

PARLONS HYDROGÈNE !

Tout savoir
(ou presque)
sur l'hydrogène

C'est
quoi ?

Pour
quand ?

H₂

C'est
où ?

C'est
qui ?

Pour-
quoi ?

... Édité par ...

Sommaire

1) L'hydrogène, C'est quoi ?

p4

- C'est un vecteur énergétique
- Hydrogène, source d'énergie ?
- Focus sur la production d'hydrogène par électrolyse

2) L'hydrogène, Pourquoi ?

p8

- D'abord pour l'environnement !
- La mobilité hydrogène
- L'industrie
- L'énergie

3) L'hydrogène, Pour quand ?

p12

- L'hydrogène, c'est maintenant !
- La dynamique est européenne et internationale

4) L'hydrogène, C'est qui ?

p14

- Des acteurs présents sur toute la chaîne de valeur
- Des gigafactories dans les territoires
- Sécuriser les emplois et les talents

5) L'hydrogène, C'est où ?

p16

- L'énergie des territoires



Introduction

Parlons Hydrogène !

Alors que des épisodes météorologiques violents de plus en plus fréquents font prendre conscience de la réalité du changement climatique, la nécessité de trouver des solutions pour accélérer la transition écologique s'impose.

L'hydrogène fait partie de ces solutions et est une opportunité unique de changer de modèle énergétique pour décarboner de larges secteurs de l'économie comme l'industrie, les transports et l'énergie.

Considéré comme un objet de laboratoire il y a encore quelques années, ou comme une énergie possible d'un avenir très lointain, l'hydrogène fait désormais valoir sa contribution indispensable à un nouveau mix énergétique décarboné, incontournable pour réussir la transition.

Son développement est également une question de souveraineté avec l'opportunité de réindustrialiser le territoire national, créer et reconverter des emplois, gagner en indépendance technologique et énergétique. C'est à ce titre notamment que la filière est identifiée et soutenue comme une industrie stratégique pour la France. Au-delà, le mouvement est européen et international.

Enjeu industriel, technologique et environnemental, l'hydrogène est donc amené à entrer

dans la vie des citoyens. C'est déjà le cas aujourd'hui pour certains français, usagers des transports de collectivités pionnières qui ont mis en service des bus à hydrogène sur leurs lignes, ou clients de taxis hydrogène franciliens. Bientôt, des bennes à ordures ménagères ou des camions circuleront dans les villes et sur les routes, des trains à hydrogène sur des lignes régionales, des bateaux et des ferries à hydrogène sur les océans et pourquoi pas des avions ? L'hydrogène-énergie est déjà déployé pour stocker et alimenter en électricité des sites très isolés comme des refuges en haute-montagne, pour de l'alimentation de secours ou temporaire grâce à des groupes électrogènes à hydrogène...

L'hydrogène est ainsi à l'aube d'une nouvelle ère, celle de l'appropriation par l'ensemble des publics. Véritable sujet de société naissant, il s'accompagne de questions essentielles.

L'hydrogène, c'est quoi ? Comment ça marche ? A quoi ça sert ? Est-ce que c'est sûr ? C'est qui, où et pour quand ?

Nous vous proposons un tour d'horizon des questionnements et idées reçues sur cette petite molécule promise à un grand avenir.

Bonne lecture !

1 – L'hydrogène, c'est quoi ?

L'hydrogène stocke, transporte et restitue la majeure partie de l'énergie qui a été nécessaire à sa production.

C'est un vecteur énergétique



L'atome d'hydrogène est l'élément chimique le plus simple, le plus abondant sur Terre et le plus ancien de l'Univers (il est apparu il y a 13 milliards d'années). **Peu présent sur Terre à l'état naturel, il y est en revanche très répandu à l'état combiné dans de nombreuses substances**, en particulier avec l'oxygène, avec lequel il constitue l'eau et le carbone, avec lequel il constitue l'ensemble des hydrocarbures. Le pouvoir calorifique massique de l'hydrogène est le plus élevé de tous les combustibles existants. Il est deux à trois fois plus énergétique que le pétrole ou le gaz et sa combustion ne rejette que de l'eau, ce qui explique l'intérêt que lui portent les énergéticiens.

L'hydrogène est donc une ressource disponible en grande quantité mais pratiquement toujours associée à d'autres éléments chimiques.

Pour obtenir du dihydrogène, il est nécessaire de le produire en extrayant les atomes d'hydrogène des matières premières qui en contiennent, en le dissociant des autres atomes avec lesquels il est combiné, notamment :

- **L'eau** (H_2O), constituée d'oxygène et de dihydrogène.
- **Les combustibles fossiles** (hydrocarbures ou charbon), constitués d'hydrogène, d'oxygène et de carbone. Par exemple, le méthane, sous forme de CH_4 .

- **La biomasse** (bois) ou les combustibles issus de la biomasse (biogaz), constitués d'hydrogène, d'oxygène et de carbone.

Comment l'obtient-on ?

Le dihydrogène peut être produit par plusieurs procédés chimiques ou thermiques. Selon la matière première employée et la source d'énergie utilisée, il sera considéré comme fossile, renouvelable ou bas carbone. Parmi les différentes méthodes de production, on retrouve :

- **L'électrolyse de l'eau**, une réaction consistant à utiliser un courant électrique pour casser les molécules d'eau et produire d'une part du dihydrogène (H_2) et d'autre part de l'oxygène (O_2).
- **Le vaporeformage du gaz naturel**, une technologie majoritairement utilisée dans la production industrielle d'hydrogène, qui consiste à faire réagir du méthane avec de l'eau à haute température (« craquage ») pour obtenir un gaz de synthèse contenant de l'hydrogène.
- **L'oxydation partielle d'hydrocarbures**, une réaction chimique entre un hydrocarbure et de l'oxygène.
- **La pyrogazéification**, un procédé permettant de transformer un composé solide en gaz riche en hydrogène.





Hydrogène, source d'énergie ?

L'hydrogène existe à l'état naturel sur Terre, retenu sous forme gazeuse dans des « pièges géologiques » formés par les différentes couches du sous-sol continental ou océanique. La découverte de gisements significatifs et exploitables est relativement récente ; et contrairement au gaz naturel, ou aux autres combustibles fossiles (pétrole, charbon...), l'exploitation de cet « hydrogène naturel » n'en est encore qu'à ses débuts.

Des couleurs pour l'hydrogène ?

Non, mais une terminologie.

Quand on parle d'hydrogène, on lui associe souvent une couleur. À quoi cela correspond-t-il ?

Couleur		Technologie	Energie primaire ou source d'électricité	Empreinte carbone	Terminologie
Production via biomasse	Hydrogène vert	Thermolyse	Biomasse	Basse (< 3 kgCO ₂ eq/kgH ₂)	Hydrogène renouvelable
		Vaporeformage	Biométhane	Basse (< 3 kgCO ₂ eq/kgH ₂)	Hydrogène renouvelable
Production via l'électricité	Hydrogène rose	Electrolyse de l'eau	Solaire, éoliennes, hydroélectricité	Minimale (< 2 kgCO ₂ eq/kgH ₂)	Hydrogène renouvelable
			Nucléaire	Minimale (< 2 kgCO ₂ eq/kgH ₂)	Hydrogène bas-carbone
	Hydrogène jaune		Réseau électrique (FR)	Basse (< 3 kgCO ₂ eq/kgH ₂)	Hydrogène bas-carbone
Production via les énergies fossiles	Hydrogène bleu	Vaporeformage Gazéification	Gas naturel, charbon + CCUS	Basse (< 3 kgCO ₂ eq/kgH ₂)	Hydrogène bas-carbone
	Hydrogène turquoise	Pyrolyse	Gaz naturel	Basse (< 3 kgCO ₂ eq/kgH ₂) + noir de carbone (co-produit)	/
	Hydrogène gris	Vaporeformage		Elevée (~ 11 kgCO ₂ eq/kgH ₂)	Hydrogène carboné
	Hydrogène marron	Gazéification	Lignite	Très élevée (> 20 kgCO ₂ eq/kgH ₂)	Hydrogène carboné
	Hydrogène noir		Charbon bitumineux	Très élevée (> 20 kgCO ₂ eq/kgH ₂)	Hydrogène carboné



Philippe Haffner, Président et co-fondateur de Haffner Energy :

« Notre procédé Hynoca (Hydrogen no carbon) permet d'utiliser une énergie renouvelable et en quantité abondante, qui est la biomasse. [...] La biomasse que nous exploitons produit du biochar, un co-produit qualifié pour le crédit carbone. Nous arrivons à environ 15 kg de CO₂ négatif par kilo d'hydrogène produit, tout en redonnant à la nature un produit qui est un très bon fertilisant pour l'agriculture.».



L'HYdée reçue

« Le rendement global de la chaîne énergétique de l'hydrogène est trop faible »

L'utilisation de l'hydrogène comme vecteur énergétique implique plusieurs étapes : la production de l'hydrogène, le stockage, le transport, la distribution, et la reconversion de l'énergie stockée en électricité. Comme pour toute conversion d'énergie, chaque étape s'accompagne d'une déperdition, qui impacte le rendement de l'ensemble de la chaîne. **Le rendement global de la chaîne production-stockage-transport-restitution dépend du procédé de fabrication et de la distance sur laquelle l'hydrogène a été transporté.**

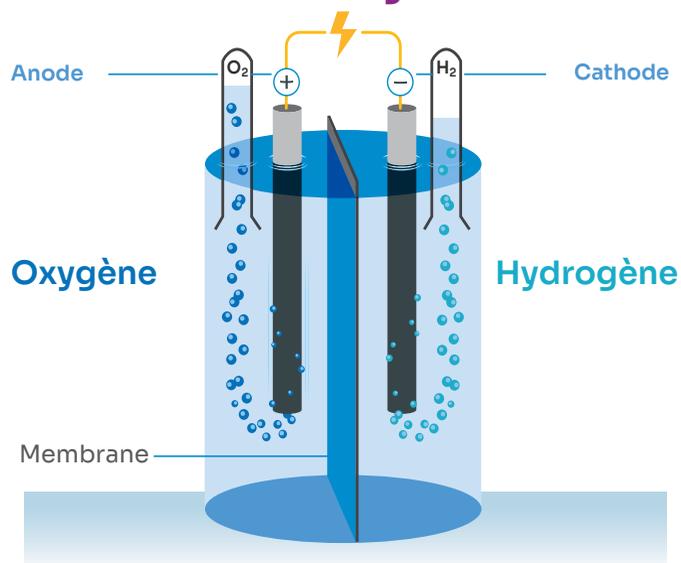
Le rendement énergétique global, « power to H₂ to power », de la source d'électricité à la roue d'un véhicule hydrogène par exemple, est de l'ordre de 25 à 30 %. Mais quand on pense à l'hydrogène, on doit penser aux services rendus. En effet, **l'hydrogène est un moyen efficace pour stocker massivement et sur de longues durées**, l'électricité issue des sources intermittentes (éolien, solaire par exemple) qui seraient sinon perdues. Au niveau du transport, il apporte une flexibilité aux utilisateurs en termes d'autonomie et de temps de recharge ; **l'hydrogène permet d'électrifier un nombre significatif d'usages** qui ne sont pas accessibles à l'électrification directe du fait de problématiques de densité d'énergie. Enfin, dans certaines conditions (le cas des sites très isolés ou insulaires notamment), l'utilisation d'une chaîne énergétique hydrogène trouve son sens **environnemental, énergétique et même économique.**

Le service rendu et les bénéfices environnementaux sont ainsi les critères principaux qui justifient, sur un plan technique mais également économique, le fait de stocker une partie de l'énergie disponible sous forme d'hydrogène et de la restituer dans le domaine des transports et de l'énergie.

La recherche et le développement actuellement en cours impliquent des gains potentiels de rendement global significatif, aux niveaux de la production, du transport et de la conversion de l'hydrogène. C'est notamment le cas sur l'électrolyse dite « haute température » qui permettrait de passer d'un rendement de l'ordre de 60 - 70% à **plus de 90%**. Les technologies de mise en oeuvre de l'hydrogène sont encore relativement nouvelles, le potentiel d'optimisation est donc très élevé.



Focus sur la production d'hydrogène par électrolyse



Le procédé d'électrolyse ne rejette pas de CO₂ dans l'atmosphère. Le bilan carbone de l'hydrogène produit dépend essentiellement de la source d'électricité utilisée (énergies renouvelables ou électricité du réseau) et de la manière dont celle-ci est produite. Aujourd'hui, deux technologies, **l'électrolyse alcaline et l'électrolyse à membrane échangeuse de protons (PEM)**, avec un rendement compris entre 60 et 70%, présentent un degré de maturité élevé et sont prêtes au déploiement industriel.

La production d'hydrogène renouvelable ou bas carbone est actuellement plus chère que la production d'hydrogène par vaporeformage. L'enjeu est de faire baisser les coûts des électrolyseurs grâce à **l'industrialisation massive et au passage à l'échelle de la filière** (augmentation du nombre d'installations et de leur taille), tout en maîtrisant le coût de l'énergie électrique produite par les sources renouvelables, afin de rendre la production d'hydrogène renouvelable ou bas carbone plus compétitive.



Florence Lambert,
Présidente de Genvia

« Il s'agit de produire des électrolyseurs à haute température avec une technologie unique en France... Elle permet en effet de faire du « power to power ». Notre technologie est innovante. Elle se distingue par de hauts rendements mais aussi par sa réversibilité. »



« La production d'hydrogène est polluante »

Cette thèse fait référence à la manière dont l'hydrogène est traditionnellement produit à partir d'énergies fossiles, procédé qui domine encore le marché international. Toutefois, **les nouvelles technologies de production d'hydrogène renouvelable ou bas carbone se développent rapidement, soutenues par des investissements massifs publics et privés.**

Par exemple, l'électrolyse de l'eau produit un hydrogène renouvelable, dit « vert », à partir de l'électricité provenant d'une source renouvelable ou à faible teneur en carbone. Lorsque l'électrolyse utilise une source nucléaire d'électricité, l'hydrogène produit est bas carbone.

Les technologies de production par thermolyse de la biomasse sont également intéressantes pour la production d'hydrogène renouvelable.

Dans le cadre de la production d'hydrogène bas carbone par vaporeformage, le procédé de capture et stockage du CO₂ est utilisé pour réduire les émissions de carbone : au lieu de libérer du CO₂ dans l'atmosphère, celui-ci est capté et enfoui sous terre ou transformé en nouveaux produits tels que du plastique et des matériaux de construction. Cet hydrogène « bleu » émet de faibles quantités de CO₂ à condition que le gaz naturel utilisé pour le fabriquer ne fuit pas lors de sa production et de son transport, et qu'une grande partie du CO₂ puisse être captée. Le vaporeformage avec capture de carbone pourrait s'avérer être une solution de transition, en attendant que les technologies d'électrolyse et de production d'électricité renouvelable soient suffisantes.



2-L'hydrogène, pourquoi ?

L'utilisation de l'hydrogène contribue à la décarbonation de 3 principaux secteurs économiques : la mobilité, l'industrie, l'énergie.

D'abord pour l'environnement !



L'hydrogène s'impose comme une solution indispensable pour le succès de la transition énergétique. **D'un point de vue environnemental, l'hydrogène présente de grands avantages** : son utilisation dans une pile à combustible ne produit en effet que de l'eau et ne dégage pas d'émission de CO₂ ou de particules fines. Ces mérites environnementaux sont encore plus importants lorsque l'hydrogène est produit par électrolyse avec une source d'électricité décarbonée. De grandes quantités d'électricité renouvelable (solaire et éolienne) peuvent être stockées sous forme d'hydrogène, grâce au procédé d'électrolyse, permettant ainsi de valoriser une énergie qui aurait été perdue.

L'hydrogène peut par ailleurs jouer différents rôles dans la décarbonation des usages finaux et ainsi se substituer aux énergies fossiles :

- **En tant que gaz industriel** pour décarboner les industries lourdes ;
- **Dans des piles à combustible** pour générer de la chaleur et de l'électricité ;
- **En tant que vecteur énergétique** pour accompagner le développement des énergies renouvelables, et en soutien aux infrastructures énergétiques électriques et gazières ;
- **Comme source d'énergie privilégiée** pour la mobilité décarbonée sur de longues distances, pour véhicules lourds ou des usages intensifs.

La mobilité hydrogène



Un véhicule à hydrogène est un véhicule à propulsion électrique, dont l'énergie provient d'une pile à combustible alimentée par de l'hydrogène. **L'hydrogène s'adapte à tous types de mobilités** : routières (vélos, berlines, véhicules utilitaires légers, camions, bus), ferroviaires (les trains), maritimes et fluviales (barges, cargos, ferries, ...) et aérienne (avions de tourisme et bientôt avions de ligne) mais aussi pour des engins spéciaux (chariots élévateurs, engins de chantiers, engins miniers, etc).

L'hydrogène offre des solutions particulièrement performantes pour tous types de véhicules qui nécessitent une grande puissance motrice, une large autonomie ou encore une utilisation intensive. C'est le cas du transport collectif de personnes, du transport de marchandises ou de la collecte d'ordures ménagères par exemple.

Le potentiel de la mobilité hydrogène en quelques chiffres

D'ici 2030 :

- de **1000 à 1700** stations hydrogène seront déployées,
 - **300 000 à 450 000** véhicules légers,
 - **5000 à 10 000** poids lourds,
 - **65 à 135** bateaux,
- avec un déploiement anticipé dans le secteur des transports publics (autobus et trains – jusqu'à 250 rames), les flottes de taxis et les véhicules utilitaires. En 2050, l'hydrogène alimenterait 18% du parc de véhicules et contribuerait ainsi à réduire les émissions de CO₂ de 55 millions de tonnes, soit près d'1/3 de la réduction nécessaire dans le scénario de référence du Gouvernement.

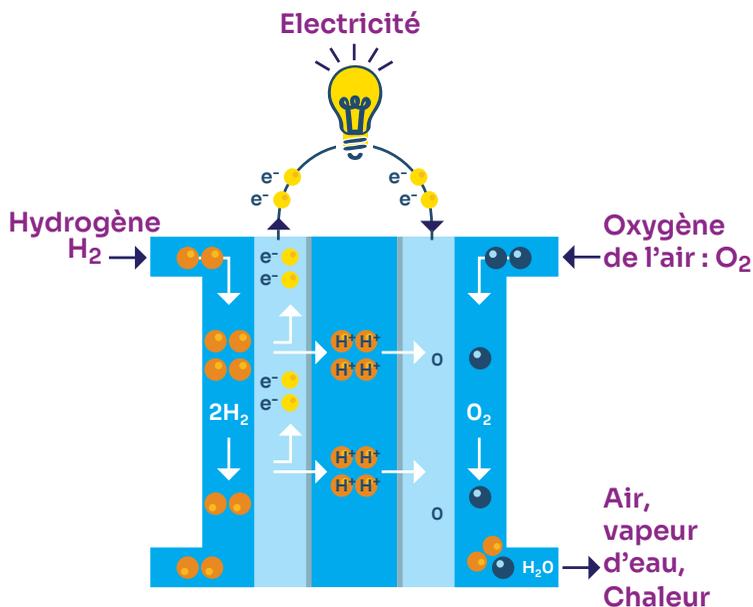
En bref, les avantages du véhicule à hydrogène

Le confort d'usage du véhicule thermique avec un véhicule électrique !

- Zéro émission à l'échappement... sauf de l'eau
- Pas de bruit
- Temps de recharge de quelques minutes
- De l'autonomie (600 à 800 km pour un VL)

Pile à combustible

La pile à combustible est une des manières les plus simples et sûres de récupérer l'énergie stockée sous forme d'hydrogène. C'est la réaction inverse de l'électrolyse : la génération d'une tension électrique se fait en combinant l'hydrogène avec l'oxygène de l'air, en rejetant uniquement de l'eau. **La pile à combustible est une technologie particulièrement adaptée pour produire de l'électricité pour la mobilité, l'alimentation de secours de sites isolés, et d'autres usages urbains ou industriels.**



Stéphane Kaba

Directeur Smart and Green Mobility, Alstom



« Alstom s'est mobilisé dès 2013 autour du lancement d'un train régional équipé de piles à combustible à hydrogène. Deux premiers trains iLint 100% H_2 ont été mis en service commercial en septembre 2018 en Allemagne. A ce jour, 41 rames ont été commandées par deux Landers allemands, et des expérimentations réussies ont eu lieu aux Pays-Bas, en Autriche et en Belgique. En 2021, la France est, elle aussi, rentrée dans le cercle des « pays fondateurs » avec une commande de 14 rames Coradia Polyvalent bi-mode par les quatre Régions Auvergne-Rhône-Alpes, Bourgogne-Franche Comté, Grand-Est et Occitanie. »

Julien Roussel

Directeur de l'innovation chez GreenGT



« Notre camion est un porteur unique en son genre car il pèse 26 tonnes. Peu de camions atteignent un tel niveau de performance à l'hydrogène et il est prévu pour tracter une remorque de 18 tonnes, ce qui porte le total à 44 tonnes. L'autre caractéristique est que le camion comporte une partie réfrigération, qui a été demandée spécifiquement par Carrefour pour livrer du frais. »



L'HYdée
reçue

« L'hydrogène n'est pas la solution la plus adaptée pour la mobilité »

Tous les moyens de transport ne peuvent pas être entièrement électrifiés. Pour ces usages, l'hydrogène constitue une solution possible pour remplacer les carburants à base d'énergies fossiles. Les transports longue distance, tels que les trains, les navires ou les avions de ligne, ont des besoins énergétiques importants : l'énergie électrique doit pouvoir être stockée et transportée pour parcourir des milliers de kilomètres. Pour l'aviation, l'hydrogène renouvelable ou bas carbone liquide, ou les carburants à base d'hydrogène, peuvent être une solution pour les déplacements aériens propres.

Dans le cas du maritime, les cargos ne pourront naviguer sur de longues distances avec des batteries. L'hydrogène peut, lui, être stocké sous forme d'ammoniac ou de méthane de synthèse, et être utilisé comme carburant dans des moteurs diesel légèrement modifiés.

Pour la mobilité routière, les véhicules alimentés par des piles à hydrogène présentent des avantages par rapport aux véhicules électriques à batterie. **Il est intéressant de recourir à l'hydrogène lorsque les solutions batteries ne répondent pas à l'usage ou aux contraintes telles que le temps de recharge, l'autonomie ou la charge utile.**



L'industrie

L'hydrogène offre une solution pour la décarbonation des industries lourdes (production de ciment, de fer et d'acier, d'engrais et de produits chimiques par exemple) dont les procédés ne peuvent pas être convertis à l'électricité. L'industrie lourde, comme la sidérurgie, a besoin d'intrants chimiques, et l'hydrogène renouvelable a la possibilité de remplacer le charbon émetteur de CO₂ ou les produits chimiques à base de combustibles fossiles. De nombreuses industries ont également besoin de températures élevées, coûteuses à produire avec le chauffage électrique.

A horizon 2030, l'ambition est de produire 475 000 tonnes/an d'hydrogène renouvelable et bas carbone pour alimenter les usages industriels français.

En contribuant activement à la décarbonation de ces industries, l'hydrogène s'avère incontournable pour atteindre la neutralité carbone visée en 2050. Le cas de la sidérurgie est emblématique : en modifiant le procédé de réduction du minerai, avec de l'hydrogène bas carbone, cette industrie pourrait réduire de 22 MtCO₂/an son empreinte carbone. Cela représenterait une consommation de 700 000 tonnes d'hydrogène par an en France. La décarbonation résultant de l'utilisation de l'hydrogène permet d'envisager de pérenniser la présence de cette industrie sur le sol français, et sa compétitivité.



L'énergie

L'hydrogène trouve de nombreuses applications dans le domaine de l'énergie : production d'énergie pour les bâtiments, les sites isolés, les applications de secours. Il apporte également de la flexibilité aux réseaux énergétiques (électriques et gaziers) et permet d'optimiser l'utilisation des énergies renouvelables, en stockant l'électricité qui ne peut être consommée immédiatement.



Marie Godard-Pithon
Directrice performances et investissements chez Vicat

« Face à l'urgence climatique, les solutions dites de «CCU» ou «Carbone Capture and Usage» sont indispensables pour décarboner certaines industries dont celle du ciment. A ce titre, HyNoVi est un projet précurseur qui va ouvrir la voie de la décarbonation profonde de l'industrie. Il contribue de plus à garantir l'indépendance et la souveraineté énergétique de la France en produisant localement un nouveau vecteur énergétique décarboné qui va venir substituer des produits issus de pétrole ou de gaz importés ».

Un complément naturel aux énergies renouvelables

La plupart des sources d'énergie renouvelable, éoliennes et solaires en particulier, sont par nature intermittentes : elles produisent de l'électricité aux moments et dans des quantités déterminées par les conditions météorologiques, indépendamment des besoins en électricité. A mesure que ces modes de production de l'électricité prennent de l'importance, et que le système énergétique évolue d'une production centralisée gérée par la demande vers une production décentralisée de plus en plus dépendante des énergies renouvelables, **le besoin de stocker de grandes quantités d'électricité de manière fiable, économique et souple, devient incontournable.**

L'hydrogène peut ainsi offrir aux réseaux électriques et gaziers la flexibilité dont ils ont besoin. Grâce au procédé d'électrolyse de l'eau, l'électricité générée par les énergies renouvelables intermittentes peut être convertie et stockée sous forme d'hydrogène décarboné sur de longues durées et transportée sous forme d'hydrogène liquide ou gazeux, voire sous forme de molécules contenant de l'hydrogène. Son utilisation sera alors différée. L'hydrogène peut à l'inverse être à nouveau transformé en électricité lorsqu'il n'y a pas assez de production électrique instantanée pour répondre à la demande.

Usages urbains et pour les sites isolés

L'hydrogène et les piles à combustible peuvent être utilisés pour contribuer à l'autonomie énergétique de bâtiments ou de quartiers entiers, en produisant à la fois de la chaleur et de l'électricité (grâce à des installations de « cogénération »). **Les solutions utilisant l'hydrogène, et notamment les piles à combustible, peuvent également servir pour alimenter en électricité des sites isolés, ou ayant des besoins ponctuels en électricité,** comme par exemple, les chantiers, les sites des festivals de musique ou les événements sportifs. Pour ces usages qui nécessitent une alimentation ponctuelle en électricité, des groupes électrogènes à hydrogène à très faible émission et sans bruit sont utilisés. Enfin, les piles à combustible peuvent constituer des solutions fiables et non polluantes pour l'alimentation de secours d'infrastructures critiques, comme les data centers, les hôpitaux, les casernes...

Infrastructures gazières

L'hydrogène produit peut également être injecté dans le réseau de distribution de gaz, où circule le gaz naturel, avec lequel l'hydrogène peut être mélangé jusqu'à une certaine proportion, pour constituer un nouveau gaz combustible. Ainsi, **l'hydrogène permet d'établir des passerelles entre les réseaux électriques et gaziers (« Power-to-gas »), en optimisant le système énergétique dans son ensemble.**

3-L'hydrogène, pour quand ?

Partout dans le monde, le mouvement est en marche pour que l'hydrogène prenne une place significative comme nouveau vecteur de notre mix énergétique d'ici la fin de la décennie.

**L'hydrogène,
c'est maintenant !**



L'hydrogène est un axe prioritaire d'investissement pour la France. Avec le lancement de la Stratégie nationale pour le développement de l'hydrogène décarboné en 2020, **l'hydrogène est officiellement reconnu comme industrie stratégique par les pouvoirs publics, qui s'engagent à investir d'ici 2030, 7,2 milliards d'euros** pour développer une filière compétitive de l'hydrogène renouvelable et bas carbone et l'ensemble des technologies nécessaires à ses usages.

Le soutien de l'Etat au déploiement de la filière s'est vu renforcé en novembre 2021 dans le cadre du plan d'investissement France 2030 avec un **budget supplémentaire de 1,9 milliard d'euros** afin de soutenir les projets de gigafactories d'équipements clés (électrolyseurs, piles à combustible, réservoirs). **L'objectif est de positionner la France comme un leader de l'hydrogène renouvelable et bas carbone en Europe et dans le monde.**

Cette enveloppe vient en soutien au budget d'1,5 milliard d'euros initialement prévu pour financer les 15 projets industriels français retenus pour les Projets Importants d'Intérêt Européen Commun (PIIEC) sur l'hydrogène, dispositif autorisant les États membres de l'UE à subventionner massivement des projets d'industrialisation dans des secteurs stratégiques.



Thierry Breton,
*Commissaire chargé du marché intérieur,
Commission Européenne*

« L'hydrogène propre est indispensable pour réduire les émissions industrielles de carbone et contribuer à notre indépendance énergétique vis-à-vis de la Russie. Nous n'avons pas de temps à perdre [...] »

La dynamique est européenne et internationale



A l'échelle européenne, la Commission encourage également l'installation d'électrolyseurs de grande puissance. En réponse à l'agression de l'Ukraine par la Russie, l'Europe a confirmé sa volonté forte d'accélérer la décarbonation de l'économie et la sortie de la dépendance aux énergies fossiles avec le Plan RePower EU qui double les objectifs sur l'hydrogène renouvelable, produit en Europe et importé. **L'hydrogène apparaît donc comme un vecteur énergétique pouvant répondre aux enjeux de décarbonation et de souveraineté énergétique.**

De nombreux pays européens (France, Allemagne, Royaume-Uni, Espagne, Pays-Bas, Italie ...) ont publié des stratégies hydrogène avec des ambitions importantes de développement de la filière.

Dans les pays industriels d'Asie, les stratégies impulsées par la Corée et le Japon, suivis par la Chine, portent sur la production en série de l'outil de production (électrolyseurs) et de tous les équipements en aval (les véhicules notamment). Dans d'autres parties du monde, les pays dotés d'une géographie ou d'un climat favorable aux énergies renouvelables misent sur la production massive d'hydrogène renouvelable destiné à l'export, à l'instar du Chili ou du Maroc par exemple.

Au total, près de 30 pays dans le monde disposent d'une stratégie hydrogène engageant quelques 40 milliards de dollars.

Avec des projets d'envergure qui se déploient, des investissements massifs privés et un soutien public à la hauteur des enjeux, le mouvement est en marche pour que l'hydrogène prenne une place significative comme nouveau vecteur de notre mix énergétique d'ici la fin de la décennie.



« L'hydrogène, ce sera toujours trop cher ! »

Quand on parle de coût de l'hydrogène, cela peut recouvrir plusieurs aspects :

- **Le coût de production** : actuellement, l'hydrogène produit par vaporeformage de gaz naturel coûte entre 1,5 €/kgH₂ et 4 €/kgH₂. L'hydrogène renouvelable ou bas carbone produit par électrolyse de l'eau présente des coûts moyens autour de 7-8 €/kgH₂ pouvant atteindre 3-4 €/kgH₂ dans des conditions particulièrement favorables et jusqu'à 14 €/kgH₂ dans le cas contraire.

- **Le prix final pour l'utilisateur** qui intègre le coût de production, de conditionnement et de transport de l'hydrogène jusqu'au point d'usage. Le coût du kilogramme d'hydrogène renouvelable ou bas carbone varie donc selon l'usage. A titre d'exemple, l'hydrogène distribué en station se situe aujourd'hui dans une moyenne entre 9 et 12 €/kg, sachant qu'un véhicule léger consomme environ 1 kgH₂/100 km.

L'hydrogène renouvelable ou bas carbone produit par électrolyse n'a donc pas encore atteint son équilibre économique. Du fait notamment de la faible maturité industrielle du procédé, il ne peut concurrencer sérieusement l'hydrogène issu de fossiles sans un soutien qui lui permettra de développer massivement ses marchés.

Le coût de l'hydrogène renouvelable n'est pas tant lié aux technologies ou aux infrastructures mais principalement au coût de l'énergie primaire à partir de laquelle il est produit par électrolyse, qui peut représenter jusqu'à 70 % du coût total. Or, le coût de l'électricité issue des renouvelables a baissé de façon considérable ces dernières années (le coût de l'énergie solaire par exemple a été divisé par 10 en 10 ans). Cette baisse qui devrait s'accroître au cours de la prochaine décennie contribuera à rendre l'hydrogène renouvelable réellement compétitif.

Dans le même temps, les électrolyseurs deviendront moins coûteux à mesure que la filière se développera et que les gigafactories seront mises en service, permettant ainsi le passage à l'échelle de la filière et une baisse des coûts (le coût des électrolyseurs est passé en quelques années de 1,5 M€/MW à environ 700 k€/MW aujourd'hui et ce coût pourrait descendre à 300 k€/MW d'ici 2030).

4-L'hydrogène, c'est qui ?

Laboratoires et centres de recherche d'excellence, grands groupes industriels, PME-PMI et start-ups innovantes, acteurs économiques et des territoires, tous sont mobilisés au sein de cette filière de pointe émergente qui aura des retombées majeures en matière d'emplois et de revitalisation du tissu industriel national.

Des acteurs présents sur toute la chaîne de valeur



Aujourd'hui, une véritable filière est en train de se structurer en France, avec déjà plus de 430 acteurs actifs¹ dans le domaine de l'hydrogène, couvrant l'ensemble de la chaîne de valeur, de la production aux principaux domaines d'utilisation de l'hydrogène, en intégrant la conception et la fabrication d'équipements ou de composants clés pour la filière.

Ainsi, des ETI et PME françaises, agissant en lien étroit avec les centres de recherche, ont développé des technologies de pointe pour fournir les équipements nécessaires à la production de l'hydrogène et prennent part avec succès à la compétition mondiale. L'ensemble des acteurs de la filière automobile française s'organisent et proposent aujourd'hui une offre en matière de solutions hydrogène : véhicules individuels, utilitaires, bus, camions ou bennes à ordures.... Des PME-PMI de la filière proposent également les stations de distribution de l'hydrogène.

Les grands énergéticiens français ainsi que les grands groupes d'ingénierie sont également très actifs dans le domaine de l'hydrogène à travers des prises de participation, la création de sociétés communes et de partenariats, contribuant ainsi à la consolidation de l'offre industrielle française.



Olivier Dhez,
Directeur Général Délégué d'HRS

« Nous sommes des industriels avec une vraie capacité de production et nous accompagnons nos clients en les aidant à bien dimensionner leur station, à choisir l'implantation. Nous assurons l'installation dans le respect de la réglementation ICPE, ainsi que la mise en service et une offre de maintenance et d'astreinte. C'est une offre complète. Nos ingénieurs ont déjà installé des stations, aussi bien France qu'à l'étranger. 22 des stations se trouvent par exemple en Allemagne, 9 en France et 2 aux États Unis. »

Des gigafactories dans les territoires



Du fait du rôle stratégique de l'hydrogène dans le futur système énergétique, **la maîtrise des technologies et des savoir-faire associés constitue un enjeu crucial**, sur le plan industriel, et pour garantir le succès des politiques de décarbonation.

Les projets de gigafactories sur le territoire national sont donc essentiels pour conserver la maîtrise des briques à fort contenu technologique et à forte valeur ajoutée comme les électrolyseurs, les piles à combustible ou encore les réservoirs, mais également certains composants clés comme les membranes.

(1) Au sein de France Hydrogène



Le terme de « **Gigafactory** » a émergé dans le cadre de la filière des batteries. Par analogie, une gigafactory d'électrolyseur est une usine qui peut produire l'équivalent en équipement d'1 GW d'électrolyse par an.

Plusieurs usines verront le jour dans les territoires notamment dans le cadre du « **Projet Important d'Intérêt Européen Commun** » sur l'hydrogène. **Ces usines de grande taille joueront un rôle essentiel pour renforcer et pérenniser les bassins industriels qui se développent dans le domaine de l'hydrogène, et pour développer l'emploi local.**

Sécuriser les emplois et les talents



Industrie stratégique à haute valeur ajoutée, la filière hydrogène présente un fort potentiel de création d'emplois **avec plus de 100 000 emplois directs et indirects** qui seront créés à l'horizon 2030. Dès à présent, la filière représente **plus de 4 000 emplois** en France², et le développement rapide du secteur crée une forte demande en main-d'œuvre qualifiée.

Défi technique, économique, politique, la transition énergétique et l'hydrogène en particulier représentent un challenge : sur les 84 métiers recensés, nécessaires aux industriels de la filière, plus de 17 sont déjà en tension extrême. Cela se traduit par exemple sur des emplois traditionnels de l'industrie tels que soudeurs, chaudronniers, usineurs, opérateurs de production, concepteurs...

Les métiers de la filière hydrogène sont des métiers existants, auxquels il faut apporter une spécialisation hydrogène plus ou moins importante. La filière étant en plein développement, il faut donc répondre immédiatement et sur le long terme à ces besoins en compétences et en qualification.

Immédiatement, **en adaptant les compétences et les métiers aux spécificités de l'hydrogène** et à moyen terme, **en développant une offre de formation spécifique à la filière**. Les acteurs de l'enseignement et de la formation au niveau national et territorial sont mobilisés sur le sujet, avec des offres de formation qui se structurent et se mettent en place pour la **formation initiale** (un BTS *Maintenance des Systèmes Énergétiques et Fluidiques «coloré» hydrogène en Normandie, une licence professionnelle en Bretagne, un Master ingénierie H3E - hydrogène, énergie et efficacité énergétique - en Bourgogne-Franche-Comté...*) **ou la formation continue**.



Pascale d'Artois,
Directrice générale de l'Afpa

« Avec le programme Incubateurs H₂, l'Afpa déploie dans le cadre de ses missions de service public avec France Hydrogène une démarche de recherche-action pour développer les compétences des actifs et accompagner les entreprises à construire les ingénieries de formation et de certification des métiers de demain de la filière. »

L'hydrogène aura un effet démultiplicateur indirect sur l'emploi industriel : la décarbonation est un facteur clé pour garantir la compétitivité des industries conventionnelles en France, et donc la pérennité des emplois associés. **Développer l'offre de formation et l'adapter aux spécificités de l'hydrogène permettra de sécuriser les talents et les emplois.**

(2) Source : enquête France Hydrogène, juillet 2021

5-L'hydrogène, c'est où ?

L'hydrogène pouvant être produit localement, les territoires se saisissent de ce vecteur énergétique pour valoriser les énergies locales, décarboner les transports et développer les compétences pour créer de la valeur et des emplois.

L'énergie des territoires



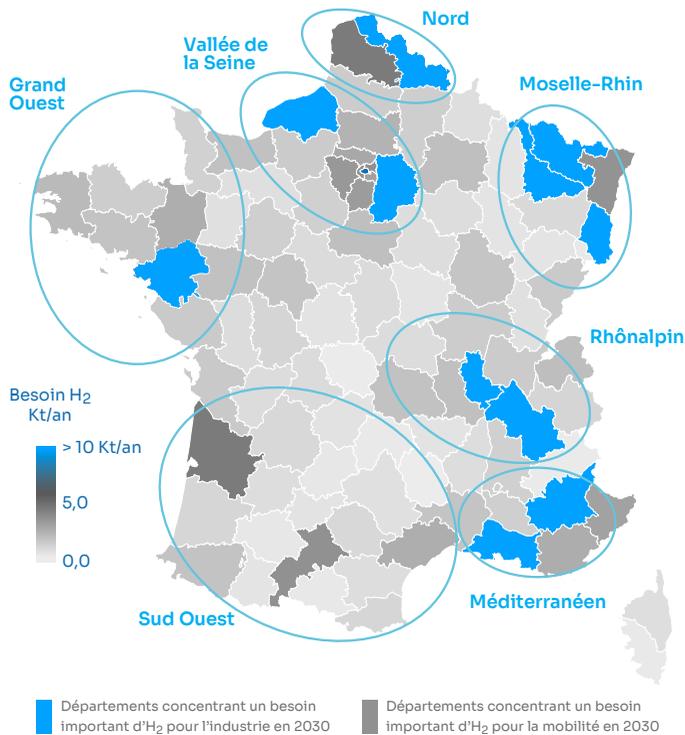
De nombreuses collectivités territoriales sont aujourd'hui activement impliquées dans le développement de projets hydrogène pour la décarbonation des transports et la transition énergétique via la valorisation des énergies de leur territoire. L'hydrogène participe également au développement économique et à la création d'emploi sur les territoires grâce notamment à l'implantation d'usines de production d'équipements clés (électrolyseurs, piles à combustible, stations de recharge, réservoirs ou véhicules). L'enjeu est de concevoir un écosystème à l'échelle d'un territoire, au sein duquel production, distribution et usage de l'hydrogène s'articulent efficacement. **Douze Régions métropolitaines ont adopté des feuilles de route pour le déploiement de l'hydrogène renouvelable et bas carbone** et interviennent à plusieurs niveaux pour favoriser le développement de la filière en impliquant les acteurs locaux.

Plus de **trente collectivités** ont déjà lancé le déploiement de bus à hydrogène pour décarboner leur transport : **une trentaine** circulent actuellement en France et près de **500 commandes** ont été annoncées publiquement. Les collectivités s'engagent également pour l'acquisition de camions bennes à ordures ménagères (BOM) à hydrogène (110 BOM en commande). A titre d'exemple, les métropoles et communautés d'agglomération d'Auxerre, Belfort, Dijon, Le Havre, Lille, Le Mans, Metz et Pau, ont toutes initié la conversion d'une partie de leurs flottes de bus et de BOM à l'hydrogène.

Les Régions travaillent également au déploiement d'un maillage cohérent et adapté en stations de distribution d'hydrogène pour la mobilité. C'est par exemple le cas avec **les projets « Zero Emission Valley » en région Auvergne-Rhône-Alpes, « EAS-HyMob » en Normandie, et « Corridor H₂ » en Occitanie.**

La filière industrielle qui se développe en France autour de l'hydrogène, couvre l'ensemble de la chaîne de valeur et des usages de l'hydrogène, mais également l'ensemble du territoire national. Les projets les plus visibles sur le plan médiatique sont les projets de gigafactories qui permettront aux PME et ETI de démultiplier leur capacité de production pour leurs technologies de pointe. Les usines d'électrolyseurs vont se déployer à Belfort, Vendôme, Béziers ou encore Alspach en Alsace. Les piles à combustible seront fabriquées à Blanquefort, Aix-en-Provence ou Lyon ainsi que des réservoirs dans le Doubs ou des véhicules dans le Nord ou à Albi. **Ces usines de grande taille joueront un rôle essentiel pour renforcer et pérenniser les bassins industriels** qui se développent dans le domaine de l'hydrogène, et pour développer l'emploi local.

Des grands bassins de production et de consommation d'hydrogène



Les gros volumes de consommation d'hydrogène décarboné se concentreront prioritairement à l'intérieur de grands bassins, centrés autour de pôles urbains, industriels et portuaires, dans une logique d'écosystèmes.

L'étude « Trajectoire pour une grande ambition » identifie sept grands bassins géographiques pouvant représenter à 2030, 85% de la demande totale, autant de points d'ancrage d'un déploiement massif, où la mutualisation de la production de l'hydrogène et de ses usages permettra de réduire les coûts.

Hors de ces grands bassins, des projets de déploiement de mobilité essentiellement, représentent une part importante dans la montée en puissance de la filière notamment, car ils permettront d'assurer un maillage complet du territoire national en station de distribution hydrogène.



Taia Kronborg,
en charge du développement économique
chez Lhyfe

Une Vallée Hydrogène dans le Grand Ouest

« Le projet VHyGO vise à démocratiser l'accès à l'hydrogène renouvelable dans le Grand Ouest en accompagnant tous les territoires, quelle que soit leur taille. La volonté est de produire [l'hydrogène] à un prix compétitif et de mutualiser les infrastructures. Au-delà du passage à l'échelle qui est visé, l'intérêt vient du fait que l'hydrogène sera obtenu à partir de plusieurs sources. D'ici 2024, nous avons pour ambition d'avoir une dizaine de sites de production d'hydrogène avec de l'éolien, de la valorisation de déchets et du photovoltaïque. Le programme prévoit également 20 stations de distribution et le déploiement de 500 véhicules à hydrogène. »



L'HYdée
reçue

« L'hydrogène, c'est trop dangereux ! »

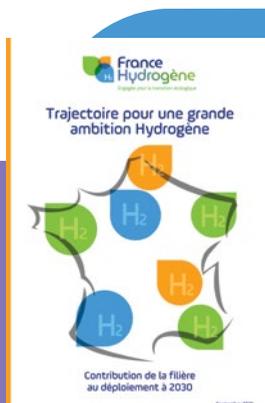
L'une des préoccupations les plus courantes soulevées par l'utilisation de l'hydrogène est son caractère inflammable. **L'hydrogène n'est pas plus dangereux que d'autres carburants inflammables ou que les batteries utilisées dans les voitures électriques.** Il comporte des risques à l'instar d'autres gaz tels que le butane, propane ou gaz naturel. Cependant, ces risques sont parfaitement connus et maîtrisés car l'hydrogène est utilisé depuis plusieurs décennies dans le secteur industriel.

La nouveauté réside dans l'usage domestique de l'hydrogène, pour la mobilité ou les bâtiments. Le travail en cours sur l'adaptation de la réglementation pour accompagner le déploiement de l'hydrogène et la démocratisation de ces usages contribuera à mettre fin aux doutes des utilisateurs. Les véhicules qui circulent en France aujourd'hui (taxis, bus, véhicules utilitaires) sont bien sûr tous homologués et ont passé les mêmes tests que les autres véhicules avec succès (crash tests notamment).



Crescent Marault, Président de la Communauté d'Agglomération de l'Auxerrois

« En mars 2021, Auxerre a accueilli une grande première en France : la signature d'un bon de commande pour trois trains à hydrogène. Notre projet d'écosystème hydrogène est disruptif. Nous portons une stratégie ambitieuse qui est de créer autour de cette technologie tout un système transversal, source d'une vraie valeur ajoutée intégrant la production, la distribution, la consommation, prémices d'une économie circulaire de l'énergie. Nous voulons développer l'utilisation de l'hydrogène dans nos bennes à ordures, les flottes professionnelles, les véhicules de toutes sortes, sans oublier les réseaux de chaleur dans les logements et bien sûr le ferroviaire. [...] Nous visons également la création d'une filière de formation des métiers liés à l'hydrogène ».



Accédez à la publication :
Trajectoire pour une
grande ambition
Hydrogène >>





Les bus hydrogène de Pau



Le train Alstom Coradia iLint



Le camion e-Néo



Le véhicule Renault Master Van H2-Tech de HYVIA



La benne à ordures ménagères SEMAT pour la Touraine Vallée de l'Indre



La station hydrogène Ataway à Chambéry

Pour en
savoir plus >

L'encyclopédie de l'H₂ sur :
www.france-hydrogene.org

L'observatoire de l'H₂ sur :
<https://vigny.france-hydrogene.org>