

« Devant le feu follet,  
l'un dit âme des morts,  
et l'autre dit hydrogène  
sulfuré. »

Alain

# Le Regard

Mawenzi Partners,  
Conseil en Stratégie & Organisation

## REGARD N°16

### L'hydrogène, le vecteur d'énergie du futur ?

Lancé en juin 2018 par l'ancien ministre Nicolas Hulot, le programme qui vise à soutenir le développement de l'hydrogène -énergie à hauteur de 100 millions d'euros par an vient d'être renforcé par l'annonce, en septembre 2020, du grand projet hydrogène. Un plan d'investissement de 7,2 milliards d'euros d'ici à 2030, dont 2 milliards d'euros investis rien que sur les années 2021 et 2022.

Le gouvernement souhaite ainsi faire de la France un des leaders mondiaux de la production d'hydrogène « vert », favoriser le développement de champions industriels et démocratiser les usages de cette technologie, notamment en matière de mobilité.

#### Rédacteur:



**Alexandre Vargel - Manager**

passionné des secteurs du transport, des technologies de la mobilité et des nouvelles énergies, Alexandre accompagne, avec enthousiasme, ses clients dans leurs projets de croissance.

#### Contact

**Pierre-Eric Perrin**

M. +33 6 25 03 90 84 T. +33 1 83 64 28 39

[Pe.perrin@mawenzi-partners.com](mailto:Pe.perrin@mawenzi-partners.com)

Hydrogène

**Mawenzi**  
PARTNERS



Quels sont les cas d'usage qui justifient cet engouement et la hauteur des investissements réalisés par l'État français ? L'hydrogène peut-il être une solution majeure à la décarbonation de notre industrie ? Peut-il être la clé de voûte de la transition vers les énergies renouvelables ? La production d'hydrogène «vert» peut-elle être économiquement viable, en particulier pour le secteur du transport ? Le véhicule à hydrogène est-il écologique ?

La molécule de dihydrogène, communément appelé hydrogène, est extrêmement dense en énergie. Pour être précis, nous parlerons ici de vecteur d'énergie et non d'énergie, car c'est la rupture de la liaison moléculaire qui crée l'énergie qui nous intéresse tant.

## L'industrie, le principal consommateur d'hydrogène

En 2018, 74 millions de tonnes d'hydrogène sont consommées dans le monde, quasi exclusivement dans l'industrie. Les proportions varient d'un pays à l'autre, mais à l'échelle mondiale plus de 80% du volume d'hydrogène produit est utilisé dans le raffinage du pétrole et dans la production d'ammoniac avec lequel nous réalisons des engrains azotés et la plupart des explosifs.

Une petite dizaine de points est utilisée dans la production de produits chimiques dont le méthanol principalement, pour concevoir des plastiques. Le reste est exploité dans divers processus de l'industrie du verre, de la sidérurgie, pour la fabrication de circuits imprimés électroniques, dans les huiles, le spatial et la recherche. L'utilisation de l'hydrogène dans le secteur des transports est encore totalement négligeable puisque cela concerne moins de 10 000 tonnes sur les 74 millions de tonnes consommées en 2018. Ainsi, bien avant d'être l'«énergie verte pour notre futur», l'hydrogène est utilisé dans le présent, en grande quantité, par l'industrie. L'hydrogène n'existant pas à l'état naturel, il doit être produit et malheureusement, dans ces 74 millions de tonnes produites, l'essentiel est de «l'hydrogène gris».

Produire de l'hydrogène à partir de gaz ou de charbon, ce n'est ni très vert ni très bas carbone.

Au total, la production d'hydrogène en 2018 a relâché quelques 830 millions de tonnes de CO2, soit presque 2% des émissions de CO2 totales. Nous sommes ici face au défi majeur posé par l'hydrogène : le produire de manière «bas carbone».

La seule manière de produire de l'hydrogène sans émettre une quantité astronomique de gaz à effet de serre, c'est de le produire par électrolyse. Le principe est d'envoyer une grande quantité d'électricité dans de l'eau. On casse alors deux molécules d'eau H2O en deux molécules d'hydrogène H2 et une molécule d'oxygène O2. Avec cette méthode, produire de l'hydrogène qui ne rejette que de l'oxygène.

Mais l'électrolyse ne suffit pas à rendre bas carbone l'hydrogène produit. Si l'électricité provient de centrales à charbon alors produire de l'hydrogène, même par électrolyse, émettra une grande quantité de CO2. Si l'électrolyse

se fait à partir d'électricité produite par des énergies renouvelables ou d'une centrale nucléaire, alors nous produisons de l'hydrogène bas carbone.

En aparté, nous avons longtemps produit de l'hydrogène grâce à l'électricité des barrages, en Norvège, par exemple. Si le gaz est priorisé aujourd'hui, alors que le procédé est très polluant, c'est simplement pour une raison économique, cette méthode est environ 3 fois moins chère que l'électrolyse de l'eau. Il semble donc indispensable de réglementer et de taxer l'utilisation du charbon, du pétrole et du gaz pour orienter les industries vers les procédés les moins émetteurs.

La recette pour décarboner les 74 millions de tonnes d'hydrogène consommé annuellement serait donc de construire un nombre important d'électrolyseurs et de les alimenter avec de l'électricité bas carbone (un véritable sujet dépendant du mix énergétique de producteur). Mathématiquement, compte

tenu du fait qu'il faut un peu moins de 60 kWh d'électricité (et 11 litres d'eau) pour produire 1kg d'hydrogène par électrolyse aujourd'hui, il faudrait injecter plus de 4 000 TWh d'électricité supplémentaire dans les réseaux pour produire l'intégralité de l'hydrogène aujourd'hui consommé dans le monde. Cela représente autour de 20% de la production annuelle brute mondiale d'électricité, soit un volume bien supérieur à la production de l'Union européenne toute entière.

La production d'hydrogène «bas carbone» requiert donc des investissements colossaux, à 2 niveaux : Investir dans la construction d'électrolyseurs et dans les moyens de production d'une électricité «verte». Ainsi, le choix aujourd'hui fait, en Allemagne, d'accélérer le développement de la mobilité hydrogène «gris» (60 000 voitures particulières et 14 trains hydrogène prévus pour 2021), ne fera malheureusement, qu'aggraver la situation actuelle du climat.

### Source de production d'hydrogène

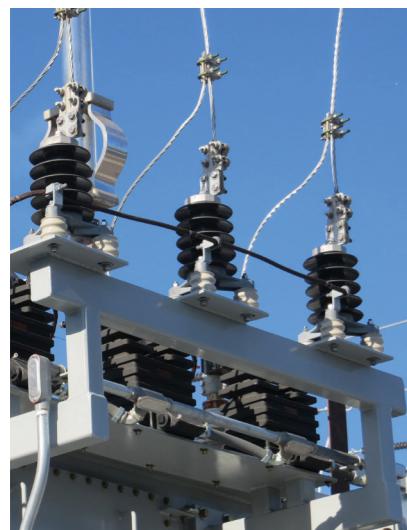
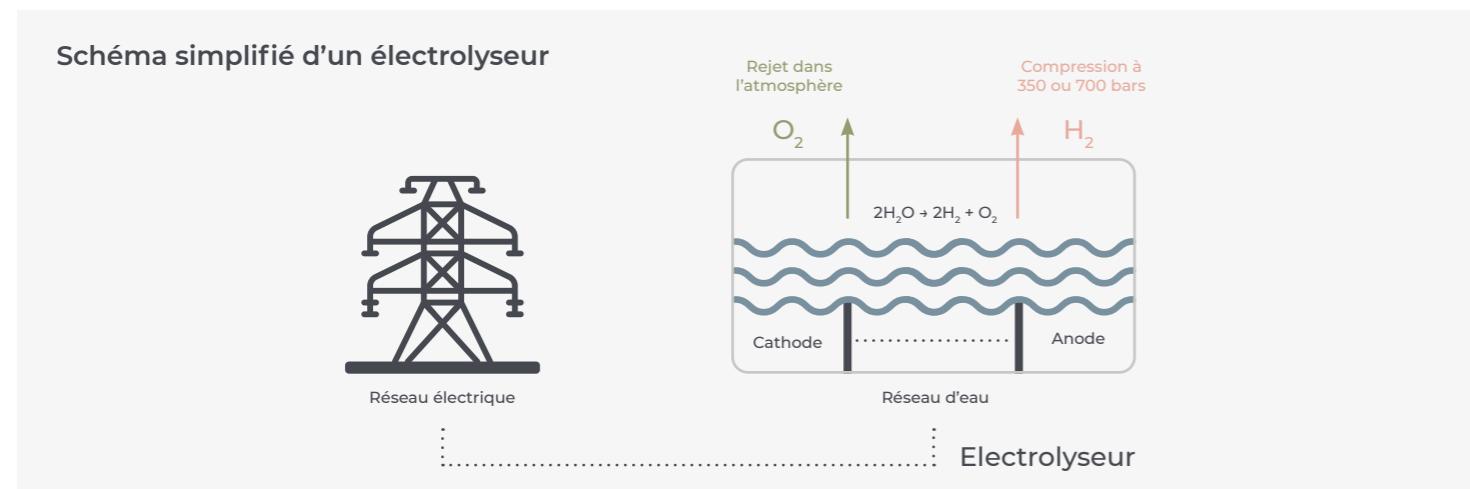
Source des données: IFP Nouvelles Énergies



Aujourd'hui, plus de 95% de l'hydrogène est produit à partir d'hydrocarbures ou de charbon. Lorsque le CO2 émis par ce procédé est capté puis réutilisé ou stocké, on parle d'«hydrogène bleu». La technologie est au point mais son utilisation reste balbutiante.

Pour «décarboner» l'hydrogène gris, une possibilité consiste à capturer le dioxyde de carbone émis lors du vaporeformage. On parle alors d'«hydrogène bleu». La solution la plus fréquemment envisagée est celle du stockage géologique, dans d'anciennes poches de gaz ou de pétrole vides. Cette opération supplémentaire est néanmoins très coûteuse, tant en euros qu'en énergie et seuls quelques projets pilotes ont aujourd'hui été lancés dans le monde.





**Dans ces conditions, quelle est la place de l'hydrogène dans le transport ? Cette technologie peut-elle réellement remplacer le pétrole ? Est-elle une meilleure solution que la batterie ?**

Dans le secteur du transport, l'hydrogène pourrait être consommé de deux façons. Soit comme carburant directement consommé par un moteur à combustion interne (MCI), soit au travers d'une pile à combustible.

Le MCI à hydrogène peut se présenter de deux manières, soit uniquement alimenté par de l'hydrogène (MCI H<sub>2</sub>), soit en « dual fuel », associé avec un autre carburant diesel ou GNC. Un engouement fort pour ces technologies a pu être observé dans les années 2000, chez BMW Group en particulier. Les mises sur le marché ont été abandonnées principalement pour des problèmes de coûts et le manque d'infrastructures. Aujourd'hui, ces technologies de MCI alimentées par du H<sub>2</sub> sont particulièrement regardées pour le transport lourd (camion, bateau ou train), en particulier le « retrofit » de certaines motorisations thermiques, pour des secteurs comme l'agriculture ou les travaux publics, car elles présentent l'avantage, à date, de pouvoir transmettre des fortes puissances.

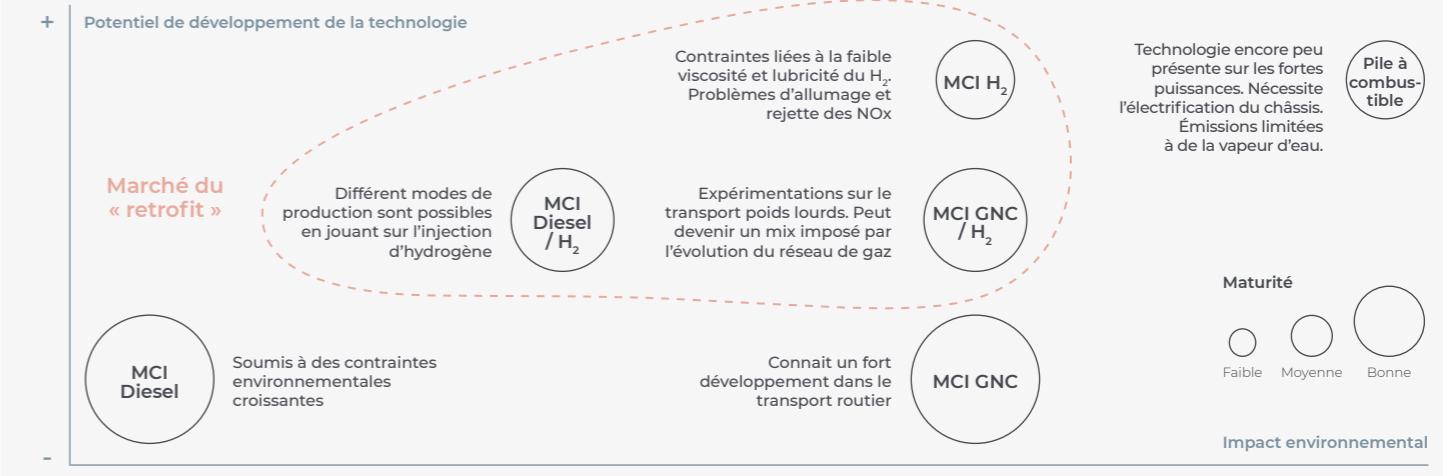
De son côté, la pile à combustible est une « mini usine électrique » dont le fonctionnement est exactement l'inverse de l'électrolyse : elle combine l'hydrogène d'un réservoir à l'oxygène de l'air pour produire de l'électricité en ne rejeter que de la vapeur d'eau. C'est avec cette électricité produite que le moteur électrique du véhicule est alimenté. Ainsi, dans la suite de cet article, le terme « véhicule à hydrogène » fera donc référence à l'usage d'une pile à combustible.

Un véhicule à batterie se recharge directement sur le réseau électrique et son rendement (rapport entre l'énergie utilisable et l'énergie

nécessaire) oscille autour de 70%, hors freinage récupératif. Le véhicule à hydrogène embarque une pile à combustible qui donc produit de l'électricité grâce à de l'hydrogène, lui-même produit avec de l'électricité. Il y a donc une étape supplémentaire entre le réseau électrique et l'alimentation du moteur du véhicule. Le rendement total de production d'électricité par hydrogène est ainsi de l'ordre de 35%. Cela signifie qu'en investissant 1 kWh d'électricité pour produire de l'hydrogène, nous ne disposons plus que de 350 Wh pour propulser le véhicule. En termes de rendement, le véhicule à hydrogène est donc désavantage par rapport au véhicule à batterie. Les véhicules à hydrogène ont cependant un avantage certain sur leurs homologues à batterie, le poids. Pour une même puissance, les véhicules à hydrogène sont moins lourds que des véhicules à batterie (malgré l'ajout d'un réservoir en carbone atteignant une masse de l'ordre de 15kg pour stocker 1kg d'hydrogène). Ainsi, l'hydrogène pourrait être la solution face à des batteries qui conviennent encore mal aux véhicules lourds tels que des camions, bus, bateaux ou trains. Le combo pile à combustible et réservoir d'hydrogène, plus léger, pourrait permettre de générer assez d'électricité pour déplacer ces engins lourds : tout en permettant de réduire le volume d'infrastructures nécessaires au « biberonnage énergétique ».

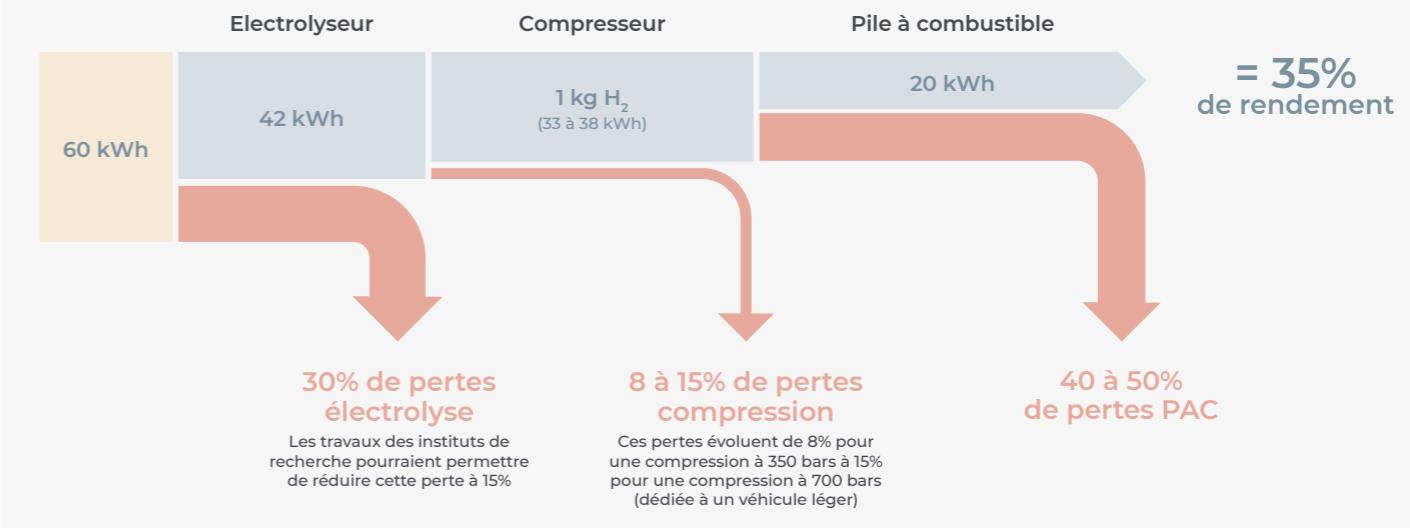
## Positionnement des technologies de MCI et pile à combustible en fonction des bénéfices pour l'environnement (avec hydrogène « vert ») et du potentiel de développement

Source des données: CETIM 2020



## Diagramme de Sankey de production et exploitation de 1 kg d'hydrogène

Source des données: ADEME 2020



## Qu'en est-il de la voiture particulière ?

Quelques grands constructeurs coréens et japonais investissent dans cette technologie et semblent y voir le futur d'une industrie déjà bouleversée par la voiture électrique à batterie. En France, PSA, Michelin, Faurecia, Renault dans son partenariat avec Plug Power ou encore Total s'intéressent eux aussi à cette technologie. La principale complexité au développement de la voiture particulière à hydrogène concerne, comme vu précédemment, la production du carburant.

La conception d'une voiture hydrogène nécessite les mêmes éléments qu'une voiture à batterie (dans des quantités différentes) et du platine pour fabriquer la cathode de la pile. D'un point de vue écologique, un léger avantage semble être donné au véhicule à batterie. Même s'il manque quelques éléments chiffrés, le film « A contresens » de Marc Muller et Jonas Schneiter, que nous vous recommandons, apporte, en ce sens, un nouveau regard

sur l'impact écologique de ces véhicules face à leurs homologues thermiques.

Une solution envisagée est la construction de stations à hydrogène « auto-alimentée » par des panneaux solaires pour produire localement l'hydrogène par électrolyse et remplir le réservoir du tout-venant.

Une voiture électrique consomme en moyenne 20 kWh / 100 km, soit, compte tenu du rendement d'une pile à combustible, environ 1 kg d'hydrogène au 100 km.

Il faudrait ainsi produire 130 kg d'hydrogène soit 7,8 MWh (environ 60 kWh nécessaires pour produire et comprimer à 700 bars

1 kg d'hydrogène) pour parcourir la distance

moyenne française de 13 000 km / an. 1 m<sup>2</sup> de panneau solaire produit dans les meilleures conditions en France environ 0,4 kWh/jour. Ainsi, environ 50 m<sup>2</sup> de panneaux photovoltaïques permet de produire suffisamment

d'hydrogène pour alimenter une voiture particulière pour un usage moyen. À cette échelle, le pari pourrait sembler gagnant pour un particulier, mais c'est sans compter la nécessité de disposer d'un toit avec assez de surface pour accueillir les 50 m<sup>2</sup> de panneaux photovoltaïques et la possibilité de les raccorder à un électrolyseur « individuel » (si un tel produit est un jour mis sur le marché). Ce type d'installation ne serait donc envisageable qu'en zone rurale ou périurbaine et de manière très privilégiée...

D'un point de vue plus réaliste, si nous prenons le cas d'une petite station de ville alimentant 100 voitures, réalisant chacune 200 km par jour. Le même calcul nous permet d'estimer qu'il faudrait installer près 30 000 m<sup>2</sup> de panneau solaire, soit la surface de presque 3 terrains de football, pour alimenter

notre petite station-service. La construction de station-service « hypermarché » autonome en production d'hydrogène paraît donc être un projet très ambitieux.

Pour dépasser le statut d'expérimentation, la production de l'hydrogène devra donc être nécessairement centralisée. Ce constat implique 2 leviers pour favoriser le développement du transport par hydrogène :

Investir dans un mix énergétique faisant la part belle aux énergies renouvelables et au nucléaire et développer un réseau logistique massif pour transporter, stocker et distribuer ce nouveau carburant.

Au-delà même de ce constat, plusieurs arguments compliquent aujourd'hui les ambitions de développement de l'hydrogène sur la mobilité électrique légère. Ces éléments peuvent être résumés au travers du tableau suivant :

La bataille sur le segment de la voiture particulière décarbonée paraît perdue pour l'hydrogène face à la batterie. Certes, l'hydrogène a la physique pour lui, mais la chimie permet à la batterie de l'emporter très largement. La promesse d'un plein en 5 minutes, fortement relayée par de nombreux lobbies, semble avant tout avoir pour effet de vouloir tout faire pour maintenir la dépendance du consommateur à réseau de distribution, avec un carburant bien plus facile à taxer que l'électricité. Dans une démarche de consommation responsable et compte tenu des avancées récentes en R&D, la batterie semble plus indiquée pour être l'avenir de la voiture particulière. De nombreux défis restent à relever et nécessitent des investissements importants. Tout cela impose de ne pas s'épargner pour se rapprocher toujours plus vite des derniers tours de roues de nos voitures à pétrole.

	Commentaires	Avantages
Le poids pour parcourir 500 Km	Un rapport de 1,6 en faveur de l'hydrogène: • 5 kg de H2 dans un réservoir de 130 kg, une PAC de 100 kg et une batterie de 70 kg → Total 305 kg • 500kg de batteries	
Temps de recharge	Un rapport de 5 en faveur de l'hydrogène • Un plein H2 en 5 minutes • La recharge d'une batterie en 30 minutes (charge > 150 kWh) ou jusqu'à 8-10h de charge (charge 3,7 à 7 kWh)	
Rendement	L'alimentation directe par la batterie a un rendement 2 à 3 fois supérieur à une batterie + PAC, avec un avantage en « simplicité » qui se traduit par des coûts d'exploitation, de maintenance et d'investissement plus faibles	
Coût kilométrique à la pompe	Un rapport 2 à 3 en faveur de la batterie • La voiture électrique à batterie coûte 4 à 5€ pour réaliser 100 km • La voiture électrique à hydrogène coûte 11 à 15€ pour réaliser 100 km	
L'état de l'art de l'innovation	La progression vers le Li-ion à électrolyte solide en particulier, rendant possibles des autonomies à 600 km, et une charge en moins de 10 minutes, grâce à des accus au graphène, grignote les avantages suscitée par les qualités de l'hydrogène en ce qui concerne la mobilité routière pour le grand public	
Les composants	Dans le duel batterie-hydrogène, la dépendance au lithium (3 à 5 kg / voiture) est nettement moins handicapante (réserves mondiales estimées à 60 MT) que l'usage de platine (rare et très coûteux) pour la cathode de la PAC.	
Les investissements	De lourds investissements ont été opérés et sont opérés aujourd'hui pour construire l'infrastructure électrique, qui permet déjà de réaliser des trajets longues distances (ex: super chargeurs tesla) contrairement à l'hydrogène.	

Source des données: Groupe industriel Alcen



## Stocker l'électricité, l'effet de levier pour les énergies renouvelables ?

Le stockage de l'électricité est un nouvel usage prometteur pour l'hydrogène. En effet, l'hydrogène pourrait nous permettre de pallier le caractère intermittent de nos énergies renouvelables. Selon leur installation, en fonction du vent ou de l'ensoleillement, il arrive parfois d'obtenir un excédent de production d'électricité. Cette électricité supplémentaire, nous pourrions l'utiliser pour produire de l'hydrogène par électrolyse et la stocker. Une pile à combustible permettra alors de générer de l'électricité lors des périodes moins propices.

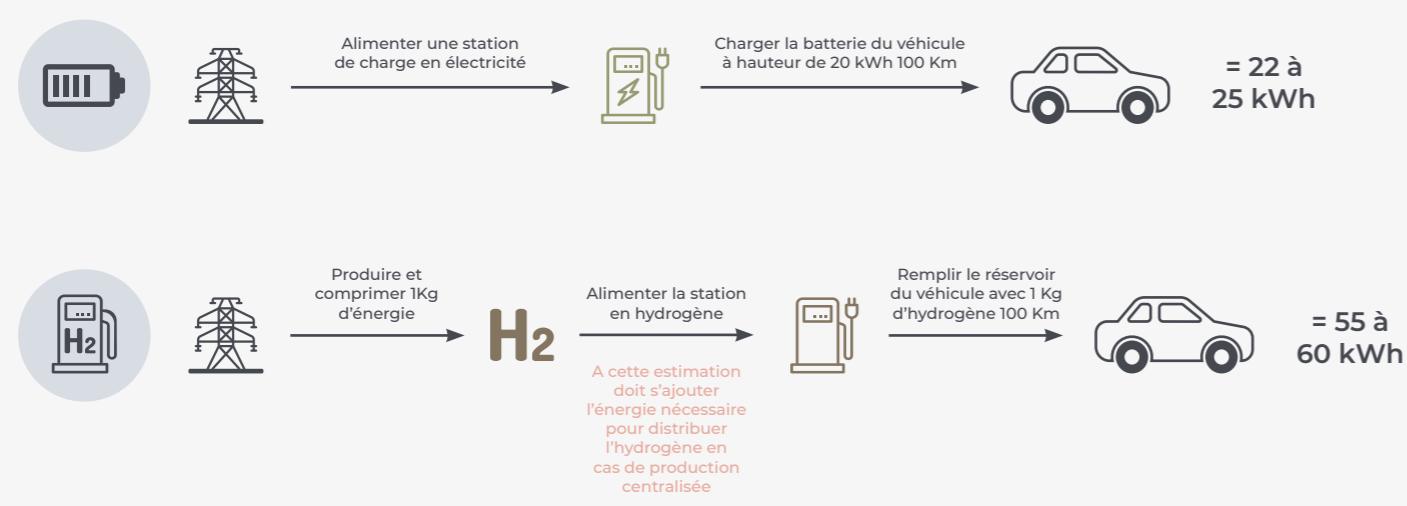
Dans cette application de stockage longue durée de l'électricité, l'hydrogène est compétitif face aux batteries: malgré son rendement plus limité. Les batteries ne permettent pas, en effet, de stocker de grandes quantités d'électricité dans la durée (phénomène du « vampire drain »). La logistique (stockage, transport et distribution) de l'hydrogène pur devient ici le défi principal.

L'hydrogène est l'élément le plus léger de l'univers. 1 kg d'hydrogène dans les conditions ambiantes de température et de pression représente un volume de plus de 11 mètres cubes. Un conteneur maritime standard ne permet de stocker à l'état ambiant que 3 kg d'hydrogène. Ainsi, la solution pour stocker, transporter et distribuer l'hydrogène est de le comprimer à 350 ou 700 bars ou de le réfrigérer jusqu'à -253 °C (très coûteux). L'infrastructure à construire est donc complexe et onéreuse (un réservoir à hydrogène coûte environ 100 fois plus cher

qu'un réservoir à gaz de ville pour prévenir tous risques d'explosion). Une piste industrielle envisageable est de contourner ce problème en convertissant l'hydrogène en matériaux plus simples à manipuler. Les deux principaux candidats sont le méthane, dont les infrastructures logistiques existent aujourd'hui, ou l'ammoniac, facile à conserver à l'état liquide, mais complexe à manipuler, car très corrosif et très毒ique.

Dans le cas du méthane, cette technique, s'appelle Power-to-Gaz. Nous utilisons le courant électrique « Power » pour produire de l'hydrogène ensuite converti en méthane de synthèse « Gaz ». Cette conversion supplémentaire affecte malheureusement le rendement général d'environ 10 points. Dans ces conditions, garantir un procédé « zéro émission » implique aussi d'être capable de capturer le CO<sub>2</sub> libéré lors de la consommation du méthane.

### Comparaison de l'investissement énergétique nécessaire pour parcourir 100 km avec une voiture électrique particulière





## Quel avenir pour l'hydrogène et pourquoi investir ?

En matière de mobilité, une exigence de très grandes autonomies pour des véhicules très lourds, comme c'est le cas pour les secteurs ferroviaire, naval, aéronautique et routier longue distance, pourrait justifier les développements de la filière hydrogène : en matière de PAC ou de MCI « dual fuel » H2/GNV principalement. De même, certains cas d'usage niches des flottes (rotation de véhicules autour d'une base commune par exemple), pourrait permettre de rentabiliser, à terme, une station hydrogène.

Mais, l'hydrogène est avant tout un gaz industriel majeur dont la production par vaporeformage doit être relayée par l'électrolyse à haute température, à partir d'une électricité décarbonée et/ou verte. Son exploitation, associée à la capture du CO2 constituera alors, comme en témoigne de nombreux projets récents en Europe du Nord, une formidable solution pour décarboner la pétrochimie, la production d'ammoniac et de méthanol, la sidérurgie et une partie de la production du ciment. En complément, l'hydrogène pourrait se démocratiser comme combustible dans la création de chaleur industrielle et ainsi réduire la part de la chaleur fatale (énergie thermique produite, mais rejetée dans l'atmosphère).

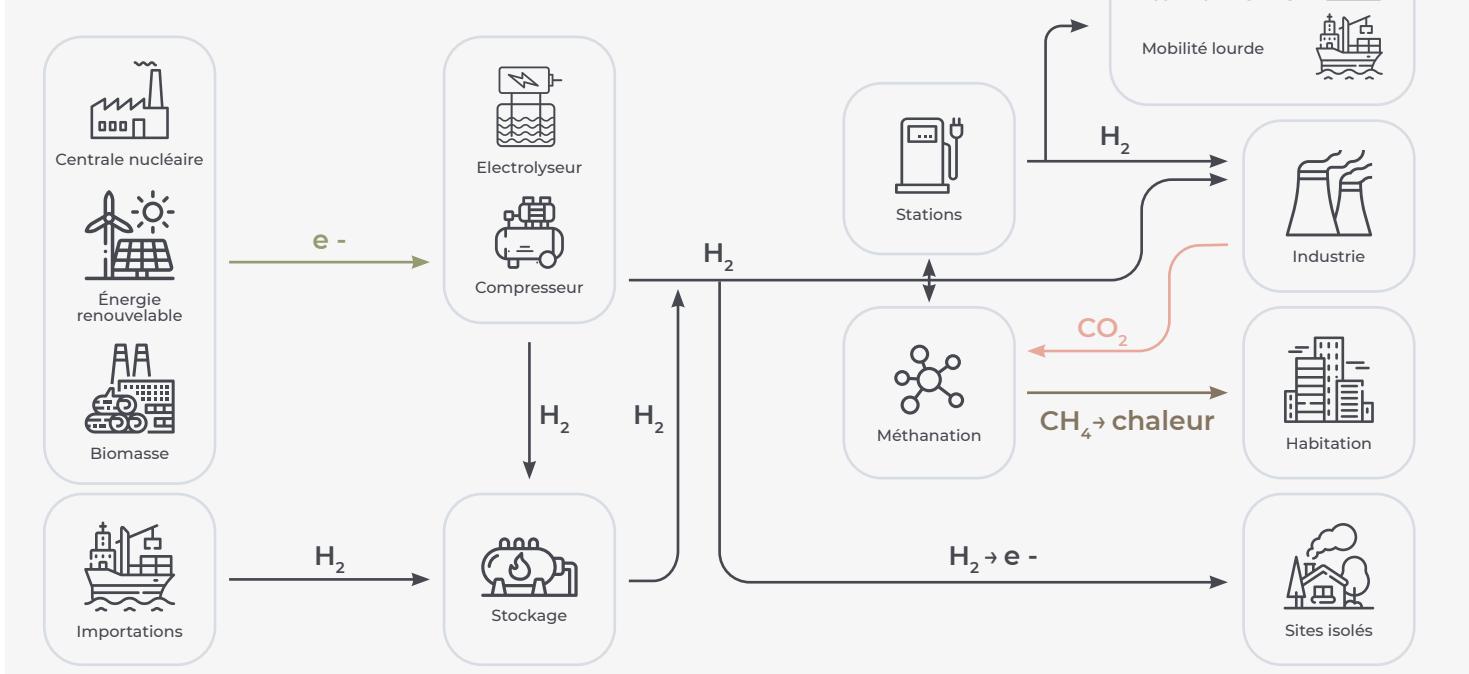
Le système énergétique de la France dispose actuellement d'une capacité de stockage correspondant à près de 20 % de la demande finale de gaz naturel. L'hydrogène, comme une solution de stockage

longue durée de l'électricité, pourra augmenter cette capacité et donner un nouveau souffle à la filière des énergies renouvelables.

Enfin, l'hydrogène pur, ou plus vraisemblablement sous forme de méthane de synthèse (par méthanation du CO2 industriel), pourrait représenter une source d'énergie attractive dans le secteur du bâtiment, pour des applications de chauffage et d'alimentation en électricité. Une solution qui pourrait répondre à environ 10% de la demande énergétique du secteur d'ici 20 à 25 ans.

La plupart de ces applications sont encore à l'état expérimental et nécessiteront, au mieux, 5 ans pour valider les technologies et quelques années supplémentaires pour les amener à maturité. La révolution hydrogène, qu'elle soit verte, jaune ou « bleue durable » prendra donc du temps, sûrement bien plus que le tempo imposé par un plan de relance.

### Schéma des usages possibles de l'hydrogène



Suivez nous :



@MawenziPartners

Contact

Pierre-Eric Perrin

M. +33 6 25 03 90 84 T. +33 1 83 64 28 39  
Pe.perrin@mawenzi-partners.com