale de l'Énergie et du Climat
EPCI	Établissement public de coopération intercommunale
FCH-JU	Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking
HCC	Haut Conseil pour le climat
MEFACP	Ministère de l'Économie, des Finances, de l'Action et des Comptes publics
MTES	Ministère de la Transition écologique et solidaire
PPE	Programmation pluriannuelle de l'énergie
SGPI	Secrétariat général pour l'investissement
SNBC	Stratégie nationale bas carbone

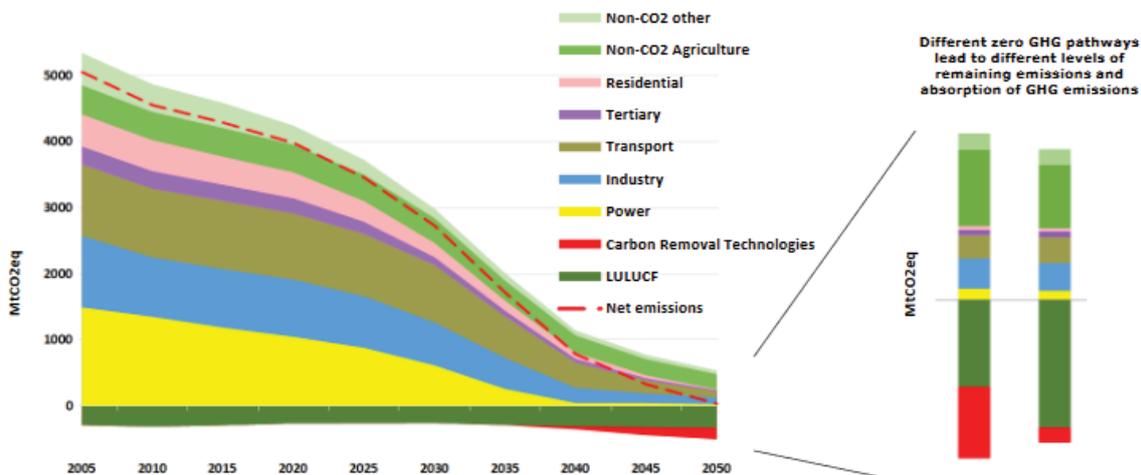
Les contributions d'ABB à la filière hydrogène en France :

- ABB est membre de l'Association Française pour l'Hydrogène et les Piles à Combustible (AFHYPAC) ;
- ABB est membre actif du Comité Stratégique de Filière « Industries des nouveaux systèmes énergétiques » et sa commission hydrogène ;
- ABB est administrateur du pôle de compétitivité S2E2 ainsi que de l'association Think SmartGrids ;
- ABB est membre du Comité scientifique, économique, environnemental et sociétal de l'association EDEN ;
- ABB est contributeur du rapport des Conseillers du Commerce Extérieur de la France « Hydrogène l'heure est venue ».
- ABB est membre de plusieurs organisations professionnelles en lien avec les usages de l'hydrogène (Mobilités ferroviaires, mobilités terrestres, réseaux d'énergie, industries ..)

Cadre réglementaire européen

Le cadre réglementaire européen s'efforce de créer un environnement favorable à l'intégration de l'hydrogène à faible teneur en carbone dans le système énergétique, dans les transports et dans l'industrie, en vue d'atteindre les objectifs de la politique climatique et énergétique, à savoir une réduction d'au moins 40 % des émissions de GES, une part de 32 % d'énergies renouvelables et une amélioration de 32,5 % de l'efficacité énergétique en 2030, ainsi que l'objectif d'atteindre la neutralité carbone d'ici 2050.

En décembre 2019, la Commission européenne a présenté le « **Pacte Vert** » européen qui établit une feuille de route pour parvenir à l'absence d'émissions nettes de GES d'ici 2050, propose de rendre cet engagement juridiquement contraignant et de faciliter les investissements dans les technologies propres. Il reconnaît que l'hydrogène est une technologie de pointe pour les secteurs industriels-clés, qu'il offre des possibilités d'infrastructures transfrontalières intelligentes et appelle à des partenariats entre l'industrie et les États membres pour un transport propre de l'hydrogène.



Les technologies de l'hydrogène et de la pile à combustible ont un rôle multi-sectoriel à jouer dans la décarbonisation de la demande énergétique finale, car elles facilitent l'intégration des énergies renouvelables dans le bouquet énergétique et peuvent se substituer aux combustibles fossiles, notamment en contribuant à une plus grande électrification du secteur des transports via les véhicules à pile à combustible. L'hydrogène complète les autres solutions à faible teneur en carbone disponibles, notamment les technologies basées sur l'électricité, à l'appui d'objectifs politiques plus larges :

- Décarbonisation de l'industrie, de la mobilité et des systèmes énergétiques ;
- Poursuite de l'intégration des sources d'énergie renouvelables ;
- Amélioration de la qualité de l'air ;
- Soutien à la compétitivité industrielle et aux capacités d'innovation ;
- Augmentation de la résilience des réseaux électriques.

Aux niveaux national et européen, le cadre réglementaire pour le développement de l'hydrogène englobe une combinaison d'objectifs politiques, de systèmes de certification, de réglementation de l'accès au réseau et de régimes de soutien tels que l'aide à la production et les obligations en matière d'énergies renouvelables (voir Annexe 1).

Les technologies et systèmes à hydrogène ont été identifiés comme **chaîne de valeur stratégique** pour la politique industrielle de l'Union européenne, ouvrant la voie à la mise en place de **Projets importants d'intérêt européen commun (PIIEC)** consacrés à l'hydrogène. Il s'agit de projets innovants ou à forte valeur ajoutée impliquant

plusieurs États membres de l'UE et à fort contenu de de R&D, y compris pour un premier développement industriel à grande échelle. Les PIIEC peuvent bénéficier d'un soutien public plus important que celui normalement autorisé par les règles européennes en matière d'aides d'État.

En mars 2020, à l'occasion de la présentation de sa nouvelle stratégie industrielle, la Commission européenne a annoncé le lancement de l'**Alliance pour l'Hydrogène Propre** (*Clean Hydrogen Alliance*) pour identifier les besoins technologiques, les opportunités d'investissement et les obstacles et catalyseurs réglementaires de la filière.

L'essor des territoires hydrogène

Initiatives nationales en Europe

En **France**, le Plan National Hydrogène vise à développer les trois axes de la filière : industrie, mobilité et énergie. Il s'appuie sur des objectifs de déploiement de véhicules à pile à combustible, le développement des projets « Power-to-Gas » et un objectif de 10% d'hydrogène décarboné dans l'industrie en 2023, puis de 20% à 40% en 2028. La Programmation Pluriannuelle de l'Énergie (PPE) envisage un soutien public à la filière avoisinant les 50 millions par an, mis en œuvre par le biais d'appels à projets de l'ADEME. L'hydrogène contribue également au Pacte Productif 2025 pour un nouveau modèle français respectueux de l'environnement vers le plein emploi, ainsi qu'à la Stratégie Nationale Bas Carbone (SNBC).

L'**Allemagne** a annoncé vouloir couvrir 20 % de ses besoins énergétiques avec de l'hydrogène décarboné d'ici à 2030, et souhaite développer les équipements et solutions nécessaires à l'ensemble de la chaîne de valeur hydrogène, pour le marché domestique et l'export. Le développement des technologies hydrogène y est assuré par des « laboratoires en conditions réelles de transition énergétique » (*Reallabore*), organisés en vingt consortiums avec un financement de 100 millions d'euros par an. Le processus de dialogue « Gaz 2030 » reconnaît également le potentiel de l'hydrogène comme substitut du gaz fossile et la nécessité d'une coopération avec les partenaires hors Union européenne.

Aux **Pays-Bas**, les entreprises et les gouvernements des provinces de Groningen et de Drenthe ont élaboré un plan de 2,8 milliards d'euros pour transformer leur région en une « vallée de l'hydrogène ».

La **Norvège** est un pionnier de la technologie de l'hydrogène et connaît une forte dynamique en faveur d'un déploiement accru de l'hydrogène. Le pays s'est fixé comme objectif de réduire les émissions de gaz à effet de serre de 80 à 95 % en 2050. Son Livre blanc national sur l'énergie vise notamment à promouvoir la production, le stockage et l'utilisation de l'hydrogène. En outre, la Norvège s'est engagée à mettre en place un marché de vente de voitures à zéro émission d'ici 2025 et devrait devenir un marché important pour les véhicules à pile à combustible.

La **Suède** a pour objectif de produire 100 % d'électricité à partir de sources d'énergie renouvelables d'ici 2040 et explore le potentiel de l'hydrogène pour réduire les émissions de dioxyde de carbone en l'utilisant comme combustible, pour l'électricité ou le chauffage.

Régions et autorités locales

Les régions et les autorités locales jouent un rôle central dans l'émergence des écosystèmes de l'hydrogène. Elles peuvent jouer le rôle d'intégrateurs pour regrouper plusieurs applications de l'hydrogène et atteindre une certaine échelle dans une zone géographique donnée, une région, une ville ou un groupement industriel.

Dans ce contexte, le projet « **Hydrogen Valleys** » rassemble plusieurs régions européennes visant à exploiter le potentiel des piles à combustible et des technologies de l'hydrogène. Les principaux objectifs du partenariat sont les suivants :

- Développer la maturité technologique et la commercialisation des applications de l'hydrogène et des piles à combustible ;
- Faciliter l'accès à l'information dans le domaine de l'hydrogène ;
- Faciliter la mise en relation et les co-investissements entre régions européennes ;
- Renforcer la chaîne de valeur des technologies de l'hydrogène et des piles à combustible dans le cadre de coopérations interrégionales
- Contribuer à la décarbonisation de l'économie européenne ;
- Participer activement à l'élaboration de la politique européenne en matière d'hydrogène.

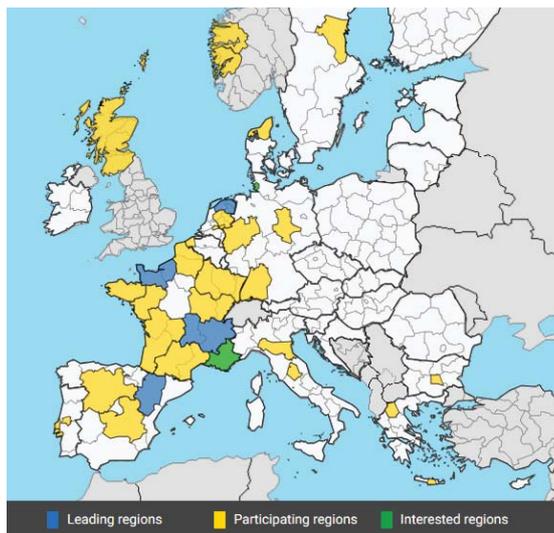


Figure 2 Régions impliquées dans le partenariat Hydrogen Valleys
(Source : Commission européenne, Plate-forme de spécialisation intelligente)

Programmes de soutien

Afin d'atténuer les risques liés au développement, au déploiement et à l'extension des technologies innovantes, plusieurs programmes de financement européens soutiennent un large éventail de technologies et de systèmes hydrogène :

Programme	Domaines prioritaires	Types de projets	Budget
Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking	Systèmes de transport de l'hydrogène, systèmes énergétiques et questions transversales	Activités de recherche collaborative, de développement technologique et de démonstration	1,33 milliards d'euros en 2014-2020
Horizon 2020	Horizon 2020 est le programme-cadre de l'UE pour la R&D&I	Recherche et innovation collaborative à tous les niveaux de maturité technologique	80 milliards d'euros en 2014-2020
Connecting Europe Facility	Interconnexions électriques et gazières, réseaux intelligents transfrontaliers, CCUS Infrastructure d'approvisionnement en carburants alternatifs	Études et travaux pour des projets d'intérêt commun dans le domaine de l'énergie et des infrastructures de transport sur les corridors prioritaires	29 milliards d'euros en 2014-2020
Innovation Fund	Industries énero-intensives, CCUS, énergies renouvelables, stockage	Démonstration de technologies innovantes à faible intensité carbone	10 milliards d'euros en 2020-2030

Tableau 1 Récapitulatif des programmes de soutien de l'UE

A titre d'exemple, ABB participe au projet FLAGSHIPS dans le cadre du partenariat public-privé européen Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking (FCH JU) pour une mobilité maritime et fluviale décarbonée en Europe. Ce projet, structuré autour d'un consortium européen, dont ABB, vis à développer deux navires alimentés et propulsés à l'hydrogène liquide et gazeux, via une pile à combustible.

Ces programmes sont complétés par des programmes de soutien à des niveaux nationaux et régionaux, comme par exemple en France l'AMI lancée par la DGE « Projets innovants d'envergure européenne ou nationale sur la conception, la production et l'usage de systèmes à hydrogène ». L'ADEME soutient les travaux de recherche et d'innovation dans le domaine de l'hydrogène, portant à la fois sur les briques technologiques et sur des démonstrations en conditions réelles. Le Programme d'Investissements d'Avenir (PIA) accompagne également la structuration de la filière industrielle, en cofinçant des démonstrateurs d'envergure. Le développement de la filière a été renforcé par le lancement de plusieurs appels à projets et appels à manifestations d'intérêts successifs :

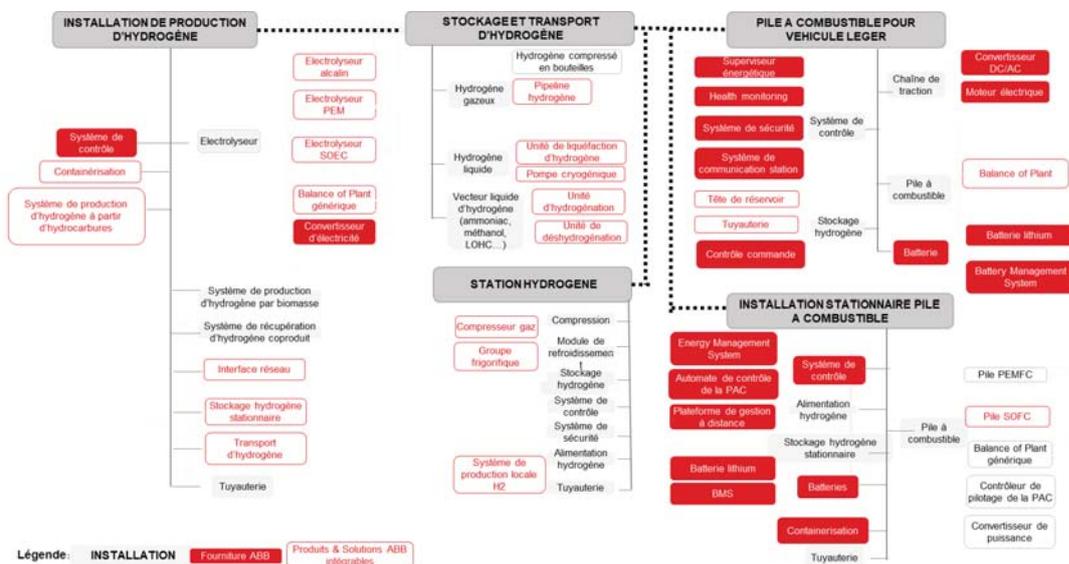
- Territoires Hydrogène (2016)
- Ecosystèmes de Mobilité Hydrogène (2018)
- Production et fourniture d'hydrogène décarboné pour des consommateurs industriels (2019)
- Projets d'envergure sur la conception, la production et l'usage de systèmes à hydrogène (2020)
- Aide à l'émergence de la mobilité hydrogène dans le secteur ferroviaire (2020).



Contribution d'ABB à la chaîne de valeur de l'hydrogène

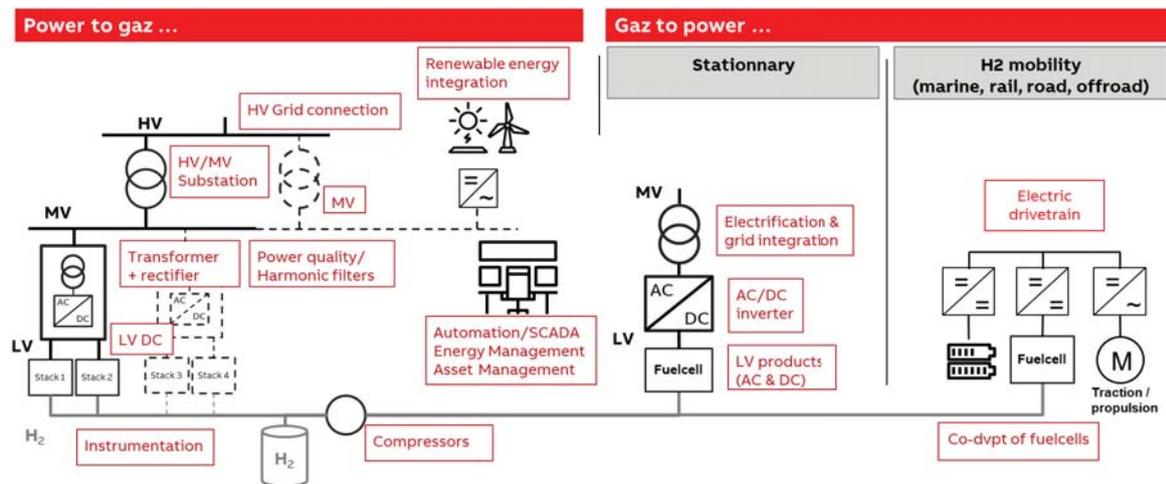
Intégration et électrification au service des technologies et systèmes hydrogène

Les capacités d'intégration et d'électrification sont au cœur du développement des systèmes et technologies de l'hydrogène et de la pile à combustible. ABB propose des solutions, équipements et services permettant le développement d'une chaîne de valeur hydrogène innovante, compétitive, sûre et durable.



Vue d'ensemble de la contribution d'ABB à la chaîne de valeur de l'hydrogène telle que présentée par l'AFHYPC
Adaptée de : AFHYPC « L'Hydrogène en France, une chaîne de valeur industrielle à forte valeur ajoutée (2020)

Le développement de l'hydrogène et de la pile à combustible repose, à chaque étape de la chaîne de valeur, sur un renforcement des technologies et des équipements, mais également sur un renforcement des systèmes hydrogène dans leur ensemble. De la production à la consommation, le couplage entre secteurs énergétiques est un levier important de flexibilité permettant un approvisionnement sécurisé, durable et compétitif en énergie. Il repose sur des capacités d'intégration permettant de combiner les solutions énergétiques et de trouver des synergies entre elles. Les **solutions digitales et les réseaux intelligents** ont donc un rôle essentiel à jouer pour optimiser l'utilisation des énergies renouvelables et contribuer à la décarbonisation de l'économie.



Focus sur les technologies d'ABB dans la chaîne de valeur

Principales technologies de production

Les principales technologies de production d'hydrogène sont les suivantes :

- **Hydrogène gris** : Le vaporeformage du méthane représente environ 95% de la production mondiale d'hydrogène. Il s'agit de la réaction entre de la vapeur à haute température et une source de méthane, principalement du gaz naturel ($\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} = \text{CO} + 3\text{H}_2$). Cette technologie est bien maîtrisée et est utilisée pour la production d'hydrogène à grande échelle à des prix attractifs, principalement dans l'industrie chimique (production d'ammoniac et de méthanol) et l'hydrodésulfuration dans l'industrie du raffinage du pétrole. Elle a cependant des émissions de CO_2 gazeux élevées (environ $7 \text{ kg}_{\text{CO}_2}/\text{kg}_{\text{H}_2}$)
- **Hydrogène bleu** : Le vaporeformage du méthane peut être associé au captage, au stockage et/ou à la valorisation de carbone (Carbon Capture, Utilisation and/or Storage – CCUS en anglais) pour produire de l'hydrogène « bleu » - dans ce cas, le CO_2 capté sera stocké ou utilisé sous forme gazeuse ;
- **Hydrogène vert** : la production d'hydrogène par électrolyse consiste en une réaction

électrochimique qui divise l'eau (H_2O) en hydrogène et en oxygène en utilisant de l'électricité issue du renouvelable. Un électrolyseur se compose d'une anode, d'une cathode séparée par un électrolyte et d'une alimentation électrique. Différentes technologies d'électrolyse sont actuellement utilisées, en fonction du type d'électrolyte et de la température de fonctionnement (électrolyseurs alcalins, à membrane échangeuse de protons - PEM - ou à oxyde électrolyte solide - SOEC, cette dernière étant encore au stade de la R&D). L'hydrogène électrolytique représente moins de 5 % de la production mondiale d'hydrogène à ce jour, et son coût est plus élevé que celui de l'hydrogène issu du vaporeformage du méthane en raison de coûts d'investissement relativement plus élevés et de sa grande sensibilité au prix de l'électricité. Il est utilisé à ce jour principalement pour une production décentralisée (sur le site de consommation) d'hydrogène à une échelle de 1 à 2 MW.

Parmi les autres technologies disponibles, citons le **reformage autotherme (ATR)**, utilisé pour la synthèse de l'ammoniac et du méthanol, ainsi que dans le raffinage du pétrole. Il mélange le gaz naturel et la vapeur avec l'oxygène et l'air pour créer une réaction entre l'oxygène, le dioxyde de carbone et le méthane. Il convient aux installations de petite taille et offre une certaine souplesse grâce à une mise en route rapide et une grande adaptabilité.

La **pyrolyse du méthane** ou « **hydrogène turquoise** » permet de séparer le méthane du gaz naturel à haute température en hydrogène gazeux et en carbone solide. Le carbone produit dans ce processus peut être soit utilisé dans l'industrie (par exemple la sidérurgie), soit stocké : comme elle permet le stockage du CO₂ à l'état solide, cette technologie peut représenter des économies importantes pour la production d'hydrogène à grande échelle. La **gazéification** transforme les matières carbonées comme le charbon et la biomasse en monoxyde de carbone et en hydrogène. La gazéification du charbon consiste en la réaction à basse pression et à haute température entre le charbon et la vapeur pour former un gaz de synthèse contenant du monoxyde de carbone, de l'hydrogène, du dioxyde de carbone et du méthane. Il est utilisé à l'échelle industrielle dans l'industrie chimique et énergétique.

Nouveaux enjeux : compétitivité et sécurité

Compétitivité

Chaque étape de la production, de la logistique et de l'usage de l'hydrogène compte pour assurer la compétitivité des systèmes par rapport aux alternatives disponibles sur le marché (Annexe 2). Le **coût actualisé de l'hydrogène** (LCoH) est un indicateur du coût de production d'une unité d'hydrogène ramené à la durée de vie totale de l'actif de production. Il comprend les dépenses d'investissement (CAPEX), les dépenses d'exploitation (OPEX), les coûts de l'énergie, et dépend de la durée de vie ainsi que de l'efficacité de la chaîne de production d'hydrogène. Du point de vue de l'utilisateur final, l'ensemble de la chaîne de valeur de l'hydrogène doit être appréhendé afin d'intégrer les coûts de la logistique (transport, stockage, distribution) ainsi que les coûts d'intégration, y compris l'adaptation des équipements.

Les **coûts de l'énergie** utilisés pour sa production, gaz naturel ou électricité notamment, ont un rôle essentiel à jouer pour la compétitivité des systèmes hydrogène. Les **émissions de GES** peuvent engendrer des surcoûts liés aux systèmes de quotas carbone. Enfin, les **coûts du capital** sont également déterminants : les projets dans le domaine de l'hydrogène doivent générer un rendement adéquat pour les investisseurs, et attireront différentes sources de financement en fonction de la maturité du marché, de la durée de vie des actifs, du secteur de référence et du profil de risque global du projet.

Par conséquent, la compétitivité de l'hydrogène dépend en grande partie de l'adoption d'**innovations** et d'**approches systémiques** tenant compte de cet ensemble de variables (Annexe 3).

Segment	Fourchette de prix (€/kg)
Industrie (à grande échelle)*	1.5-2.5
Industrie (à petite échelle)*	8-20
Transport routier**	8-12

Fourchettes de prix indicatives pour l'hydrogène
(Sources : *Plan National Hydrogène, **Projet HyLIFT)

Solutions et valeur ajoutée d'ABB

- Equipes d'ingénieurs expérimentés dans toutes les disciplines de l'ingénierie nécessaires ;
- Collaboration étroite avec nos clients afin de bien comprendre leurs objectifs pour développer une solution rentable ;
- Adaptation aux besoins et à la gestion de projets quelle que soit l'envergure ;
- Conception de systèmes complets dédiés ou modularisés par fonctions ;
- Capacité d'optimisation des coûts CAPEX et OPEX notamment à l'aide de nos solutions digitales au service d'une gestion optimisée de l'énergie ou d'une gestion opérationnelle des actifs ;
- Capacité d'accompagnement (et éventuellement d'intervention en tant qu'EPC : ingénierie, approvisionnement et construction) ;
- Techniciens expérimentés, formés et à jour des accréditations nécessaires, notamment en matière de sécurité ;
- Gestion de la base installée et contrats de services avancés, en place dans le monde entier ;
- Capacité de nouer des partenariats et de collaborer avec la plupart des acteurs de la filière, des opérateurs et des fournisseurs de technologies.

Sûreté, sécurité et acceptabilité

L'intégration de l'approvisionnement en hydrogène dans les processus industriels, les infrastructures publiques ou dans les stations de recharge accessibles au public nécessite une approche globale de la sûreté et de la sécurité. L'hydrogène est soumis à la réglementation applicable à l'industrie chimique et relève de la directive Seveso III sur le stockage des substances chimiques au-delà de certains seuils. Cela implique des exigences spécifiques en matière d'information, de rapports, de planification et de permis.

La manipulation et l'utilisation sûres de l'hydrogène, y compris la minimisation du risque de fuite, supposent la mise en œuvre de contrôles techniques spécifiques basés sur les propriétés du vecteur énergétique :

- Capteurs d'instrumentation pour l'acquisition des données : ABB est parmi les leaders mondiaux de l'instrumentation et de l'analyse ;
- Solutions de contrôle/commande et d'analyse des systèmes ;
- Solutions de supervision par des systèmes SCADA ;
- Garantie de mise en œuvre des performances nécessaires vis-à-vis des risques de cybersécurité ;
- **Les équipements, produits et systèmes que nous mettons en œuvre pour les applications liées à l'hydrogène sont issus de nos solutions largement éprouvées dans les réseaux d'énergie, les infrastructures, les environnements industriels sévères ou les différentes applications de mobilité ;**
- Sécurisation de l'exécution de vos projets grâce à notre taille, notre organisation et notre solidité financière ;
- Démarche hygiène, sécurité et environnement adaptée à toutes les activités, y compris l'approvisionnement en matériaux, la conception des produits, les opérations et les services ;
- Vaste expérience des obligations de conformité, notamment dans les environnements classés Seveso ;
- Réduction des facteurs **de risque, d'incident et de quasi-accident** ;
- Amélioration des performances de sécurité et de sûreté de toutes les opérations ;
- Solutions d'architecture de télécommunication pour la transmission sécurisée de données en technologies filaire ou sans fil.

Démystifier l'hydrogène en quelques faits

- L'hydrogène est l'élément le plus léger dans l'univers, il est inodore et non toxique ;
- L'hydrogène peut être converti directement en électricité et en chaleur sans combustion ;
- En utilisant l'hydrogène comme combustible, la pile à combustible sépare les électrons et les protons, les protons passant au travers et les électrons servant à la production d'électricité ;
- L'hydrogène se disperse très rapidement dans l'air, tombant rapidement en dessous du niveau d'inflammabilité ;
- Le gaz hydrogène a un plus faible « pouvoir explosif » par volume que les autres carburants ;
- L'hydrogène a un seuil d'auto-inflammation élevé, mais l'étincelle d'allumage nécessaire pour l'enflammer est bien moindre que pour d'autres carburants – c'est pourquoi la liaison équipotentielle et la mise à la terre sont importantes.



Cas d'usage

Levier majeur d'innovation industrielle, l'hydrogène accompagne les mutations des industries et territoires. Il permet en effet une intégration à grande échelle des énergies renouvelables, la décarbonation des usages énergétiques et industriels, et le renforcement de la résilience des systèmes énergétiques.

Pour les développeurs de projets, leurs partenaires et pour les utilisateurs finaux, l'hydrogène peut être une réponse compétitive aux besoins de flexibilité et de développement bas carbone.



Electrifier la production d'hydrogène

Des solutions complètes d'optimisation

L'électrification est un élément-clé de performance, de fiabilité et de création de valeur d'une installation de production d'hydrogène par électrolyse. Du raccordement au réseau jusqu'à l'alimentation des électrolyseurs, les besoins électriques peuvent être intégrés en une solution d'électrification globale, basée sur les objectifs de l'utilisateur.

La croissance massive des énergies renouvelables, alternatives aux énergies carbonées et dans un contexte de réduction de la part du nucléaire dans la production électrique, crée une dynamique sans précédent en faveur de la production d'hydrogène bas carbone. L'hydrogène produit par électrolyse permet de valoriser les sources d'électricité intermittentes et de décarboner l'utilisation d'énergie en aval. Si l'électrolyse industrielle de l'eau est une technologie utilisée depuis plus d'un siècle, son déploiement à grande échelle est un enjeu de compétitivité pour la filière dans son ensemble. L'électrification et l'intégration des installations de production d'hydrogène par électrolyse constituent des leviers essentiels de réduction des coûts d'investissement et de fonctionnement, mais aussi de sécurisation des installations pour limiter les perturbations sur les réseaux électriques.

Acteur majeur du secteur de l'énergie, ABB accompagne vos projets de production d'hydrogène par électrolyse avec une maîtrise complète des installations énergétiques, une capacité globale de dialogue avec les opérateurs du secteur, et des solutions adaptées à chaque contexte réglementaire pour votre développement à l'international.

Principe de la production d'hydrogène par électrolyse

L'électrolyse décompose les molécules d'eau en hydrogène et en oxygène par l'électricité : un courant continu (DC) est appliqué à deux électrodes séparées par un électrolyte ; avec une tension suffisante, le courant électrique génère une réaction qui dissocie la molécule d'eau en oxygène et en hydrogène. Une unité d'électrolyse de l'eau se compose de cellules électrolytiques individuelles combinées en *stacks*, et d'équipements auxiliaires électriques et mécaniques, le *Balance of Plant* (BoP).

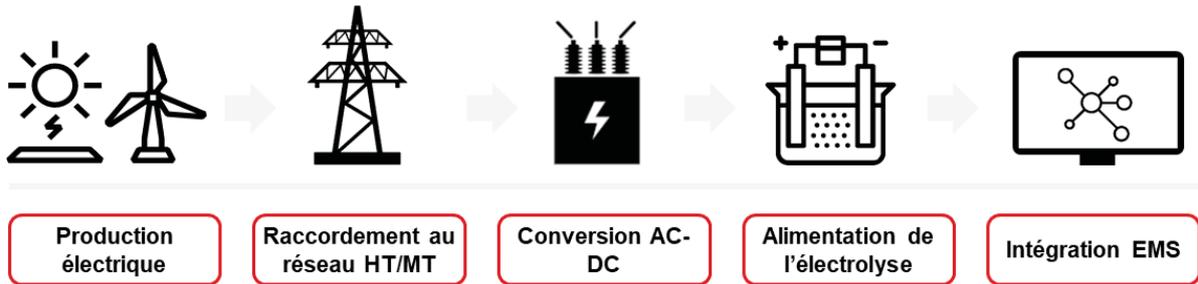
Les types d'électrolyseurs les plus répandus, alcalins et PEM, ont des caractéristiques de fonctionnement différentes :

	Alcalin	PEM
Électrolyte	Hydroxyde de potassium	Solide à membrane polymère
Température (°C)	100-150	70-90
Plage de charge (nominale)	15-100%	0-160%
Démarrage	1 à 10 minutes	1sec-5min
Ramp-up/Ramp-down	0.2 à 20 %/seconde	100%/seconde
Extinction	1 à 10 minutes	secondes
Durée de vie	60 000 – 90 000 h	20 000 – 60 000 h
Stade de développement	Commercialement disponible	En développement commercial

Table 2 Caractéristiques des électrolyseurs alcalins et PEM

L'électrification de la production d'hydrogène peut être décomposée en quatre processus :

- ❑ **Alimentation électrique** : raccordement au réseau électrique au travers d'une sous-station HT/MT ;
- ❑ **Conversion de l'électricité** : passage du courant alternatif (AC) au courant continu (DC) requis par l'électrolyse ;
- ❑ **Fonctionnement et contrôle de l'électrolyse** ;
- ❑ **Intégration avec le système de management de l'énergie (EMS).**



Electrification de la production d'hydrogène

La production d'hydrogène dépend donc à la fois de la source d'électricité et des systèmes de contrôle et de gestion de l'installation pour répondre aux principaux défis du secteur :

- ❑ Changements d'échelle des électrolyseurs, vers des installations de plusieurs mégawatts ;
- ❑ Prise en compte des intermittences liées aux énergies renouvelables ;
- ❑ Gains de performance avec des concepts globaux d'efficacité, de sécurité et de réduction du coût total de possession ;
- ❑ Multiplication des unités de production distribuées devant être compatibles avec les réseaux électriques.

Ces besoins électriques peuvent être intégrés en une solution globale d'électrification pour améliorer la conception, mise en œuvre et exécution du projet, réduire son profil-risque et améliorer sa performance.

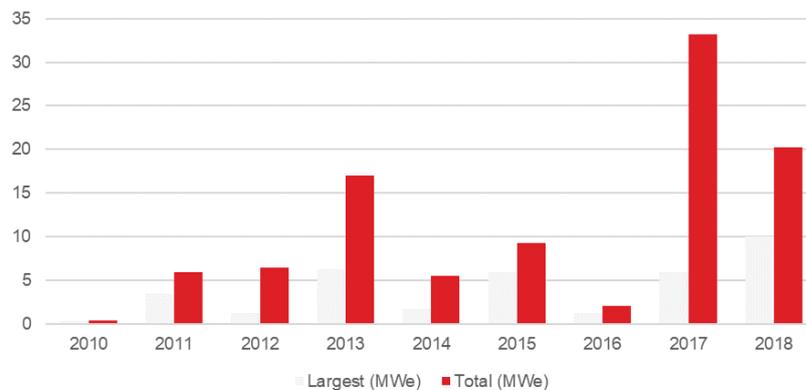


Figure 3 Capacité des électrolyseurs installés par année, 2010-2018
 Basé sur les données de l'AIE 2020 "Capacité d'électrolyseurs installée par an, 2010-2018",
www.iea.org/statistics, Tous droits réservés

Principaux enjeux, solutions et valeur ajoutée d'ABB

Alors que les coûts d'investissement (CAPEX) des électrolyseurs diminuent, l'optimisation de l'électrification depuis le raccordement au réseau jusqu'à l'alimentation électrique de ces électrolyseurs devient un facteur-clé de réussite des projets. L'architecture du système électrique doit intégrer les exigences en amont (réseau) et en aval (utilisateur) pour atteindre les objectifs de performance des électrolyseurs. Dans le même temps, elle doit réduire le TCO de l'hydrogène produit par électrolyse en augmentant la flexibilité de la production et en déployant des solutions de digitalisation qui réduisent les coûts d'exploitation et de maintenance (OPEX).

ABB est un partenaire essentiel de vos projets, pour :

- Concevoir et mettre en œuvre des systèmes complets d'électrification de vos équipements de production d'hydrogène ;
- Optimiser la conversion d'énergie et en améliorer le rendement ;
- Protéger votre installation et vos équipements en limitant la pollution électrique générée par l'électrolyse ;
- Modulariser les équipements électriques, afin de réduire les besoins en génie civil, améliorer le temps d'exécution et de mise en service ;
- Accompagner votre développement international, avec des solutions adaptées aux réglementations locales.

Connexion au réseau

La connexion au réseau électrique en courant alternatif pour une alimentation en courant continu de l'électrolyseur s'appuie sur une **conversion de l'énergie** réalisée par l'électronique de puissance. La conversion fournit une alimentation électrique ininterrompue à l'électrolyseur et abaisse la tension du réseau vers l'électrolyseur. La chaîne de conversion de l'énergie se compose d'un transformateur AC/AC et d'un redresseur AC/DC ou d'un convertisseur DC/DC. Le contrôle du flux d'énergie vers l'électrolyseur permet de garantir la performance et l'efficacité de la conversion d'énergie. Un aspect essentiel de la connexion au réseau est la **minimisation des pertes de conversion**, qui ont un effet négatif sur l'efficacité énergétique globale de la production d'hydrogène par électrolyse.

Le système de connexion au réseau peut varier en fonction de plusieurs éléments :

- **Taille de l'installation** : les électrolyseurs à grande échelle (typiquement plus de 10 MW) seront connectés au réseau en haute et très haute tension et nécessiteront des équipements spécifiques ;
- **Alimentation électrique** : les sources d'énergie fluctuantes telles que le photovoltaïque ou l'éolien impliquent la connexion au réseau de convertisseurs de plus forte puissance, ce qui a un impact sur les conditions de fonctionnement des électrolyseurs et sur la conception du système d'électronique de puissance ;
- **Spécificités du réseau électrique local**, avec des dispositions particulières prévues par les gestionnaires de réseau (courant de court-circuit, spécifications pour les régulateurs de tension et autres composants...).

Les **installations « dédiées » d'énergie renouvelable** (éolien ou solaire) pour la production d'hydrogène par électrolyse peuvent contribuer à la réduction des dépenses de raccordement, en ne nécessitant qu'un convertisseur DC-DC monodirectionnel.

Produits et solutions ABB

- Transformateurs ;
- Appareillages haute, moyenne et basse tension ;
- Postes et sous-stations d'électrification ;
- Automatisation, protection et contrôle des sous-stations ;
- Equipements pour les auxiliaires des systèmes de production d'hydrogène (Appareillage BT, moteurs, variateurs) ;
- Systèmes flexibles de transmission en courant alternatif. (FACTS)

Les + ABB

- Maîtrise des solutions de connexion aux réseaux moyenne ou haute tension ;
- Forte expertise dans le traitement des perturbations réseaux et des harmoniques ;
- Connaissance approfondie des contraintes et des technologies de production d'électricité ;
- Capacité d'études, d'ingénierie et de modélisation des systèmes électriques et des perturbations ;
- Modularisation et optimisation des sous-fonctions du système d'électrification, y compris intégration en cabines préfabriquées (« *shelters* ») ;
- Compétence d'exécution de projets, avec un pilotage par des chefs de projets certifiés ;
- Expérience des contraintes d'exploitation des réseaux et des pratiques des services publics dans le monde entier ;
- Mode de collaboration adaptable, depuis une approche produits tels que transformateurs, cellules, appareillages de contrôle et de protection, jusqu'aux solutions sous-systèmes modulaires intégrés ou aux sous-stations clés en main ;
- Référent mondial dans les systèmes d'entraînement (moteurs, variateurs) pour les auxiliaires des électrolyseurs.

Power Quality – Qualité de l'énergie électrique

Pour assurer une gestion adéquate de la qualité de l'énergie, le système de connexion au réseau doit être à la fois basé sur la configuration complète de l'installation d'électrolyse, c'est-à-dire l'ensemble formé par l'électrolyseur et les équipements auxiliaires, et sur le profil de charge de l'électrolyseur, et donc sur ses prévisions d'utilisation finale.

Le **facteur de puissance** de l'installation, c'est-à-dire l'efficacité de sa consommation de puissance, est déterminant pour assurer sa stabilité et limiter les pertes. L'optimisation du facteur de puissance est particulièrement importante pour les électrolyseurs, équipements énérgo-intensifs. Le transfert de la puissance électrique du réseau vers les récepteurs doit maintenir une tension et une intensité identiques : cet état stable est appelé point de fonctionnement. Il dépend de la puissance de l'électrolyseur et des équipements auxiliaires, et donc de la globalité de l'installation d'électrolyse. En cas de variations du facteur de puissance, liées à l'utilisation de l'électrolyseur, l'installation nécessitera la mise en place de **compensations**, dans le *shelter* de l'installation ou en amont.

Par ailleurs, les variations de charge (s'écartant du fonctionnement de l'électrolyseur à capacité nominale) génèrent des perturbations électromagnétiques appelées **harmoniques**. Les électrolyseurs, équipements non linéaires de forte puissance avec un enclenchement et un arrêt rapide de l'alimentation par l'électronique de puissance, déforment l'onde de tension du réseau électrique. Celle-ci est conçue pour une tension et un courant sinusoïdaux alternatifs de 50 Hz, conformément aux codes de réseau. Les harmoniques générées par l'électrolyseur peuvent constituer un **facteur de risque majeur** car elles peuvent :

- Causer des dommages à l'installation elle-même ;
- Interférer avec d'autres installations électriques à proximité ;
- S'étendre aux réseaux à haute tension ;
- Donner lieu à des pénalités pour non-conformité aux codes de réseau.

La gestion des distorsions harmoniques peut être soit **corrective**, basée sur des solutions « passives » telles que l'installation d'un filtre d'harmoniques et d'un système de compensation de courant dans le poste électrique, soit être **préventive** et basée sur des technologies « actives », avec une architecture d'électronique de puissance qui tienne compte à la fois des exigences opérationnelles de l'électrolyseur (notamment les variations de charge) et des spécifications des codes de réseau.

Solutions et valeur ajoutée ABB

- PQflexC - contrôleur de puissance réactive variable
- PQdynaC - contrôleur de puissance réactive et de déséquilibre ultra-rapide
- PQactiF - filtre actif d'harmoniques
- PQStorI - onduleur à accumulation de batteries avec fonctions de qualité de l'énergie
- PQoptiM contrôle et surveille les paramètres de qualité de l'énergie

Les + ABB

- Solutions Power Quality pour l'intégralité des procédés d'électrification en basse, moyenne et haute tension ;
- Prévention et réduction des temps d'arrêt, des pertes de production et de la neutralisation des équipements pour maintenance ;
- Pilotage et contrôle des équipements via des plates-formes utilisateurs connectées au cloud pour un accès aux données en temps réel.

Optimiser les équipements auxiliaires électriques et mécaniques : le Balance-of-Plant

Dans une unité de production d'énergie, le « Balance-of-Plant » est constitué de l'ensemble des équipements auxiliaires électriques et mécaniques servant à faire fonctionner les équipements principaux, tels que l'électrolyseur. Le BoP comprend donc :

- **Systèmes de contrôle** : l'unité d'électrolyse est exploitée par un système numérique de contrôle/commande (DCS) tandis que le logiciel de gestion de l'installation fonctionne grâce à un automate programmable (PLC) qui centralise les signaux envoyés par le DCS, applique l'algorithme d'optimisation et communique avec le système de management de l'énergie de l'utilisateur. Les instruments critiques et les procédés de production de l'installation sont accessibles via une interface de visualisation et de contrôle.
- **Automatisation/SCADA** : le système SCADA de supervision et d'automatisation surveille et contrôle le fonctionnement de l'électrolyseur et lui envoie des consignes pour adapter sa consommation d'énergie et pour générer un courant continu de référence, ce qui joue un rôle clé pour assurer la flexibilité de l'installation.
- **Fonctions électromécaniques auxiliaires** : purification, déshumidification, compression etc.

Avec la montée en puissance des électrolyseurs, de 1 à 2 MW vers la dizaine de mégawatts, la **modularité des installations**, via l'assemblage en ensembles reconfigurables, impacte l'ensemble du système d'électrification : les systèmes d'alimentation électrique peuvent être connectés à chaque module pour assurer la redondance et la fiabilité, ou être basés sur un système unique d'alimentation électrique qui nécessitera des redresseurs de plus grande puissance. La conception de l'architecture électrique de l'installation d'électrolyse devra donc optimiser le système d'alimentation électrique pour contribuer à la réduction des coûts d'investissement tout en assurant fonctionnalité, sécurité et qualité.

Le système de contrôle de l'électrolyseur peut en outre déterminer la puissance optimale de l'installation : un électrolyseur non contrôlé fonctionnera à capacité nominale, tandis qu'une production contrôlée permettra d'adapter sa plage de charge et d'accroître la flexibilité de son utilisation.

Solutions et valeur ajoutée ABB

- Capacité d'études, d'ingénierie des sous-systèmes de l'électrolyseur
- Solutions d'électrification
- Solutions de gestion du process d'électrolyse, y compris systèmes d'instrumentation et d'analyse associés
- Systèmes de contrôle/commande pour le contrôle, systèmes SCADA pour le pilotage ou la supervision. Nos solutions sont certifiées pour des usages dans des environnements et application critiques tels que la chimie, la pétrochimie et répondent aux exigences de cybersécurité les plus sévères
- Référent mondial dans les systèmes d'entraînement (moteurs, variateurs), les capteurs et les actionneurs pour les auxiliaires des électrolyseurs
- Modularisation et optimisation des sous fonctions du process d'électrolyse, y compris intégration en cabines préfabriquées (« shelters ») assemblés et pré-testés en usine
- Plateforme technologique homogène, minimisant l'investissement nécessaire dans la maintenance, les pièces de rechange du matériel et la formation à la maîtrise des équipements
- Compétence d'exécution de projets jusqu'à la mise en service, pilotés par des chefs de projets certifiés
- Sécurisation de l'exécution du projet par la limitation du nombre d'intervenants et la gestion des interfaces.

Optimiser la consommation d'électricité

Le coût de l'électricité est le **principal coût d'exploitation** des électrolyseurs, avec des variations qui dépendent des heures de charge annuelles et du prix de l'électricité. L'utilisation de l'électrolyseur peut suivre des stratégies différentes :

- Fonctionnement continu de l'électrolyseur, à environ 8 000h par an ;
- Taux d'utilisation plus faible (par exemple, 50 %, la nuit) pour s'adapter aux prix plus bas de l'électricité
- Valorisation d'électricité effacée (non injectée sur le réseau) : avec un coût nul de l'électricité, le LCoH est simplement déterminé par le coût fixe de l'équipement et son taux d'utilisation.

Tirer parti des baisses de prix des énergies renouvelables est un facteur majeur de réduction des coûts de production d'hydrogène. Cette optimisation des besoins en hydrogène et de la disponibilité des sources d'énergie intermittentes pour la production peut être réalisée à l'aide d'un **logiciel de pilotage** dédié :

- Définition des conditions optimales de fonctionnement des électrolyseurs, par exemple en tenant compte des différences entre les électrolyseurs alcalins et PEM et en anticipant la durée de leur montée en puissance ;
- Connexion à plusieurs sources d'alimentation électrique ;
- Intégration de données externes (prix spot de l'électricité, prévisions météorologiques, autres fournisseurs...) ;
- Fourniture d'un modèle prédictif basé sur des algorithmes et l'intelligence artificielle.

L'optimisation de la consommation d'électricité peut également faire appel à une solution complémentaire de stockage par batterie.

Solutions et valeur ajoutée ABB

- Optimisation de l'alimentation en énergie
- Système de management de l'énergie évolutif et très flexible
- Intégration dans des infrastructures existantes et complexes
- Adaptabilité au modèle économique et aux objectifs des clients

Les + ABB

- Une vision claire des besoins énergétiques
- Un pilotage performant du mix de production et de l'alimentation en énergie
- Intégration à une stratégie de réduction de l'impact environnemental et de baisse des coûts de production
- Suite logicielle **OPTIMAX®** pour la gestion des actifs énergétiques, l'agrégation et l'optimisation des ressources énergétiques décentralisées,
- Suite logicielle **OPTIMAX® for Virtual Power Plants** pour regrouper et optimiser les ressources énergétiques décentralisées dans une centrale électrique virtuelle, permettant des échanges sur les marchés de gros de l'énergie ou la fourniture d'énergie à des tiers, à partir de sites de production décentralisée pouvant aller de plusieurs dizaines à plusieurs milliers d'unités sur de vastes zones, de microsites (kW) à l'échelle industrielle (MW)

Défis pour la conception, la planification, l'exécution des projets

La garantie de bonne exécution des projets, dans le respect de la qualité, des coûts et des délais nécessite :

- La prise en compte de toutes les exigences spécifiques au process et à son environnement ;
- Une parfaite coordination entre les différents acteurs du projet (investisseur, bureau d'études, intégrateur, EPC, exploitant, opérateur d'énergie, mainteneur...) ;
- Des interfaces optimisées entre les différentes phases de conception et d'exécution ;
- Une fiabilisation des chaînes d'approvisionnement

Ces exigences sont d'autant plus fortes dans les secteurs émergents tel que celui de l'hydrogène.

INGENIERIE	CONSTRUCTION	OPERATION	MAINTENANCE	VENTE
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Evaluation de la demande en hydrogène ▪ Optimisation des besoins de stockage ▪ Sélection de la technologie d'électrolyse ▪ Spécifications de la connexion au réseau ▪ Concept de sûreté et sécurité 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Fourniture de l'équipement ▪ Intégration des systèmes ▪ Mise en service 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Optimisation de l'alimentation en électricité ▪ Gestion du système SCADA ▪ Gestion de la base installée 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Maintenance de l'électrolyseur ▪ Remplacement du stack 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Fourniture d'hydrogène (source primaire de revenus) ▪ Services réseau (source secondaire de revenus)

Défis pour le cycle projet de l'électrification de la production d'hydrogène

Faire confiance à ABB est un gage de bonne exécution de vos projets.

Les + ABB

- Partenaire global pour l'accompagnement de vos projets de production d'hydrogène
- Capacité d'ingénierie des systèmes
- Capacité d'exécution de vos projets, avec un pilotage par des chefs de projets certifiés
- Maîtrise des projets d'envergure dans des environnements complexes
- Technologies pour l'hydrogène, déjà éprouvées dans des environnements sévères
- Capacité d'accompagnement à l'international
- Savoir-faire dans le domaine de la maintenance et de l'optimisation de la disponibilité de vos équipements



ABB Ability™ pour l'hydrogène

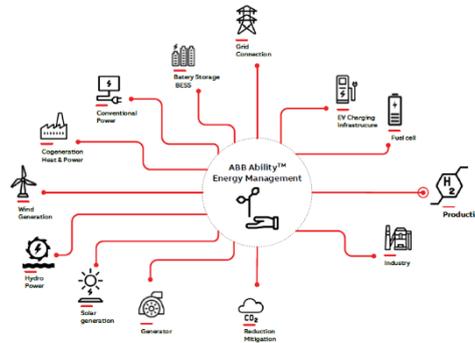
En savoir plus, agir plus et agir mieux, ensemble

La plateforme numérique unifiée et transversale ABB Ability™ combine cloud computing, passerelle de supervision et de commande, appareils, systèmes, solutions et services pour aider nos clients à en savoir plus, à agir plus et à agir mieux, ensemble.

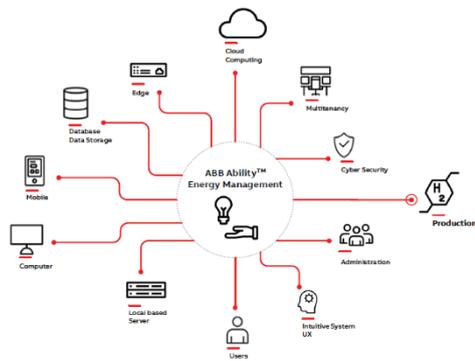
ABB Ability™ exploite toute la puissance des données industrielles de vos capteurs, appareils et logiciels réunis en un **écosystème fonctionnel, technologique et opérationnel intégré**. Avec la plateforme ABB Ability™ vous pouvez :

- Être mieux informés sur votre activité en temps réel ;
- Surveiller, contrôler et gérer vos appareils, processus et opérations sur site ou à distance ;
- Simuler, anticiper et optimiser votre activité à l'aide d'outils, d'informations et de dispositifs d'analyse ;
- Travailler avec nos experts et nos ingénieurs dans le monde entier, et transformer votre activité.

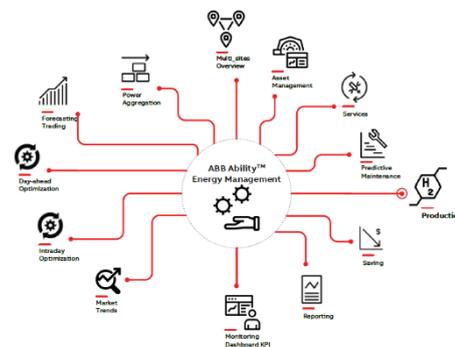
Ecosystème fonctionnel



Ecosystème technologique



Ecosystème opérationnel





Intégrer l'hydrogène aux réseaux électriques

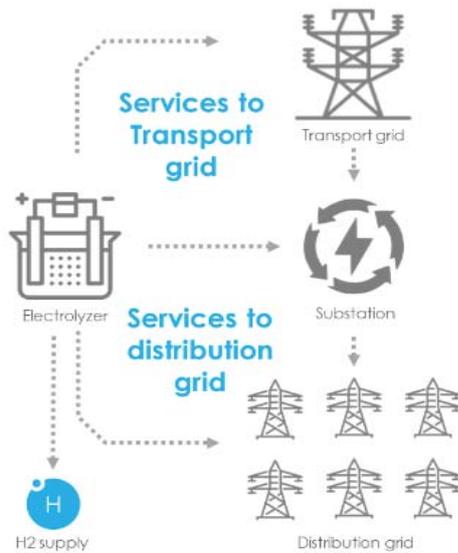
Un facteur de flexibilité

L'hydrogène peut jouer le rôle d'intégrateur du système énergétique en équilibrant offre et demande intermittentes, en maximisant l'injection des énergies renouvelables et en renforçant la résilience des réseaux électriques.

Les innovations technologiques, la réduction des coûts, les nouveaux modèles économiques et les politiques publiques accélèrent la transformation du réseau électrique traditionnel en un **réseau décentralisé** où l'énergie et l'information circulent dans les deux sens. La gestion de sources d'énergie multiples doit maîtriser leurs effets potentiellement perturbateurs pour garantir l'efficacité des réseaux électriques. L'hydrogène comme vecteur énergétique est un facteur de flexibilité, permettant d'ajuster à la fois l'offre et la demande en énergie. Pour délivrer son potentiel, cette flexibilité doit s'appuyer sur des systèmes d'information et de communication robustes.

La **part croissante des énergies renouvelables** dans le bouquet électrique, en particulier du photovoltaïque et de l'éolien, entraîne une augmentation des situations d'offre « excédentaire » et du risque d'effacement des ressources renouvelables. Il peut s'agir de décisions économiques d'effacement, dans le cas de prix bas ou négatifs, de coupures auto-régulées ou de décisions du gestionnaire de réseau de transport. Dans un tel contexte, le **stockage d'hydrogène** peut être une réponse à :

- La gestion des congestions locales ;
- L'équilibre entre l'offre et la demande à l'échelle du système interconnecté ;
- Au besoin de stockage saisonnier, dans une perspective de plus long terme.



GRID FLEXIBILITY SERVICES DETAIL	
Network	Service
TRANSMISSION GRID	Primary reserve
	Secondary reserve
	Tertiary reserve
DISTRIBUTION GRID	Renewable power integration
	Demand-side management
	Voltage regulation

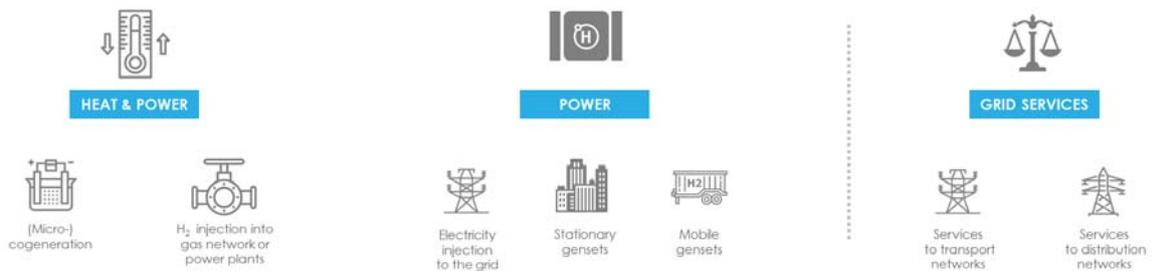
Solutions de flexibilité pour le réseau (Source HINICIO)

Le stockage d'hydrogène complète d'autres solutions, notamment les systèmes de stockage d'énergie par batterie (BESS) et l'hydroélectricité par pompage. Toutes les technologies disponibles doivent être prises en considération dans la **planification du développement et du renforcement du réseau électrique**, en tenant compte des interconnexions et des contraintes géographiques. Cela inclut le développement de systèmes d'interconnexion HVDC (courant continu à haute tension) permettant d'intégrer les unités de très forte puissance au réseau électrique, comme déjà réalisé pour les sources d'énergie renouvelables éloignées, telles que les parcs éoliens en mer.

Enfin, l'hydrogène est également une solution pour les îlots énergétiques, zones non connectées et dépendant de sources d'énergies carbonées. Il permet en effet d'utiliser la production d'énergies renouvelables locales.

FUEL CELL STATIONARY APPLICATIONS

ELECTROLYSERS



Autres solutions de flexibilité énergétique (Source HINICIO)

Les applications stationnaires de l'hydrogène incluent d'une part les utilisations sous forme gazeuse, en injection dans le réseau de gaz ou dans des micro-unités de cogénération pour un usage résidentiel, et d'autre part les utilisations basées sur la production d'électricité par réaction dans une pile à combustible. Les piles à combustible représentent une gamme de puissances très large : formes miniaturisées alimentant des équipements portables à l'échelle du kilowatt, groupes électrogènes d'appoint de la dizaine à la centaine de kilowatts, injection dans le réseau électrique ou en industrie jusqu'au mégawatt. Les systèmes d'alimentation électrique par pile à combustible peuvent être combinés à une valorisation sur le réseau électrique pour renforcer le modèle économique de l'installation. Enfin, les électrolyseurs peuvent également fournir des services au réseau électrique, en complément de leur production d'hydrogène pour l'industrie ou la mobilité.

ABB propose une compétence globale sur l'hydrogène, de l'électrification au pilotage énergétique, permettant des gains de flexibilité et de fiabilité et s'appuyant sur une vaste gamme de solutions multi-énergies. Leader mondial des technologies pour les réseaux électriques et les *smart grids*, ABB est à la convergence des technologies IT, de l'OT et des opérations pour fournir des produits, systèmes, logiciels et services pour toute la chaîne de valeur des réseaux électriques.

Principaux défis, solutions et contribution d'ABB

Intégrer l'hydrogène au pilotage et à la gestion des réseaux électriques

Les réseaux électriques connaissent une transformation profonde, reposant de plus en plus sur des technologies de l'information et de la communication qui rendent les réseaux communicants et en font de véritables *smart grids*. Elles permettent un pilotage plus flexible des réseaux pour gérer les contraintes telles que l'intermittence des énergies renouvelables et le développement de nouveaux usages. L'intégration des technologies de l'information et de la communication aux réseaux électriques permet de prendre en compte l'ensemble des sous-systèmes du réseau électrique, de la production à l'utilisation finale, afin d'assurer un fonctionnement optimal.

Les unités de production d'hydrogène doivent être connectées à des systèmes énergétiques plus larges pour fonctionner correctement, fournir des services de flexibilité et être intégrées en toute sécurité dans les réseaux énergétiques. Elles interviennent dans un contexte de convergence entre les technologies de l'information (IT) permettant de piloter les réseaux, et les technologies d'exploitation (OT) s'appuyant sur des dispositifs physiques (capteurs, automates, superviseurs...).

Au niveau de l'unité de production, les outils de contrôle et de commande des électrolyseurs s'appuient sur des systèmes de supervision, de contrôle et d'acquisition de données (SCADA) pour la collecte et l'analyse de données en temps réel, le suivi et le contrôle des équipements. Ils peuvent être combinés avec des outils de pilotage sophistiqués impliquant la gestion de grands flux de données et faisant appel à l'intelligence artificielle. Au niveau des gestionnaires de réseaux de distribution, le pilotage du réseau électrique s'appuie sur l'intégration des informations provenant de l'unité de production d'énergie, couplées aux informations sur les capacités de stockage et l'utilisation.

Le pilotage performant du réseau électrique repose donc sur une transmission fiable et sécurisée des données, et leur traitement en grands volumes. La convergence entre réseaux électriques et réseaux de communication fait à la fois appel à des technologies IT reposant souvent sur des standards de communication ouverts, et à des technologies OT propres aux systèmes industriels. L'intégration de nouvelles unités de production au système énergétique crée donc plusieurs défis pour le pilotage du réseau électrique :

- Continuité du service : permettre un flux continu d'informations grâce à des routeurs radio, à la surveillance et à la gestion à distance ;
- Fiabilité : performance et robustesse de la technologie, des protocoles et des logiciels, permettant un contrôle sécurisé ;
- Cybersécurité : protéger l'intégrité physique et numérique des sites de production.

Solutions et valeur ajoutée ABB

ABB fournit des solutions de télécommunications spécialement conçues pour l'alimentation électrique et compatibles avec tous les réseaux (cuivre, fibre optique, radio) :

- Solutions logicielles e-mesh™ pour la gestion des flux énergétiques et du pilotage global autour de la gestion des alimentations énergétiques depuis le réseau ou les énergies renouvelables, du stockage, de l'autoconsommation ou de la réinjection sur le réseau électrique
- Systèmes de contrôle PLC interconnectés pour la fourniture en temps réel de volumes importants de données de processus et de sécurité à plusieurs systèmes de contrôle centraux ;
- Architecture maillée ABB Tropos, entièrement distribuée, basée sur un réseau IP et des radios à norme ouverte offrant la couverture, la capacité, les performances, la fiabilité, la sécurité et l'évolutivité requises dans une infrastructure de communication IP sans fil ;
- Suites logicielles OPTIMAX® pour aide à la décision de produire, stocker, injecter ou vendre en PtP ;
- Solutions de télécommunication à large bande y compris pour les applications critiques.

Les + ABB

- ABB est leader mondial dans les infrastructures et les réseaux de communication pour les réseaux d'énergie ;
- Expertise dans la transmission de données et les réseaux de communication pour les applications critiques ;

- Fourniture d'informations fiables pour une prise de décision rapide et précise et une optimisation des systèmes ;
- Capacités d'adaptation de nos réseaux de communication et de nos architectures télécoms aux spécificités de vos installations.

Fourniture de services de flexibilité aux réseaux

La fourniture de services de flexibilité au réseau électrique peut être une source de revenus complémentaire aux unités de production d'hydrogène par électrolyse, en complément des sources de revenus primaires provenant de la fourniture d'hydrogène pour l'industrie ou la mobilité. Contrairement aux centrales électriques conventionnelles et à l'instar des BESS, les électrolyseurs n'ont pas d'inertie car ils ne dépendent pas d'équipements rotatifs, tels que des générateurs. Le défi du contrôle de l'électrolyse réside dans la capacité à combiner différents objectifs, notamment l'écrêtement de la demande de pointe, la gestion des creux de la demande, et l'automatisation de la fourniture de services au réseau. Ces services comprennent :

- Gestion des pics de demande : réduction des pointes critiques dans une région donnée ;
- Réponse aux prix du marché de l'énergie, en s'adaptant à des prix faibles ou négatifs ;
- Stabilisation du réseau par l'équilibrage de l'offre et de la demande à court terme ;
- Compensation de la perte d'une unité de production ;
- Inertie artificielle pour réguler la consommation d'énergie en réponse à une variation de fréquence ;
- Gestion de la tension de distribution, en ajustant la charge nette des électrolyseurs.

Solutions et valeur ajoutée ABB

- Systèmes clé-en-main de stockage et de pilotage de l'énergie ;
- Systèmes complets de connexion au réseau moyenne ou haute tension ;
- Suites logicielles d'aide à la décision ;
- Capacité globale d'ingénierie et d'intégration.

Une solution de flexibilité des consommations

L'hydrogène peut fournir des services de flexibilité infra-journalière en réinjectant de l'électricité dans le réseau, en combinant le stockage d'énergie et sa réinjection sur le réseau électrique au moyen d'une pile à combustible. Les piles à combustible comprennent des solutions modulables et compactes pouvant atteindre plusieurs mégawatts. Les convertisseurs de puissance et les systèmes de contrôle permettent l'intégration au réseau en courant continu ou en courant alternatif. Les systèmes à grande échelle peuvent être conçus comme des unités modulaires autonomes, comprenant les piles à combustible, les systèmes d'électrification, les convertisseurs de puissance et les équipements de production et de stockage de l'hydrogène, constituant ainsi des blocs de plusieurs MW.

Les unités de piles à combustible stationnaire fournissent une énergie distribuée propre, efficace et fiable. Elles constituent une source d'énergie alternative dans les régions où l'alimentation électrique est absente ou peu fiable. Les systèmes de piles à combustible peuvent être installés dans les micro-réseaux, les systèmes *offgrid*, ainsi que pour des systèmes d'alimentation électrique auxiliaire ou de secours, en alternative à un groupe électrogène dans un data centre, par exemple.

Solutions et valeur ajoutée ABB

- Technologies *offgrid* et de *micro-grid* pour la production d'énergie renouvelable, l'automatisation, la stabilisation du réseau, la connexion au réseau, le stockage de l'énergie et les technologies de contrôle intelligent
- Solutions logicielles e-mesh™ de gestion des flux énergétiques et du pilotage
- Solutions d'électrification et de distribution de l'énergie
- Systèmes d'alimentation électrique auxiliaires
- Fiabilité de l'alimentation électrique
- Traitement des harmoniques sur le réseau



Développer la mobilité zéro émission

Avec les véhicules à pile à combustible

Les propriétés de l'hydrogène en font un atout pour la mobilité intensive, longue distance et le transport lourd. Avec une maîtrise complète des systèmes embarqués et de la chaîne de traction, ABB est un acteur reconnu du développement de véhicules à pile à combustible.

L'hydrogène utilisé comme carburant alternatif dans le secteur des transports peut contribuer à la réduction des émissions de GES, à l'amélioration de la qualité de l'air, et au développement d'une mobilité à zéro émission. Les piles à combustible à hydrogène sont une alternative aux moteurs à combustion thermique et aux véhicules électriques à batterie : dans un véhicule électrique à pile à combustible (FCEV), l'hydrogène et l'oxygène réagissent dans une **pile à combustible** pour produire l'électricité faisant fonctionner les moteurs électriques. Avec une densité énergétique et des puissances importantes, l'hydrogène permet de limiter le temps de recharge et d'assurer une autonomie importante. L'hydrogène est donc particulièrement adapté à la mobilité intensive, longue distance et au transport lourd. La mobilité hydrogène permet en outre d'opérer dans des zones à faibles émissions et dans des environnements sensibles au bruit.

Les piles à combustible sont développées dans tous les modes de transport, y compris les voitures (véhicules électriques à pile à combustible, FCEV), la navigation maritime et fluviale, les bus, les trains, les transports légers et lourds.

Mode de transport	Description
Voitures (FCEV)	Moteur électrique alimenté par une pile à combustible
Bateaux	Principalement systèmes hybrides (électrique à batterie, diesel) pour la navigation fluviale et maritime
Bus	Recharge en hydrogène en 5 à 7 minutes dans une station centralisée au dépôt de bus
Train (hydro rail)	Alternative à l'électrification des lignes ferroviaires à faible fréquence
Véhicules utilitaires légers	Peut comprendre des systèmes à prolongateur d'autonomie à l'hydrogène
Poids lourds	Impact prometteur sur le poids en charge et l'autonomie, y compris pour la collecte des déchets

Tableau 3 Mobilité de l'hydrogène : modes de transport

Avec des technologies de recharge, des systèmes embarqués et des solutions d'électrification pour toutes les mobilités – voitures, bus, camions, bateaux et trains – ABB propose une large gamme de produits et de solutions de mobilité durable. ABB a une **maîtrise complète de la chaîne de traction**, un savoir-faire déjà largement éprouvé pour la mobilité électrique et les transports lourds. ABB est également un acteur du développement de **systèmes embarqués complets** pour les véhicules à pile à combustible, et s'appuie sur une expérience historique dans la marine pour accompagner les déploiements de technologies hydrogène pour la navigation fluviale et maritime.

La production d'électricité par pile à combustible pour tracter ou propulser les véhicules repose sur des capacités d'ingénierie, de conception, d'interfaçage et d'intégration entre la pile à combustible et la chaîne de traction. Participant au développement de systèmes complets, ABB est également constructeur des éléments-clés de la chaîne de traction et de l'électronique de puissance à bord.

Ce savoir-faire, en partenariat avec les constructeurs et équipementiers du secteur, permet de renforcer la compétitivité des véhicules à pile à combustible. L'expertise d'ABB s'appuie sur l'ensemble des usages de la mobilité décarbonée pour développer des solutions hydrogène alternatives ou complémentaires de la mobilité électrique, afin de favoriser un essor de la mobilité zéro émission.

Principaux défis, solutions et contribution d'ABB

Électrification des systèmes embarqués

Les systèmes hydrogène embarqués peuvent être décomposé comme suit :

- Le **stockage d'hydrogène à bord** doit pouvoir assurer la rapidité et la simplicité de la recharge, améliorer l'occupation d'espace à bord, tandis que les matériaux et l'assemblage des réservoirs doivent garantir étanchéité et résistance à des pressions élevées ;
- Les **piles à combustible** produisent de l'électricité sous forme de courant continu (DC) et nécessitent une plage de fonctionnement adaptée au système électrique embarqué ;
- Les **convertisseurs de puissance** (convertisseurs DC/DC) ajustent la tension de sortie de la pile à combustible et répondent aux besoins en charge ;
- Des **batteries électriques** sont incluses comme système d'ajustement dynamique et d'appoint ;
- Un **système global de gestion et de contrôle** de l'énergie à bord ;
- La **chaîne de traction** combine un convertisseur DC/AC et le moteur électrique.

L'architecture de l'électronique de puissance du système de pile à combustible aura un impact sur l'efficacité globale du véhicule. Elle implique des interdépendances entre le stockage d'énergie, la pile à combustible elle-même, la distribution en courant continu, les dispositifs auxiliaires, le moteur électrique et la chaîne de traction/propulsion.

Plusieurs technologies de piles à combustible sont disponibles, suivant les types de membranes : pile à combustible à membrane électrolyte polymère (PEMFC), alcaline (AFC), à oxydes solides (SOFC), à carbonate fondu (MCFC) etc. Les piles à combustible ont un rendement supérieur à celui des moteurs à combustion interne, avec une diminution modérée en fin de vie. Leur plage de fonctionnement optimal se situe entre 30 et 80%. La réactivité à faible puissance des piles à combustible peut être améliorée au moyen de supercondensateurs et de batteries, et leur efficacité par des systèmes d'humidification et une pression plus élevée. Enfin, l'efficacité énergétique globale des systèmes de pile à combustible peut être améliorée par la récupération de la chaleur fatale qu'elles dégagent.

	PEMFC	AFC	MCFC	SOFC
Oxydant	O ₂ /air	O ₂ /air	O ₂ /air	O ₂ /air
Efficacité (%)	50-60	50-60	55-65	55-65
Densité énergétique (kW/m ³)	3,8-6,5	1	1,5-2,6	0,1-1,5
Puissance (kW)	1-250	1-100	1 000-2 000	1-900
Température (°C)	60-200	65-200	600-650	650-1000

Comparaison des technologies de piles à combustible

Le convertisseur DC/DC est un élément-clé des systèmes de pile à combustible, notamment pour pallier les fluctuations de courant, de tension et une production d'énergie instable. L'efficacité d'un convertisseur DC dépend de la capacité à minimiser les pertes de conduction, par exemple en réduisant le nombre de composants et leur plage de fonctionnement, ainsi que les pertes de commutation. Le système de pile à combustible nécessitera également un convertisseur adaptant la tension de la pile à combustible au niveau de tension de charge souhaité.

Un onduleur est alors utilisé pour contrôler l'énergie de sortie (en courant alternatif) du moteur de traction. La chaîne de traction électrique devra veiller à réduire les facteurs de coût et de poids, éviter la surchauffe tout en offrant une puissance, une fiabilité et une durée de vie suffisantes.

Solutions et valeur ajoutée ABB

- Partenariat avec les principaux constructeurs de piles à combustible
- Capacité d'ingénierie, de conception et d'intégration des chaînes de traction
- ABB est constructeur des éléments clés de la chaîne de traction, tels que les convertisseurs de puissance, les convertisseurs auxiliaires, les packs batteries, les moteurs électriques
- ABB est constructeur de semi-conducteurs pour les applications en électronique de puissance
- La robotisation de la production des différents composants de nos chaînes de traction permet d'optimiser la qualité, la fiabilité et les coûts
- Notre savoir-faire s'appuie sur une expertise éprouvée dans les chaînes de traction électriques pour les trains, les bus, les navires maritimes ou fluviaux, les camions et engins spéciaux

Stratégies de contrôle : gestion de l'énergie à bord

Diverses stratégies de contrôle peuvent être mises en œuvre pour accroître l'efficacité du système de piles à combustible :

- Contrôle de la puissance de sortie ;
- Gestion des écarts de puissance et contrôle de la puissance entre la pile à combustible et la batterie ;
- Optimisation des niveaux de puissance entre les supercondensateurs et la batterie ;
- Gestion de l'énergie fournie par la pile à combustible et les systèmes de stockage.

L'intégration de systèmes embarqués multi-énergies peut constituer un défi : les systèmes hybrides peuvent combiner hydrogène et diesel, systèmes électriques à batterie etc. Ils deviennent alors un « micro-réseau embarqué ». Ils nécessitent une expertise avancée de chaque technologie, une interface entre elles, et la mise en œuvre de systèmes de contrôle intégrés. Il en résulte des interdépendances entre la conception du véhicule, son alimentation en énergie, son électronique de puissance et ses performances finales.

Solutions et valeur ajoutée ABB

- Capacité d'intégration des chaînes de traction pour tout type de mobilité (hors mobilités douces et véhicules légers), y compris interface avec les piles à combustible
- Maîtrise des systèmes de stockage embarqués par batteries
- Système de management de l'énergie et de l'électricité (EMS)
- Surveillance des équipements à distance et analyse des données pour une maintenance prédictive, des interventions planifiées et une assistance technique à distance
- Automatisation du pilotage pour l'optimisation de la performance de la chaîne de traction
- Formation sur l'utilisation sûre et efficace des véhicules

Focus sur les applications maritimes

Pour atteindre l'objectif de l'Organisation Maritime Internationale (OMI) de réduction des émissions du transport maritime d'au moins 50 % d'ici à 2050, le secteur des transports maritimes doit pouvoir envisager de multiples types de carburants alternatifs. Pour les armateurs et opérateurs, le défi consiste à envisager le large éventail d'alternatives disponibles pour sélectionner une solution la mieux adaptée aux besoins opérationnels. Le choix des carburants devra donc tenir compte des différences entre régions, demandes du marché, modes d'exploitation etc.

Ces évolutions coïncident avec une tendance générale à l'électrification de l'industrie maritime (de 5-6% il y a dix ans à environ 15% des navires aujourd'hui). Le système électrique des navires, intégrant les systèmes d'automatisation et de contrôle, transformera l'industrie en diversifiant les sources d'énergie disponibles au-delà des combustibles traditionnels, en y associant le GNL, les batteries, les piles à combustible, et en ouvrant la voie aux systèmes hybrides avancés.

ABB participe activement au développement des technologies de la pile à combustible pour la construction navale. La pile à combustible joue un rôle central pour l'accélération des solutions durables pour la mobilité marine décarbonée. Le principal avantage pour l'industrie maritime de cette technologie est son fonctionnement sans émission et une réduction des coûts de maintenance de la production électrique. Les piles à combustible ont un rendement supérieur à celui d'un moteur à combustion, et la technologie permet de concentrer l'énergie de manière plus dense que dans les combustibles fossiles.

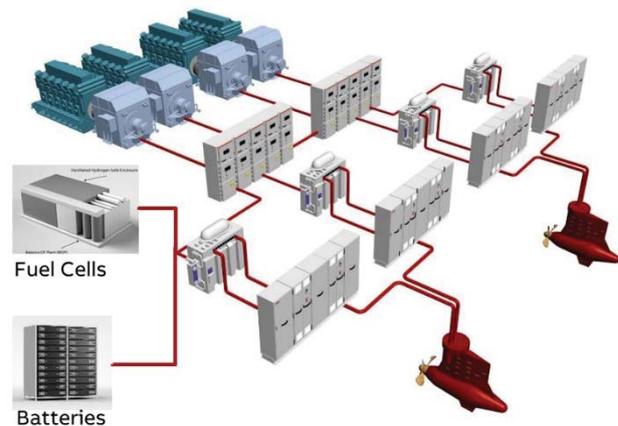
A titre d'exemple, ABB et Ballard Power Systems ont d'abord signé un protocole d'accord sur le développement de systèmes de piles à combustible de nouvelle génération pour l'industrie maritime. Le nouveau système d'alimentation par pile à combustible sera conçu, développé et validé conjointement par ABB et Ballard Power Systems, et devrait jouer un rôle important dans l'accélération de l'adoption par l'ensemble du secteur de solutions durables pour la mobilité marine décarbonée. Avec Ballard, ABB s'appuiera sur les technologies de piles à combustible existantes à l'échelle du kilowatt pour créer une solution pionnière à l'échelle du mégawatt, adaptée à l'alimentation des navires de plus grande taille. Avec une solution évolutive vers l'échelle du mégawatt, le nouveau système s'intégrera dans un module unique dont la taille ne sera pas supérieure à celle d'un moteur marin traditionnel fonctionnant aux combustibles fossiles. Un nouveau protocole d'accord vient d'être signé avec Hydrogène de France pour fabriquer conjointement des systèmes de piles à combustible de l'ordre du mégawatt capables d'alimenter des navires de haute mer.

A titre d'exemple, ABB et Ballard Power Systems ont signé un protocole d'accord sur le développement de systèmes de piles à combustible de nouvelle génération pour l'industrie maritime. Le nouveau système d'alimentation par pile à combustible sera conçu, développé et validé conjointement par ABB et Ballard Power Systems, et devrait jouer un rôle important dans l'accélération de l'adoption par l'ensemble du secteur de solutions durables pour la mobilité marine décarbonée. Avec Ballard, ABB s'appuiera sur les technologies de piles à combustible existantes à l'échelle du kilowatt pour créer une solution pionnière à l'échelle du mégawatt, adaptée à l'alimentation des navires de plus grande taille. Avec une solution évolutive vers l'échelle du mégawatt, le nouveau système s'intégrera dans un module unique dont la taille ne sera pas supérieure à celle d'un moteur marin traditionnel fonctionnant aux combustibles fossiles.

Les systèmes d'alimentation par pile à combustible peuvent être utilisés comme source d'énergie en combinaison avec des batteries ou des moteurs thermiques. Les piles à combustible peuvent être intégrées au système d'alimentation en courant alternatif ou au système ABBs Onboard DC Grid™, via un convertisseur DC/AC ou un convertisseur DC/DC. En outre, le système de pile à combustible peut être intégré à nos solutions numériques de contrôle, ainsi qu'à la surveillance de fonctionnement dans ABB Ability™.

Solutions et valeur ajoutée ABB

- Concepteur et intégrateur de systèmes de propulsion et de distribution électrique à bord des navires
- Offre complète de produits pour l'électrification des navires en basse tension et moyenne tension
- Modèles prédictifs pour la maintenance des équipements embarqués
- Assistance aux opérateurs pour l'exploitation optimisée des navires, notamment en ce qui concerne les équipements critiques
- Conformité des produits avec la plupart des organismes de certification maritime
- Solutions électriques, numériques et connectées pour les systèmes de propulsion à pile à combustible



Focus sur le projet FLAGSHIPS



Le projet FLAGSHIPS vise à démontrer la viabilité économique du transport maritime à zéro-émission basé sur l'hydrogène et les piles à combustible et à faciliter son acceptabilité sociale avec le déploiement de deux navires, l'un à Lyon (France) et l'autre à Stavanger (Norvège). Le projet représente une puissance totale de 1 MW installé de pile à combustible à bord des navires, associée à la production à quai d'hydrogène par électrolyse alimentée par des énergies renouvelables. À Lyon, le navire

sera un pousseur à hydrogène exploité par la Compagnie Fluvial de Transport (CFT) sur le Rhône. À Stavanger, l'hydrogène alimentera un ferry pour passagers et voitures exploité par Norled pour le transport local. Le projet implique également la création de réseaux de support technique européens, couvrant l'ensemble de la chaîne logistique de l'hydrogène, les compétences en conception et fabrication de navires ainsi qu'une large expertise réglementaire.

Le navire-pousseur de démonstration à Lyon opérera à la fois au sein du port de Lyon et sur le Rhône entre le port de Lyon et les docks de Fulchiron, ce qui représente une durée de fonctionnement prévisionnelle de 4 heures par jour et 1 200 heures par an. L'hydrogène certifié vert est produit par l'énergie hydroélectrique et fourni sous forme de gaz comprimé dans des modules interchangeable à 350 bars, ce qui représente une réduction des émissions de CO₂ de 80 tonnes par an.

ABB contribue aux spécifications, à la conception, à la construction, aux essais et à la mise en service du navire avec un système complet de pile à combustible avec système d'alimentation en courant continu et de propulsion :

- Piles à combustible de 400 kW de Ballard Power Systems ;
- Convertisseurs et moteurs de propulsion ;
- Gestion de l'énergie et de la puissance, contrôle des piles à combustible ;
- Intégration des piles à combustible ;
- Ingénierie des systèmes ;
- Stockage de l'énergie.



Installer et opérer des stations de recharge hydrogène

Catalyser des écosystèmes de mobilité durable

Collectivités et gestionnaires de flottes de véhicules ont un rôle central à jouer pour la mise en place des infrastructures de stockage, compression et distribution d'hydrogène. Levier majeur d'amélioration de la qualité de l'air et de diminution des émissions de gaz à effet de serre, elles initient la création de véritables écosystèmes énergétiques et de mobilité bas carbone.

Le déploiement d'une infrastructure de recharge est une condition essentielle de développement de la mobilité hydrogène. Dans une dynamique d'amorçage du déploiement de véhicules à pile à combustible, la mise en place et le financement d'une infrastructure de recharge dédiée s'appuie sur des démarches d'agrégation de la demande, en partenariat avec les utilisateurs. Collectivités et gestionnaires de flottes de véhicules, notamment pour les mobilités lourdes et intensives, peuvent catalyser la demande sur un territoire et initier la mise en place d'écosystèmes de mobilité durable.

Dans le contexte de l'exploitation de parcs de véhicules plus importants et de l'intégration dans des écosystèmes plus vastes de mobilité à faible teneur en carbone, le ravitaillement des véhicules doit de plus en plus s'appuyer sur des **solutions multi-énergies** qui peuvent faire appel à l'hydrogène, à l'électricité et au biogaz, afin de fournir le bon carburant pour le bon usage et de tirer parti des complémentarités entre les technologies.

Principaux défis, solutions et contribution d'ABB

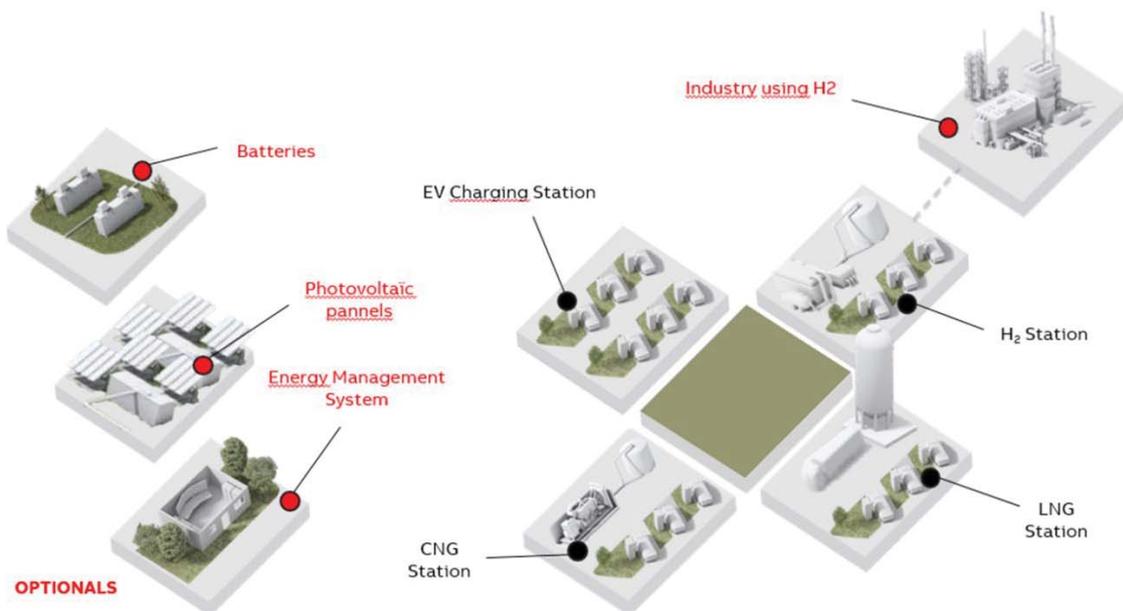
Les stations de recharge hydrogène (HRS) comprennent les dispositifs de compression à 350 bars et/ou 700 bars, de stockage basse pression et de stockage-tampon, de distribution d'hydrogène, ainsi que les systèmes de refroidissement, de contrôle et de sécurité de l'installation. La production d'hydrogène peut être réalisée sur site, ou l'hydrogène peut être acheminé en bouteilles ou tube trailers.

Les écosystèmes de mobilité durable étant de plus en plus tributaires de multiples voies d'approvisionnement en carburants alternatifs, les stations de ravitaillement multi-énergie peuvent faire office de « **hubs énergétiques** » et générer des gains globaux d'efficacité. **Optimiser la connexion au réseau** permet par exemple de tirer parti des complémentarités entre la demande d'électricité (volumes importants requis par la production d'hydrogène sur place, pics de demande pour la recharge électrique, compression de l'hydrogène et du biogaz) et les capacités de stockage de l'énergie, y compris avec le stockage sur batterie, afin de minimiser l'impact sur le réseau.

Les gestionnaires d'infrastructure de recharge peuvent également s'appuyer sur des **solutions logicielles** pour s'adapter aux exigences d'utilisation des véhicules, aux temps de recharge, et optimiser les coûts de production d'énergie ainsi que moduler la puissance globale de l'infrastructure de recharge.

Solutions ABB et valeur ajoutée ABB

- Gamme complète de produits, intégrables facilement et en toute sécurité dans les stations de recharge hydrogène
- Digitalisation des HRS (Hydrogen refueling stations) pour optimiser exploitation, maintenance, disponibilité
- Contribution aux stations « multi-énergies » avec des solutions de recharge électrique DC compatibles avec les HRS
- Optimisation de la connexion au réseau de l'infrastructure de recharge
- ABB Ability™ pour la gestion du réseau et du parc automobile, permettant des systèmes de paiement électronique, la surveillance et la maintenance à distance
- ABB a des années d'expérience dans la création, l'installation et la maintenance d'infrastructures de chargement pour les carburants alternatifs



Solutions de stations de charge

Défis pour le cycle projet

INGENIERIE	DEPLOIEMENT	OPERATION
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Production sur site / hors site ▪ Stratégies d'optimisation et de limitation de l'impact réseau ▪ Optimisation du stockage ▪ Conception de la station de recharge ▪ Ingénierie civile et électrique ▪ Système de sûreté et sécurité 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Identification du site et des conditions d'accès ▪ Connexion au réseau ▪ Achat des composants ▪ Préparation du site ▪ Construction de la station ▪ Installation & mise en service 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Supervision à distance et diagnostics ▪ Maintenance préventive et corrective ▪ Gestion de l'approvisionnement en hydrogène ▪ Gestion du site

Défis pour le cycle projet : Installation et opération de stations de recharge hydrogène

ABB est en mesure de vous accompagner efficacement dans toutes les étapes de vos projets.

L'hydrogène dans les ports



Les systèmes et services d'ABB aident les opérateurs d'infrastructures portuaires à relever le défi que représentent les navires plus grands, les grues plus hautes et les volumes transportés plus importants, et rendent les opérations portuaires plus sûres, plus durables et plus efficaces. Pour réduire l'impact environnemental des ports et tenir compte de réglementations toujours plus strictes en matière d'émissions, une réflexion nouvelle a conduit à l'émergence du concept de « Smart Port ». Il s'appuie sur le déploiement d'infrastructures portuaires intelligentes, de systèmes de connexion électrique à quai des navires et de solutions digitales pour améliorer la performance globale des installations.

Levier d'innovation pour la navigation maritime et fluviale, l'hydrogène peut contribuer plus largement au développement des activités portuaires par la production locale d'énergie bas carbone, le stockage dans les infrastructures portuaires et l'approvisionnement des opérateurs et des industriels, dans les complexes industriels à proximité du port. De l'alimentation des navires aux opérations portuaires, l'hydrogène et la pile à combustible ont toute leur place parmi les technologies du « Smart Port » pour contribuer à rendre les ports et les compagnies maritimes encore plus compétitifs, performants et durables.

Solutions ABB et valeur ajoutée ABB

- Systèmes de connexion électrique à quai des navires
- Solutions complètes d'électrification du port et de ses usages, notamment depuis le poste de transformation jusqu'au point de connexion du navire, et aux équipements électriques à bord
- Réseaux électriques intégrés et solutions d'automatisation pour passer d'un schéma d'exploitation portuaire traditionnel à un véritable concept de port intelligent ;
- ABB offre une interface unique pour l'électrification complète des ports et l'intégration au réseau, conformément aux spécifications techniques et aux normes en vigueur dans le monde entier ;
- Pour les armateurs, les opérateurs et les autorités portuaires, une solution ABB à guichet unique offre sécurité et disponibilité ;
- Connaissance et expérience approfondies des applications ;
- Une assistance complète tout au long du cycle de vie grâce au réseau mondial de services.



L'hydrogène au service de la chimie et des industries de transformation

Un moteur d'innovation industrielle

L'optimisation des procédés, l'assurance qualité et la réduction des coûts sont des objectifs incontournables des sites industriels. ABB est partenaire des industries historiques de l'hydrogène et accompagne les démarches d'innovation bas carbone de la chimie et des industries de transformation.

Avec plus de 60 millions de tonnes par an dans le monde, les industries chimiques et de raffinage du pétrole sont les principaux consommateurs d'hydrogène. L'hydrogène a une faible densité, une conductivité thermique élevée et des propriétés chimiques qui sont essentielles pour de multiples industries de transformation. Environ 55% de la production mondiale d'hydrogène est utilisée pour la synthèse de l'ammoniac, connue sous le nom de procédé Haber-Bosch, principalement pour la fabrication d'engrais. 25 % de l'hydrogène est utilisé dans les raffineries de pétrole pour la désulfuration, avec une croissance de la demande alimentée par la législation environnementale sur la teneur en soufre de l'essence et du diesel. Environ 10% de l'hydrogène est utilisé pour la production de méthanol, qui consiste en l'hydrogénation industrielle du monoxyde de carbone. L'approvisionnement en hydrogène de ces industries repose sur des technologies matures et des marchés bien établis, notamment avec des unités de production à grande échelle et sur site.

L'approvisionnement en hydrogène bas carbone, qui implique la combinaison de vaporeformage du méthane et de CCUS ou l'électrolyse, peut apporter une matière première, ce qui peut toutefois entraîner une augmentation des coûts dans les secteurs exposés à une concurrence sensible au prix. Par conséquent, les solutions d'hydrogène bas carbone dans l'industrie doivent assurer une rentabilité suffisante et une compatibilité complète avec les opérations des sites industriels.

Les procédés utilisant de l'hydrogène en industrie comprennent notamment :

- **Production d'ammoniac** : l'industrie de l'ammoniac (170 Mt/an) synthétise l'hydrogène et l'azote par le procédé Haber-Bosch, pour la fabrication d'engrais mais aussi de réfrigérants, de colorants, de fibres, de plastiques, d'explosifs, de nylon et d'acryliques. Le coût de l'énergie est le principal facteur de coût dans la production d'ammoniac, et provient principalement de la production d'hydrogène. La production d'ammoniac représente également 420 Mt annuelles d'émissions de CO₂, soit 1 % des émissions de CO₂ liées à l'énergie.
- **Production de méthanol** : le méthanol (CH₃OH) est produit par vaporeformage du gaz naturel ou gazéification du charbon associée à des réactions catalytiques pour combiner le monoxyde de carbone (CO) et le CO₂ avec l'hydrogène. Sa production mondiale représente 72 Mt par an et devrait tripler d'ici 2050. Le méthanol est principalement utilisé pour la fabrication de plastiques, de contreplaqués, de peintures, d'explosifs, de textiles et d'additifs pour l'essence. Une tonne de production de méthanol représente 1t_{CO2} lorsqu'elle est produite à partir de gaz naturel, et jusqu'à 3,5t_{CO2} à partir de charbon.
- **Raffinage du pétrole** : divers procédés d'hydrotraitement interviennent dans la transformation du pétrole brut en carburants raffinés, tels que l'essence et le diesel. Il s'agit notamment de la désulfuration, de l'isomérisation (amélioration des propriétés des produits paraffiniques), de la désaromatation et de l'hydrocraquage (production d'hydrocarbures à chaîne plus courte). L'hydrogène est généralement produit sur place par reformage, gazéification des résidus du raffinage du pétrole, récupération de gaz résiduels ou de gaz de synthèse.
- **Sidérurgie** : la principale méthode de production d'acier brut est la réduction du minerai de fer, qui consiste à fondre et à réduire les matières premières (minerai de fer, charbon et calcaire) ainsi que les matériaux recyclés dans un haut fourneau, puis à les envoyer dans un four à oxygène basique pour réduire la teneur en carbone, avant de les couler et de les laminier. Une autre méthode est la réduction directe, qui consiste à réduire le minerai de fer sous forme solide avec un gaz de synthèse composé de monoxyde de carbone et d'hydrogène, puis à le faire fondre dans un four à arc électrique avec de l'acier recyclé.
- Les **autres industries consommatrices** d'hydrogène sont les semi-conducteurs, l'aérospatiale (ergols liquides de moteurs-fusées), la production de verre, la transformation des aliments et le refroidissement des générateurs.

Principaux défis, solutions et contribution d'ABB

Accompagner la production d'hydrogène à grande échelle

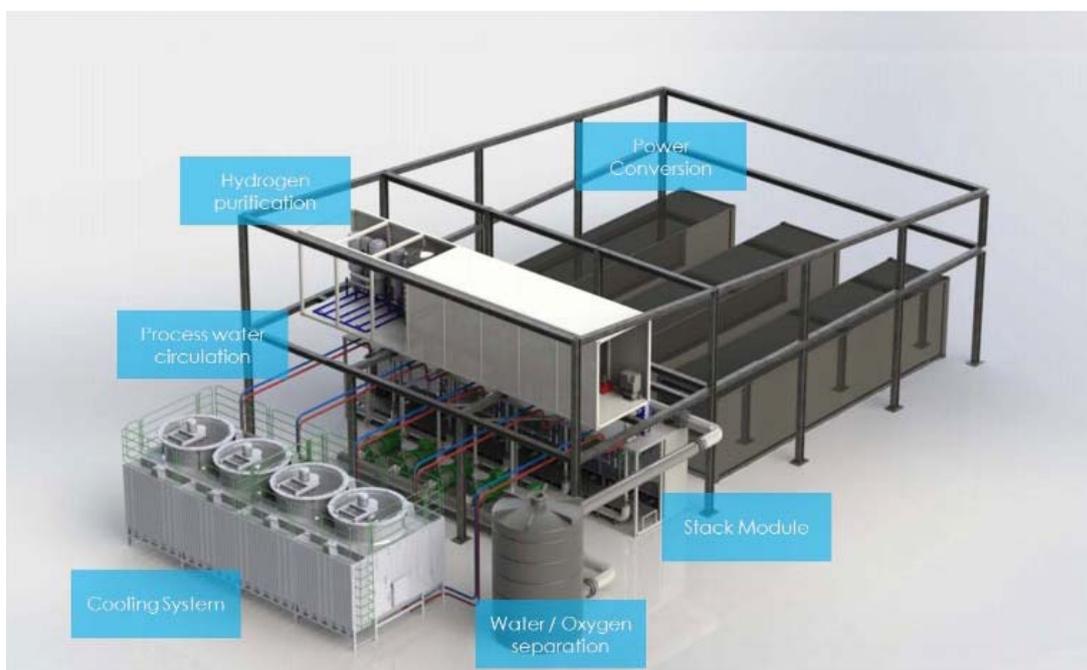
La production d'hydrogène pour une consommation à grande échelle dans l'industrie chimique et le raffinage provient principalement du vaporeformage du méthane, l'hydrogène étant produit sur place ou fourni par des pipelines dédiés. Les installations à plus petite échelle et utilisant de l'hydrogène hautement purifié, pour la transformation des métaux par exemple, sont généralement alimentées par cylindres et tube trailers. La mise en œuvre d'unités de production d'hydrogène par électrolyse, permet de renforcer la décarbonation des usages.

La production d'hydrogène fait appel à plusieurs étapes de transformation des gaz industriels : flux d'hydrocarbures, synthèse, combustion, émissions résiduelles, purification. L'instrumentation des procédés de production d'hydrogène doit s'adapter aux impuretés et à la corrosivité des gaz, et pouvoir opérer dans des conditions de sûreté adaptés aux environnements industriels. La mesure d'un grand nombre de composants présents dans les gaz industriels complexes à chaque étape peut également nécessiter l'utilisation de nombreux analyseurs différents, sélectionnés en fonction de l'application et du principe de mesure approprié.

De l'expertise et l'élaboration du projet, en passant par la gestion du projet et la fabrication du système jusqu'au service de formation et d'après-vente, ABB est un partenaire solide de la réalisation de projets industriels. S'appuyant sur une **expérience approfondie de l'analyse en procédés et de l'analyse en environnement industriel**, ABB propose des solutions répondant à l'ensemble de ces exigences. Les dispositifs proposés sont conçus pour s'intégrer les uns autres : modules d'analyse, affichages des modules et des unités de contrôle, alimentation électrique et systèmes d'échantillonnage. De tels modules d'analyse standardisés peuvent être adaptés et combinés au sein d'un même ensemble pour répondre aux exigences spécifiques de l'application. Les solutions connectées rendent le fonctionnement et l'entretien des analyseurs plus simples, par l'application de standards les reliant aux systèmes de supervision et de contrôle.

Solutions ABB et valeur ajoutée ABB

- Solutions pour l'instrumentation des procédés industriels
- Offre de produits et expertise pour la chromatographie en phase gazeuse
- Solutions d'analyse industrielle connectées
- Systèmes de contrôle du fonctionnement des installations
- Solutions de maintenance et de contrôle à distance
- Compréhension approfondie des spécifications des clients
- Interface entre l'instrumentation et le contrôle-commande
- Gain de performance d'exploitation et maintenance
- Accompagnement et optimisation des coûts de formation et de documentation
- Offre de maintenance et de services, ajustable à vos exigences



Unité de production d'hydrogène par électrolyse (Source Hiniçio)

Intégrer les cycles de production industrielle

Le cycle de consommation de l'hydrogène peut varier selon les applications industrielles : le traitement des métaux et le refroidissement des générateurs, par exemple, ont un taux de consommation d'hydrogène constant, tandis que la fabrication de semi-conducteurs et le raffinage du pétrole connaissent des pics de demande d'hydrogène. Ces différences dans les cycles de consommation auront un impact sur la conception de la solution d'approvisionnement en hydrogène.

Industrie	Échelle (t/an)	Fournir
Produits chimiques (ammoniac, méthanol)	60.000 à 300.000	Pipeline Reformage sur site
Raffinage du pétrole	7.000 à 300.000	Pipeline Reformage sur site
Traitement des métaux	40 à 800	Tube trailers, cylindres
Autres (semi-conducteurs, aérospatiale, verre, industrie alimentaire, refroidissement des générateurs)	< 200	Liquide, tube trailers, bouteilles, électrolyse sur place

L'hydrogène dans les applications industrielles (adapté du projet CertifiHy)

Les technologies de fabrication avancées, faisant appel à la fois aux technologies de l'information (IT) et aux technologies d'exploitation (OT), permettent d'adopter une **approche prédictive de la demande d'hydrogène et des signaux-prix de l'énergie**. L'unité de production peut alors connecter la planification de la production à l'optimisation des consommations d'énergie : cette démarche « Industrie 4.0 » permet des gains globaux de flexibilité opérationnelle et de performance.

La flexibilité repose sur des flux de données bidirectionnels entre le système de production d'hydrogène et les procédés industriels, gérés dans une interface d'optimisation unique. Dans le cas de la production d'hydrogène « vert », les exigences de production devront également assurer une capacité adéquate de l'électrolyseur, maximiser son facteur d'utilisation et gérer ses variations de charge.

La conception d'un système efficace d'approvisionnement en hydrogène devra intégrer les exigences en matière d'énergie et de procédés industriels, notamment :

- Approches prédictives de la consommation d'hydrogène, en anticipant les volumes et les cycles ;
- Optimisation du stockage avec un approvisionnement en flux tendus et du stockage-tampon pour les pics de demande ;
- Planification globale de la production
- Adaptation aux signaux-prix pour optimiser le coût de l'énergie ;
- Anticipation des pics de demande en hydrogène.

Solutions ABB et valeur ajoutée ABB

- Produits, solutions et services dans le contrôle/commande pour les industries de transformation,
- Logiciels de gestion des opérations de production (MOM) / système d'exécution de la production (MES)
- Interface homme / machine pour un fonctionnement en temps réel
- Interfaces de contrôle collaboratifs
- Intégration avec les équipements industriels existants
- Visibilité, flexibilité et performance accrues tout au long du processus de production.

Défis pour le cycle projet



Défis pour le cycle projet de l'hydrogène dans l'industrie

ABB est en mesure de vous accompagner à chaque étape de vos projets.

Focus sur le captage, stockage et/ou la valorisation de CO₂ (CCUS)

Les installations de captage, stockage et/ou valorisation de CO₂ (CCUS) en service représentent une capacité globale cumulée de 33 millions de tonnes par an. En collaboration étroite avec ses partenaires industriels et académiques, ABB propose des solutions pour les installations de captage, stockage et/ou valorisation de CO₂.

Solutions ABB et valeur ajoutée

- ABB a installé un système de contrôle ainsi que l'équipement d'instrumentation et d'analyse pour l'installation-pilote de captage de CO₂ de l'Imperial College (Royaume-Uni) ;
- ABB fournit également un système d'alimentation électrique et d'automatisation au Centre Technologique de Mongstad (Norvège), le plus grand centre de développement des technologies de captage de CO₂.



Assurer une logistique complète de l'hydrogène

Créer de la valeur à chaque étape

Assurer une planification de bout en bout du transport, du stockage et de la distribution d'hydrogène permet d'intégrer les exigences de chaque étape intermédiaire des chaînes d'approvisionnement en hydrogène et de s'adapter aux évolutions de l'économie hydrogène.

Un approvisionnement compétitif en hydrogène peut allonger considérablement la distance entre le lieu de production et d'utilisation. Du point de vue de la chaîne logistique, les propriétés physico-chimiques de la molécule d'hydrogène peuvent s'avérer être un véritable défi : l'hydrogène a une diffusivité élevée, une faible densité sous forme gazeuse et liquide et une plage d'inflammabilité étendue. L'énergie nécessaire pour comprimer, liquéfier ou convertir l'hydrogène, afin de le stocker et de le transporter, représente un pourcentage élevé de son contenu énergétique. Les volumes croissants d'utilisation de l'hydrogène peuvent donc nécessiter des modifications majeures des infrastructures pour adapter les chaînes d'approvisionnement :

- Approvisionnement centralisé en hydrogène : production dans de grandes stations centrales destinées à de vastes marchés régionaux, nécessitant un transport sur de longues distances (y compris par pipeline, par voie maritime et sur route) et des capacités importantes de distribution ainsi que de stockage intermédiaire ;
- Approvisionnement décentralisé en hydrogène : production d'hydrogène à petite échelle sur le site de l'utilisateur, nécessitant un stockage et une gestion concentrés au point d'approvisionnement.

Un stockage intermédiaire est également nécessaire sur les sites de production pour compenser les variations de l'offre et de la demande, le long des pipelines, et dans les installations de distribution telles que les stations de recharge en hydrogène pour la mobilité.

L'hydrogène doit être surveillé et mesuré, ce qui nécessite des capteurs sophistiqués et des logiciels automatisés, et doit pouvoir être acheminé de façon efficace et sûre, y compris sur de vastes distances. ABB fournit des solutions pour l'intégralité de la chaîne d'approvisionnement en hydrogène, y compris la production, la purification, la compression, la liquéfaction, le traitement, le transport, le stockage et la distribution.

Principaux défis, solutions et contribution d'ABB

Effacité du système

L'hydrogène doit être transformé pour atténuer sa faible densité énergétique volumique et le rendre stockable et transportable, ce qui entraîne toutefois des pertes de conversion. Les techniques de conversion pour assurer la logistique de l'hydrogène sont les suivantes :

- **Compression** : la pressurisation de l'hydrogène gazeux (GH₂) permet son stockage et son transport dans des installations dédiées (l'énergie électrique nécessaire pour comprimer l'hydrogène à 350 bars représente 4 à 8 % de son contenu énergétique, en fonction de la pression initiale) :
 - Tube trailers : l'hydrogène est comprimé dans des cylindres métalliques qui sont empilés sur une remorque pour le transport routier. Cela nécessite une résistance suffisante des matériaux pour supporter les pressions élevées, avec un impact sur le poids des tubes ;
 - Pipelines : des réseaux de pipelines dédiés à l'hydrogène relient les sites de production et de consommation d'hydrogène à grande échelle. Les plus importantes se trouvent aux États-Unis (environ 2 600 km) et en Europe (environ 1 600 km).
 - Stockage dans des cavités souterraines, dans des réserves de pétrole épuisées et en cavité saline.
- **Liquéfaction cryogénique** à -253°C pour obtenir de l'hydrogène liquide (LH₂) : la liquéfaction et le stockage de l'hydrogène peuvent représenter jusqu'à 40 % de son contenu énergétique, mais permettent de transporter l'hydrogène sur de longues distances, y compris par voie maritime ;
- **Transfert sur un porteur d'hydrogène (hydrogénation)** : l'hydrogène est transféré sur un porteur tel que l'ammoniac liquide (NH₃), le méthanol liquide, les liquides organiques porteurs d'hydrogène (LOHC) ou le méthyl cyclohexane (MCH) utilisé dans un projet de transport d'hydrogène du Brunei vers le Japon. Le transfert peut augmenter considérablement la densité énergétique volumique par rapport à l'hydrogène liquide, mais avec une efficacité énergétique qui dépend largement du processus de déshydrogénation. Le stockage solide par absorption sous pression dans des alliages métalliques est également à l'étude, mais reste actuellement à l'échelle expérimentale.

En complément des procédés de conversion proprement dits, l'efficacité énergétique de l'approvisionnement en hydrogène peut être améliorée par la sélection des équipements auxiliaires, tels que le traitement de l'eau, les compresseurs et les convertisseurs d'énergie, ainsi que l'adaptation de la capacité des composants des installations de stockage.

ABB fournit un savoir-faire unique en solutions d'automatisation, d'entraînement, de mesure et de contrôle pour toutes les étapes de la logistique de l'hydrogène. Les produits innovants d'ABB offrent des solutions intelligentes et performantes conformes à toutes les réglementations environnementales et métrologiques pour transporter et stocker l'hydrogène de manière fiable et précise.

Solutions ABB et valeur ajoutée ABB

- Instrumentation : mesure du débit, de la température, de la pression, mesure analytique, mesure du niveau
- Automatisation des vannes
- Entraînements pour les processus de compression et liquéfaction
- Systèmes de gestion des flux de transport de l'hydrogène
- Systèmes de contrôle/commande et de supervision, intégrant les exigences de cybersécurité
- Automates de sécurité
- Optimisation des consommations d'énergie à chaque étape
- Expertise en normes de conformité environnementale et métrologique

Développer les infrastructures et gérer la logistique

La croissance de la demande d'hydrogène entraîne des évolutions dans la logistique de l'hydrogène, impliquant le développement de systèmes d'approvisionnement décentralisés (production sur site, par exemple avec des reformeurs de gaz naturel ou des unités électrolytiques) et l'approvisionnement en hydrogène multi-utilisateurs. Dans cette perspective, le rapport de l'AIE « The Future of Hydrogen » formule quatre recommandations sur le développement des infrastructures pour stimuler l'économie de l'hydrogène :

- Faire des ports industriels les centres névralgiques du développement de l'hydrogène propre ;
- Tirer parti du réseau de gazoducs existant ;
- Développer l'hydrogène pour la mobilité par le biais de flottes de véhicules, du fret et des corridors de Transport ;
- Lancer les premières routes maritimes internationales du commerce de l'hydrogène.

Les solutions logicielles de gestion des opérations d'ABB impliquent l'utilisation de données en temps réel et de nouvelles technologies permettant d'interfacer chacune des fonctionnalités ou des technologies, afin d'optimiser la chaîne d'approvisionnement en hydrogène. Nous proposons une gamme complète de solutions pour le développement et la gestion des infrastructures de logistique de l'hydrogène : équipements, terminaux et centres de stockage, pipelines et moyens de transport. Nous intégrons toutes les exigences de sécurité de manière à garantir la santé et la sécurité de tous les personnels concernés, et à répondre à la fois aux réglementations environnementales et à vos besoins.

Les systèmes de contrôle d'ABB ainsi que les solutions d'instrumentation d'ABB fournissent des installations de surveillance des actifs pour aider les opérateurs à gérer les installations de stockage et de transport afin d'augmenter la productivité et de réduire la consommation d'énergie. ABB fournit également des logiciels pour la gestion opérationnelle des équipements, la gestion des actifs et des effectifs, le contrôle avancé et l'optimisation de toute la chaîne d'approvisionnement en hydrogène, y compris la production, le traitement, le transport, le stockage et la distribution.

Solutions ABB

- Infrastructure électrique, depuis l'appareillage jusqu'aux équipements intégrés en cabines préfabriquées ou aux sous-stations
- Automatisation et contrôle à distance des installations de stockage
- Système de supervision des actifs
- Compresseurs et stations de pompage
- Surveillance de la sécurité des unités de stockage
- Systèmes de détection des fuites
- Solutions logicielles pour la gestion des actifs, la maintenance prédictive ou le pilotage des interventions
- Solutions logicielles de gestion des opérations en temps réel
- Capacité à intégrer et à optimiser la chaîne d'approvisionnement en hydrogène

En savoir plus sur la conversion de l'ammoniac

La conversion de l'ammoniac représente une voie prometteuse pour l'approvisionnement en hydrogène, car elle peut être plus compétitive que le transport et le stockage du GH_2 ou du LH_2 et s'appuie sur une industrie existante de l'ammoniac à grande échelle. L'hydrogène est extrait de l'ammoniac par catalyse séparant l'azote et l'hydrogène, combinée à une membrane. L'ammoniac (NH_3) a une densité énergétique supérieure à celle de l'hydrogène cryogénique (15MJ/l, contre 10 MJ/l) et contient donc « plus d'hydrogène que l'hydrogène ». Le stockage et l'expédition de l'ammoniac nécessitent une compression ou un refroidissement, mais avec des procédés plus simples que pour l'hydrogène comprimé ou liquéfié :

- Stockage** : l'ammoniac est liquéfié à -33°C , ou à 20°C à une pression inférieure à 1MPa. L'ammoniac à basse température permet un stockage à grande échelle à $40t_{\text{NH}_3}$ par tonne d'acier. Le stockage de l'ammoniac a également un rendement énergétique beaucoup plus élevé que celui de l'hydrogène : l'énergie chimique stockée dans l'hydrogène liquide représente 77% des énergies chimique et électrique fournies, contre 99% pour l'ammoniac (94% si l'on tient compte également de l'énergie nécessaire à sa synthèse).
- Transport** : l'ammoniac ayant une densité énergétique volumétrique plus élevée que l'hydrogène, il est également moins coûteux à transporter, que ce soit par camion-remorque, par bateau ou par pipeline.

Défis pour le cycle projet

INGENIERIE	CONSTRUCTION	OPERATION
<ul style="list-style-type: none"> Ingénierie d'avant-projet : Front-end engineering design (FEED) Planification 	<ul style="list-style-type: none"> Evaluation du site Agrément réglementaire / permis d'injection Achat des équipements et construction Installation et mise en service 	<ul style="list-style-type: none"> Gestion des cycles de stockage Gestion du système de transport Système d'approvisionnement / de fourniture d'hydrogène

La logistique de l'hydrogène : défis pour le cycle projet

Focus sur le projet Hydrogen Energy Supply Chain (HESC)



Transport d'Hydrogène liquide

Le **projet pilote Hydrogen Energy Supply Chain (HESC)** vise à produire de manière sûre et efficace de l'hydrogène propre en Australie et à le transporter au Japon, dans le cadre de l'un des premiers efforts mondiaux de commercialisation à grande échelle de la technologie de liquéfaction et de transport de l'hydrogène. Le projet vise à tester la production d'hydrogène par gazéification de lignite, la liquéfaction de l'hydrogène, son stockage et son chargement sur le premier transporteur spécialisé au monde. Son transport à travers l'Asie-Pacifique implique des réservoirs de navire d'une capacité de 1 250m³. La construction des installations pilotes en Australie a commencé en 2019, pour un début d'exploitation pilote en 2020. ABB fournira des solutions d'électrification, d'instrumentation et d'automatisation pour le projet :

- En **Australie**, ABB alimentera le terminal de liquéfaction et de chargement d'hydrogène du port de Hastings : fourniture et intégration d'équipements électriques, notamment des tableaux de distribution et de commutation BT, équipements pour l'alimentation électrique et de gestion de la qualité de l'alimentation électrique, services d'ingénierie, de gestion de projet et de mise en service, instrumentation, moteurs et réducteurs.
- Au **Japon**, ABB fournira un système d'automatisation et de sécurité pour le terminal de réception d'hydrogène liquide à Kobe, en s'appuyant sur sa grande expertise dans le domaine des terminaux GNL.



Développer le Power-to-Gaz

Injecter l'hydrogène en réseau gazier

L'hydrogène est un levier de valorisation et de décarbonation des actifs gaziers. Il permet une pénétration accrue des énergies renouvelables et l'optimisation de l'utilisation des réseaux, tout en requérant une adaptation des équipements de stockage, transport, distribution et usage aval de gaz pour assurer la fiabilité des systèmes.

Les infrastructures gazières transportent l'énergie sur de longues distances vers les zones urbaines et industrielles, en grande quantité et avec des pertes très faibles. Elles présentent une capacité massive de stockage inter-saisonnier et disposent d'une certaine flexibilité aux variations de l'offre et de la demande grâce au réglage de la pression. L'injection d'hydrogène dans le réseau de gaz permet d'assurer une nouvelle source d'approvisionnement à faible teneur en carbone. Trois voies d'injection sont envisageables : en mélange à 6% (ou à des taux supérieurs jusqu'à 20%, avec adaptation des spécifications gaz), par méthanation et en injection 100% hydrogène.

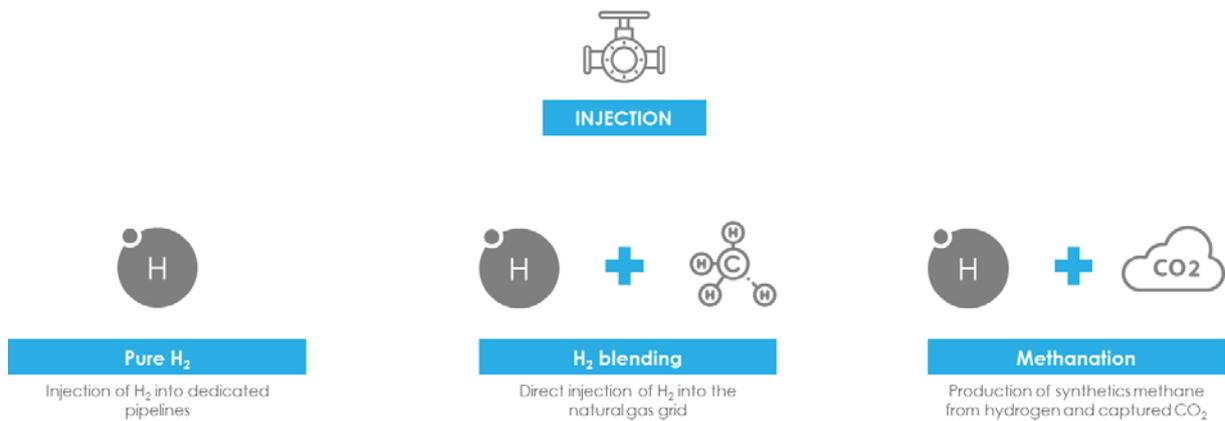
Le couplage entre systèmes électrique et gazier permet d'accroître la pénétration d'énergie renouvelable dans le système énergétique et d'optimiser l'usage des réseaux d'énergie. De nombreux projets démontrent la faisabilité des mélanges d'hydrogène et de gaz naturel :

Projet	Résumé	Pays
GRHYD	Démonstration de mélanges d'hydrogène et de gaz naturel dans des stations de ravitaillement, un parc de 50 bus et dans l'approvisionnement de bâtiments résidentiels	France
JUPITER 1000	Injection jusqu'à 5 % d'hydrogène dans le réseau de transport de gaz	France
NATURALHY	Etude de l'opportunité d'utiliser les infrastructures existantes d'acheminement du gaz naturel pour le transport et la distribution d'hydrogène	Pays-Bas
HYDEPLOY	Démonstration d'un mélange hydrogène-gaz naturel dans un réseau de gaz privé	Royaume-Uni
H21 LEEDS	Analyse de faisabilité de la conversion vers l'hydrogène du réseau de gaz naturel qui alimente la ville de Leeds	Royaume-Uni
HYREADY	Recommandations et bonnes pratiques pour préparer les réseaux de gaz naturel à l'injection d'hydrogène	Dans toute l'Europe

Projets démonstrateurs Power-to-Gas pour injection dans le réseau

L'injection d'hydrogène crée toutefois plusieurs défis pour les réseaux gaziers : ils doivent démontrer une capacité et un pouvoir calorifique suffisants, éviter les pertes, garantir l'efficacité et l'adéquation des équipements pour l'hydrogène (gazoducs, vannes de sectionnement, compresseurs, instrumentation, etc.). Ces défis se présentent à plusieurs niveaux :

- Système de transmission à haute et moyenne pression ;
- Système de distribution ;
- Installations chez les utilisateurs finaux (domestiques et industriels) ;
- Conception de la station d'injection d'hydrogène (contrôle de l'injection d'hydrogène).



Différentes solutions d'injection d'hydrogène dans le réseau de gaz (Source Hinioco)

ABB propose une vaste gamme de solutions assurant la tolérance et la performance des équipements amont et aval à une injection d'hydrogène pour le développement du Power-to-Gaz.

Principaux défis, solutions et contribution d'ABB

La valorisation d'hydrogène dans les infrastructures gazières doit assurer des performances techniques et économiques permettant de protéger les infrastructures gazières elles-mêmes ainsi que les utilisateurs finaux du gaz. Les canalisations en acier doivent pouvoir supporter des taux d'hydrogène élevés, le cas échéant au moyen d'un revêtement interne, pour empêcher la perméation de l'air, la fragilisation des métaux et les fuites d'hydrogène.

Le mélange d'hydrogène et de méthane modifie les propriétés du gaz transporté et doit être compatible avec les équipements du réseau : compresseurs, unités de déshydratation/désulfuration, détendeurs, etc. C'est également un enjeu de fiabilité pour les utilisateurs finaux : le mélange doit être compatible avec les procédés des consommateurs, essentiellement dans le secteur industriel. Enfin, le mélange d'hydrogène et de gaz naturel doit faire l'objet de méthodes de comptage validées, pour assurer une mesure précise de la composition et du débit avec des équipements de comptage certifiés : compteurs, convertisseurs, chromatographes.

Solutions et valeur ajoutée ABB

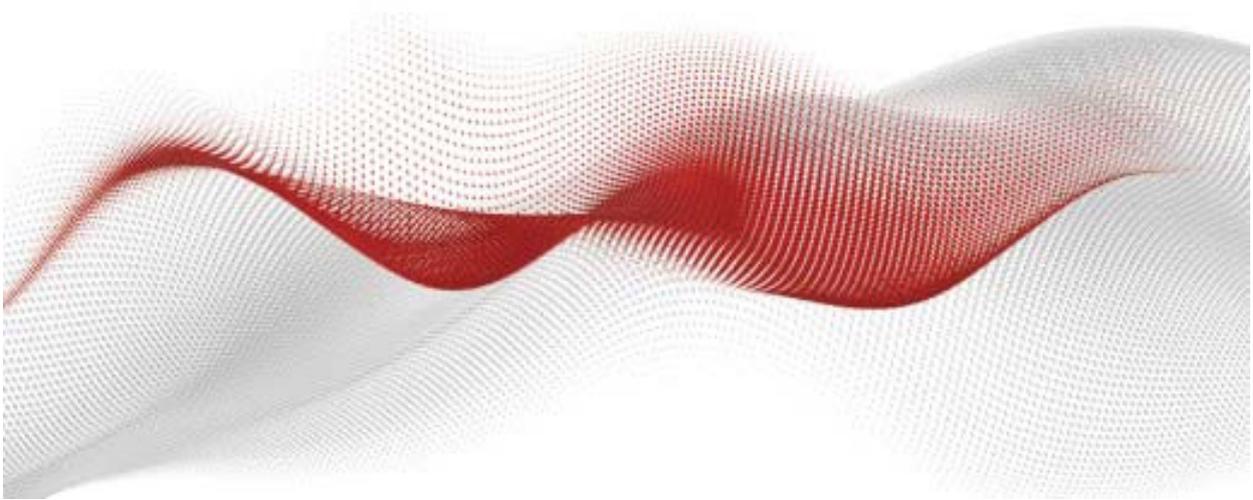
- Analyseurs de gaz, stations de comptage, analyseurs PCS et solutions de comptage transactionnel
- Systèmes d'automatisation du traitement des gaz (injection/mélange/séparation)
- Équipement de réseau (compresseurs, stations de pompage, vannes, robinets, etc.)
- Systèmes d'automatisation pour la surveillance et la gestion des pipelines
- Technologies d'automatisation pour les industries énergétiques
- Compétences et outils pour l'ingénierie, l'exploitation et la maintenance
- Solutions logicielles intégrées pour la gestion des actifs
- Systèmes de comptage certifiés, adaptées aux mélanges de gaz naturel et d'hydrogène

Défis pour le cycle projet



Le Power-to-Gaz : Défis pour le cycle projet

ABB est en mesure de vous accompagner à chaque étape de vos projets.



A propos d'ABB

Energie et Automation, nos compétences au service du développement et de la compétitivité de la filière hydrogène bas carbone.

ABB est un leader des technologies de pointe qui accompagne les industries dans leur transition énergétique et leur transformation digitale. Fort d'un héritage de plus de 130 ans d'innovation et 147 000 collaborateurs dans le monde. ABB possède cinq champs d'expertise, représentés par ses Business :



Electrification offre un large éventail de produits, de solutions numériques et de services, de la sous-station à l'appareillage modulaire, permettant une électrification sûre, intelligente et durable. L'offre comprend des innovations numériques et connectées pour la basse et moyenne tension, notamment l'infrastructure des véhicules électriques, les onduleurs solaires, les sous-stations, l'automatisation de la distribution électrique, la protection de l'énergie, les accessoires de câblage, les appareillages de commutation, les boîtiers, le câblage, la détection et le contrôle.



Industrial Automation offre un large éventail de solutions pour les industries de procédés et les industries hybrides, y compris l'automatisation intégrée spécifique à l'industrie, l'électrification et les solutions numériques, les technologies de contrôle, les logiciels et les services avancés, ainsi que les mesures et les analyses, et les offres marines et de turbocompression. En étroite collaboration avec ses clients, l'activité Automatisation industrielle d'ABB écrit l'avenir des opérations sûres et intelligentes.



Motion est le plus grand fournisseur d'entraînements et de moteurs au monde. Nous fournissons à nos clients une gamme complète de moteurs électriques, de générateurs, d'entraînements et de services, ainsi que des produits de transmission mécanique de puissance et des solutions intégrées de transmission numérique de puissance. Nous servons un large éventail d'applications d'automatisation dans les transports, les infrastructures et les industries de transformation et les industries discrètes.



Robotics & Discrete Automation fournit des solutions à valeur ajoutée en matière de robotique, de machines et d'automatisation industrielle. Nos solutions d'automatisation intégrées, notre expertise en matière d'applications dans un large éventail de secteurs et notre présence mondiale apportent une valeur ajoutée tangible aux clients. L'accent que nous mettons sur l'innovation comprend des travaux approfondis sur l'intelligence artificielle, un écosystème de partenariats numériques et l'expansion de nos capacités de production et de recherche.



Power Grids propose des produits, des systèmes, des services et des solutions logicielles dans le domaine de l'énergie et de l'automatisation tout au long de la chaîne de valeur de la production, du transport et de la distribution de l'électricité. Le portefeuille de technologies comprend des solutions d'intégration au réseau, de transmission, de distribution et d'automatisation, ainsi qu'une gamme complète de produits et de transformateurs haute tension. ABB a été le pionnier de la technologie HVDC il y a plus de 60 ans et se retrouve sur la moitié du parc mondial de réseaux HVDC installés. ABB est le plus grand fabricant de transformateurs au monde et un leader dans le domaine des produits haute tension et des solutions pour les postes électriques.



Les activités mondiales d'ABB sont soutenues par la plateforme digitale **ABB Ability™**, l'offre numérique unifiée et multi-sectorielle disponible dans le cloud et offre un continuum de services entre les systèmes et les objets connectés. Ces solutions connectées au sein d'une plateforme numérique fournissent des informations sur les données, il est ainsi possible d'en savoir plus, d'en faire plus et d'améliorer l'ensemble des opérations.

Les experts et scientifiques d'ABB innovent en permanence une large gamme de produits, de systèmes et de services qui augmentent l'efficacité énergétique, la fiabilité et la productivité de nos clients industriels et des infrastructures.

Consciente que développement économique et consommation d'énergie sont fortement liés, ABB France œuvre au quotidien pour limiter l'impact carbone et les conséquences environnementales de l'activité humaine en :

- Améliorant l'efficacité énergétique et le rendement des systèmes ;
- Développement des solutions de gestion active de l'énergie ;
- Proposant des solutions de stockage et pilotage de la flexibilité ;
- Facilitant l'apport d'énergie nouvelle et décarbonée dans le mix électrique ;
- Contrôlant les émissions et rejets dans l'atmosphère ;
- Accéléralant les usages possibles de l'électricité bas carbone dans l'industrie, les bâtiments et la mobilité terrestre, maritime et fluviale.

Glossaire

AC	<i>Alternating Current</i> , Courant alternatif
ADEME	Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie
AFHYPAC	Association Française pour l'Hydrogène et les Piles à Combustible
ATR	<i>Autothermal reforming</i> , Reformage autotherme
BESS	<i>Battery Energy Storage System</i> , Système de stockage d'énergie par batterie
BOP	<i>Balance of Plant</i> , Equipements auxiliaires électriques et mécaniques
CO₂	Dioxyde de carbone
CAPEX	<i>Capital Expenditure</i> , Dépenses d'investissement
CCS, CCUS	<i>Carbon Capture, Utilisation and/or Storage</i> , Captage, stockage et/ou valorisation de CO ₂
DC	<i>Direct Current</i> , Courant continu
DCS	<i>Distributed Control System</i> , Système numérique de contrôle/commande
EMS	<i>Energy Management System</i> , Système de Management de l'Energie
EnR	Energies renouvelables
EPC	<i>Engineering, Procurement and Construction</i> , Ingénierie, approvisionnement et construction
EU ETS	<i>EU Emissions Trading Scheme</i> , Système d'échange de quotas d'émission de l'Union européenne
FCEV	<i>Fuel Cell Electric Vehicle</i> , Véhicule électrique à pile à combustible
FCH JU	<i>Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking</i> , partenariat public-privé européen sur l'hydrogène et la pile à combustible
GES	Gaz à Effet de Serre
GH₂	Hydrogène gazeux
GRD	Gestionnaire du Réseau de Distribution
GRT	Gestionnaire du Réseau de Transport
H₂	(di-)Hydrogène
HRS	<i>Hydrogen Refuelling Station</i> , Station de recharge hydrogène
HSE	Hygiène, Sécurité, Environnement
HVDC	<i>High Voltage Direct Current</i> , Courant Continu Haute Tension
IT	<i>Information Technology</i> , Technologie de l'information
LCoH	<i>Levelised Cost of Hydrogen</i> , Coût actualisé de l'hydrogène
LH₂	Hydrogène liquide
LOHC	<i>Liquid Organic Hydrogen Carrier</i> , Liquide organique porteur d'hydrogène
OPEX	<i>Operational expenditure</i> , Dépenses d'exploitation
OT	<i>Operation Technology</i> , Technologie d'exploitation
PEM	<i>Proton Exchange Membrane</i> , Membrane à échange de protons
PLC	<i>Programmable Logic Controller</i> , Automate programmable industriel
R&D&I	Recherche, développement et innovation
PAC	Pile à Combustible
PIIEC	Projets Importants d'Intérêt Européen Commun
PPE	Programmation Pluriannuelle de l'Energie
SOEC	<i>Solid Oxide Electrolyzer Cell</i> , Electrolyseur à oxyde électrolyte solide
SOFC	<i>Solid Oxide Fuel Cell</i> , Pile à combustible à oxydes solides
SCADA	<i>Supervisory Control And Data Acquisition</i> , Système de contrôle et d'acquisition de données en temps réel
TCO	<i>Total Cost of Ownership</i> , Coût total de possession
UE	Union européenne

Annexes

Annexe 1 : Aperçu du cadre réglementaire européen

Secteur	L'outil législatif de l'UE	Cible	Le rôle de l'hydrogène
Transport	Directive sur les énergies renouvelables II (RED II) Normes d'émission de CO ₂ pour les véhicules utilitaires légers et lourds Directive sur les véhicules propres Directive sur les infrastructures pour les carburants alternatifs	Réduction du CO ₂ , des particules fines, des NOx et des SOx Intégration des énergies renouvelables	H ₂ comme carburant Combustibles à base de H ₂ H ₂ renouvelable dans les raffineries
Industrie	Système communautaire d'échange de quotas d'émission (EU ETS)	Décarbonisation	L'hydrogène renouvelable/bas carbone comme matière première
Gaz/chauffage	Directive sur les énergies renouvelables II (RED II) (<i>à venir</i>) Règlement sur le gaz	Décarbonisation (GRT-GRD) Intégration des EnR	Hydrogène renouvelable / à faible teneur en carbone comme matière première Pile à combustible comme convertisseur d'énergie
Power	Directive sur les règles communes pour le marché intérieur de l'électricité Règlement sur le marché intérieur de l'électricité	Stockage / services auxiliaires Intégration des énergies renouvelables	Électrolyseurs à réaction rapide + Intégration sectorielle

Aperçu du cadre réglementaire européen (adapté de Hydrogen Europe)

Annexe 2 : Valeur indicative des autres énergies

	Unité	Valeur basse	Valeur haute
Mobilité			
Essence (sans taxes)	€/100 km	2,7	4,2
Essence (taxes comprises)	€/100 km	6,6	9,1
Éthanol	€/100 km	3,8	4,6
BioCNG	€/100 km	5,6	12,6
Injection en réseau de gaz			
Vente en gros de gaz naturel	€/MWh _{HHV}	22,0	47,8
Coût de production du biométhane	€/MWh _{HHV}	62,1	103,4
Chaleur industrielle			
Gaz naturel	€/MWh _{th}	32,7	62,3

Valeur marchande indicative des vecteurs énergétiques alternatifs (Source : ENEA)

Annexe 3 : Variables de coûts indicatives

Catégorie	Processus	Unité	Valeurs indicatives	Variables
Electrolyse	CAPEX de l'électrolyseur	€/kWel	(AEL) 800-1700 (PEM) 1300-3200	Facteur de charge Durée de vie (AEL 20-30 ans, PEM 10-30 ans) Puissance (MW) Efficacité (LHV) 60-70% Taux d'utilisation (heures de fonctionnement annuel)
	OPEX de l'électrolyseur - Coût de l'électricité (moyenne UE hors taxes)	€/MWh	80	Consommation d'énergie (50-65 kWh/kgH2) Prix de l'électricité Taxes, redevances et prélèvements sur le réseau (moy. 30 % dans l'UE) Optimisation de la consommation en temps réel
	OPEX fixe - O&M	%/an	2-4	Coût du travail
	OPEX - Coûts de remplacement des stacks	%/an	1	Dégradation des stacks Coût de remplacement des piles (en O&M ou remplacement après 10 ans)
	Compression et dispenser	€/kg	0.9-1.75	Pression d'entrée Pression de sortie (AEL : 15 bar ; PEM : 30 bar) Capacité du compresseur Consommation d'énergie
Alimentation électrique des électrolyseurs	CAPEX alimentation électrique (transformateur, redresseur, qualité de l'énergie)	€k	300+	Autorisations Frais de raccordement au réseau Transformateurs Câblage des lignes HT (100 k€/km) Génie civil Centrale électrique EnR "captive" (convertisseur DC-DC monodirectionnel uniquement) Pertes des transformateurs (2,5%) Architecture de l'électronique de puissance Solutions pour la qualité de l'énergie (filtre harmonique, compensation du facteur de puissance)
Vaporeformage du méthane	CAPEX reformeur	€/kWel	600-1300	Capacité (450-500t/jour) Efficacité du reformage Heures d'opération annuelles Durée de vie Unité autonome ou intégration dans un complexe industriel Purification
	O&M fixe	%/an	3-4	Coûts du travail
	Variable O&M	%/an	18	Coût du gaz naturel (6 €/GJ) : 70% OPEX Coût du CO ₂ Coûts de l'électricité
	SMR+CCUS	€/MWh	39-63	Taux de capture (<90%) CCUS en précombustion/postcombustion Dégradation Coût du CO ₂ Densité du CO ₂
ATR	ATR+CCS	€/MWh	36-56	Capacité Taux de capture du CCUS (<95%) Coût du CO ₂
Transport et stockage du CO₂	Transport et stockage du CO ₂	€/tCO ₂	6-20	Champs de gaz et aquifères salins (onshore/offshore)
Stockage	(GH2) Stockage stationnaire CAPEX	€/kg	470	Pression (700 bar, jusqu'à 1000 bar) Capacité (10 GJ)
	(GH2) Tube trailer CAPEX	€/kg	500-800	Pression (200/500 bars) Capacité (60 m3)
	(GH2) Stockage en cavité saline CAPEX	€/GJ	180	Pression (100-250 bar) Capacité (10 000 tonnes)
	(GH2) Champ de gaz CAPEX	€/GJ	30	Pression (100-250 bar) Capacité
	(LH2) Stockage cryogénique CAPEX	€/GJ	1 300	Liquéfaction à petite/moyenne échelle
Transport de l'hydrogène	Trailer, comprimé (100 km)	€/kg	<2.2	Pression (250 kg@190 bar, 800 kg@350 bar) Durée de vie des camions (12 ans) Coûts du carburant
	Transport liquide	€/kg	0.13	Capacité (400-4000 kg) Pertes Coûts de ravitaillement en H2 Durée de vie des camions (12 ans)
	Pipeline onshore CAPEX	€/kg	0.48	Diamètre / Capacité (3000-4200 kg/h) Pression (10-20 bar) Durée de vie
	Pipeline offshore CAPEX	€/kg	0.96	Diamètre / Capacité Pression Durée de vie

Catégorie	Processus	Unité	Valeurs indicatives	Variables
Station de recharge hydrogène (HRS)	Pipeline OPEX	%/an	3	Consommation d'électricité
	HRS CAPEX	€k	600-2500	Approvisionnement (sur place, par cylindres, etc.) Stockage sur site Pression de sortie (350/700 bar) Capacité (10-200 kg/jour) Génie civil
	HRS OPEX	%/yr	3-5	Coûts de l'électricité Consommation d'électricité Volume d'H2 livré
Injection dans le réseau de gaz	Conversion du réseau de gaz naturel (% du coût de la construction neuve)	%	5-30	
	Station d'injection, réseau de transport (60 bars)	€k	700	Durée de vie (35 ans) Tarif de rachat Prix du carbone Limite d'injection (%)
	OPEX fixe	%/an	8	
	Station d'injection, réseau de distribution (10 bars)	€k	600	Durée de vie (35 ans) Tarif de rachat Prix du carbone Limite d'injection (%)
	OPEX fixe	%/an	8	
	Tuyauterie de raccordement	k€/km	300	
	Matériel de raccordement des conduites	k€	200	
	OPEX fixe	%/yr	2	
Stationnaire	Pile à combustible	€/kW	640-2900	Taille de la PAC (>1500€/kW au-dessus de 1 MWe)

Bibliographie

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

Agence Internationale de l'Energie (AIE), "Hydrogen and Fuel Cells Technology Roadmap", juin 2015

Agence Internationale de l'Energie (AIE), "Global Trends and Outlook for Hydrogen", décembre 2017

Agence Internationale de l'Energie (AIE), "The Future of Hydrogen, Seizing Today's Opportunities", juin 2019

Agence Internationale de l'Energie (AIE), "The Oil and Gas Industry in Energy Transitions", janvier 2020

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

ASSET, "Sectoral integration, long-term perspective in the EU Energy System", février 2018

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

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

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

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

CE Delft, "Feasibility study into blue hydrogen: Technical, economic & sustainability analysis", juillet 2018

Centre on Regulation in Europe (CERRE), "Future Markets for Renewable Gases and Hydrogen", septembre 2019

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

CNCCEF-AFHYPAC, « Hydrogène, l'heure est venue - Recommandations pour l'avenir de la filière industrielle française à l'export », décembre 2019

Commission européenne, "The role and potential of Power-to-X in 2050", septembre 2018

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

DNV GL, "Comparison of Alternative Marine Fuels", juillet 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

ENEA, "The Potential of Power-to-Gas", janvier 2016

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", août 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

Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking (FCH JU), "Value Added of the Hydrogen and Fuel Cell Sector in Europe", septembre 2019

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

Hydrogen Council, "Path to hydrogen competitiveness: A cost perspective", janvier 2020

IEAGHG, "Techno-Economic Evaluation of SMR Based Standalone (Merchant) Hydrogen Plant with CCS", février 2017

IEA ETSAP, "Technology Brief: Hydrogen Production & Distribution", février 2014

IFP Energies Nouvelles-SINTEF, "Hydrogen for Europe, Final Report of the Pre-Study", août 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

Jülich Forschungszentrum, "Comparative Analysis of Infrastructures: Hydrogen Fueling and Electric Charging of Vehicles", janvier 2018

Liu Zhixiang, Kendall Kevin et Yan Xieqiang, "China Progress on Renewable Energy Vehicles: Fuel Cells, Hydrogen and Battery Hybrid Vehicles", Energies, décembre 2018

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

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

Norwegian University of Science and Technology (NTNU), "Concepts for Large Scale Hydrogen Production", juin 2016

Organisation de Coopération et de Développement Économiques (OCDE) – Agence Internationale de l'Énergie (AIE), "Energy Technology Perspectives 2017", juin 2017

Organisation de Coopération et de Développement Économiques (OCDE) – Agence Internationale de l'Énergie (AIE), "Renewable Energy for Industry", novembre 2017

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

RTE, « La Transition vers un Hydrogène Bas Carbone », janvier 2020



—

ABB France

Service Communication

7 Boulevard D'Osny - CS 88570 Cergy
F-95892 Cergy Pontoise Cedex / France

Contact Center ABB France

Tél. : 0 810 020 000 (service 0,06 €/min + prix appel)
Email : contact.center@fr.abb.com



www.abb.fr

Nous nous réservons le droit d'apporter des modifications techniques ou de modifier le contenu de ce document sans préavis.

ABB décline toute responsabilité concernant toute erreur potentielle ou tout manque d'information éventuel dans ce document.

Nous nous réservons tous les droits relatifs à ce document, aux sujets et aux illustrations contenus dans ce document. Toute reproduction, divulgation à des tiers ou utilisation de son contenu, en tout ou en partie, sont interdites sans l'autorisation écrite préalable d'ABB

Copyright© 2018 ABB - Tous droits réservés