

# Les vertus révolutionnaires de l'hydrogene



INNOVATE · ACCELERATE · CHALLENGE

## Armin Morabbi



Armin est le référent du cabinet IAC Partners sur les sujets de mobilité et de transition énergétique .  
Son expertise sur les sujets liés à la mobilité l'amène à contribuer aux réflexions du cabinet sur les véhicules à hydrogène, le transport autonome...  
Il supervise des projets dans des secteurs variés : ferroviaire, automobile, aviation, etc.

Références clients :



Principal  
armin.morabbi@iacpartners.com  
+33 (0)6 03 76 44 67

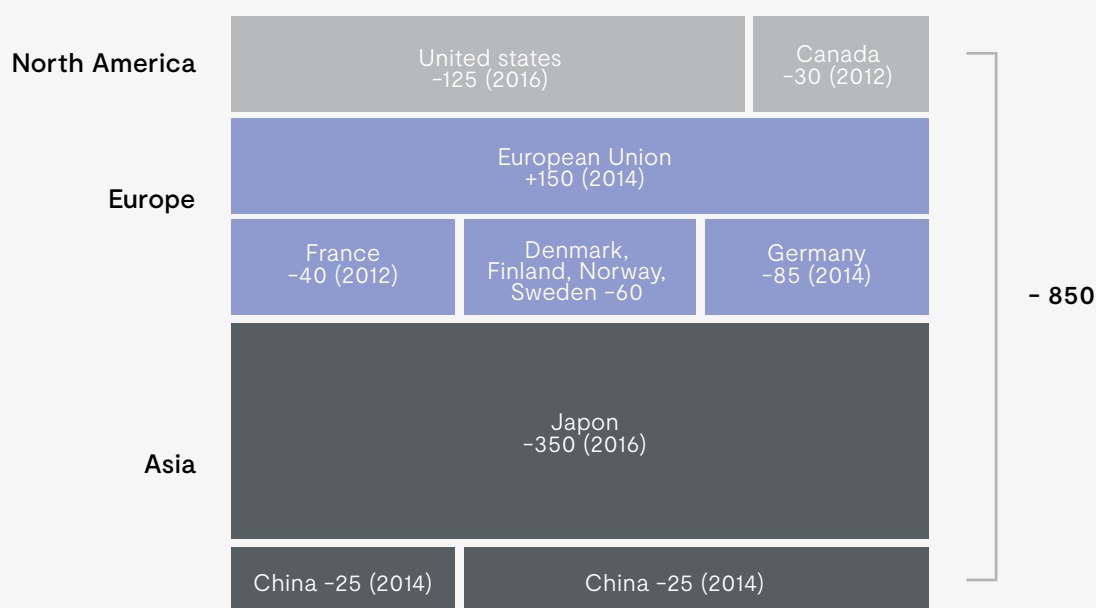
# Comment l'élément le plus léger de l'univers devient un acteur majeur de la transition énergétique

Comparée au charbon et au pétrole, l'électricité produite par les énergies renouvelables est limitée en termes de stockabilité, transportabilité et usabilité, ce qui freine en partie la transition amorcée vers les énergies décarbonées.

L'hydrogène comme vecteur énergétique apparaît aujourd'hui comme l'élément manquant sur la chaîne de valeur, qui, combiné avec d'autres technologies, pourrait faire de la transition énergétique une REVOLUTION énergétique.

L'investissement des pays industrialisés dans la filière hydrogène est révélateur de cette tendance. La France malgré son bon positionnement à l'échelle internationale, doit renforcer ses investissements dans les infrastructures de production et de transport ainsi que dans le développement de technologies permettant le « scaling up » vers des coûts comparables à l'électricité ou au pétrole.

## 850M€ d'investissements annuels dans l'hydrogène



# 1. Rappel historique

La maîtrise de l'énergie constitue un facteur clé de l'industrialisation au XIXe siècle. Chaque phase de développement technologique se caractérise par des gains de productivité colossaux : des modifications drastiques des modes de production s'opèrent notamment grâce à l'usage d'un nouveau combustible. Il faut trouver un combustible alliant disponibilité, rentabilité et transformabilité. Il est d'abord exclusivement question du charbon, puis du charbon et du pétrole, puis enfin d'un mixte entre pétrole (pour les usages de transport), gaz naturel (pour les usages résidentiels, industriels et énergétiques) et nucléaire (pour les usages énergétiques).

Pour schématiser, notre modèle énergétique actuel est construit sur une extraction de ressources fossiles de plus en plus rares détenues par un nombre très limité de pays et nécessitant un long acheminement à travers le monde jusqu'à de grosses installations pilotables de manière centralisée.

Le contexte actuel peut se caractériser par deux facteurs clés :

## **01 Des tensions croissantes sur les marchés énergétiques**

la demande mondiale d'énergie connaît une hausse soutenue avec le développement rapide des pays émergents (la Chine, l'Inde, le Brésil...) alors que les réserves s'appauvrissent, sans compter la géostratégie des approvisionnements qui se modifie.

## **02 Des exigences environnementales accentuées,**

tant contre les pollutions globales (changement climatique) que contre les pollutions locales (pollutions urbaines), poussant à l'utilisation d'énergies moins polluantes (gaz naturel, énergies renouvelables) mais sans réduction des consommations énergétiques.

La transition énergétique vers les énergies renouvelables permet d'alimenter de petites installations locales à partir de ressources elles aussi locales, dont le coût ne dépend d'aucune stratégie ou contexte géopolitique mais dont la disponibilité peut varier en fonction des conditions climatiques (pour le solaire et l'éolien en particulier).

# 2. Les enjeux de la transition énergétique dans la production et la mobilité

Dans la production, le problème principal n'est pas la centralisation en elle-même mais le fait que les grandes installations électriques émettent du CO2.

La réussite de la transition énergétique dépend de l'intégration de ces systèmes énergétiques décentralisés.

« La transition énergétique, la baisse du coût des énergies renouvelables et l'appétence pour une maîtrise locale de la production d'énergie font aujourd'hui envisager une modification profonde de notre système électrique. »

France Stratégie, 2017

Si nous réalisons cette transition, la question qui se posera pour l'avenir sera celle de la confiance que nous accordons au réseau :

· Un système autonome type Tesla, où chacun produit et consomme sa propre électricité au moyen d'une combinaison PV/batterie et où nous deviendrions plus ou moins autosuffisants, est une des approches possibles.

· L'autre modèle, qu'on peut appeler le « modèle du pool », utilise les effets positifs de l'agrégation et des interrelations au sein d'un grand réseau d'électricité alimenté par des sources intelligentes et renouvelables.

La France n'aura d'autre choix que de s'orienter vers un système hybride où coexisteraient un réseau centralisé et des boucles locales de tailles diverses où l'hydrogène aura tout son rôle à jouer.

Ce qu'il faut retenir de l'année électrique 2017 en France (données RTE) :

· Le parc de production français a poursuivi sa mutation avec la fermeture de cinq groupes thermiques au fioul (- 3 025 MW)

· Progression du parc des énergies renouvelables (+ 2 763 MW)

· Développement des parcs éolien et solaire, dont la production augmente de 14,8% et 9,2%, ce qui permet de compenser, en partie, la baisse de production nucléaire et hydraulique

· La consommation corrigée\* reste stable, avec 475 TWh.

\* Des aléas météorologiques et des effets calendaires et hors secteur de l'énergie



# La synthèse des travaux présentés par l'ADEME présente 6 constats majeurs :

- une demande de mobilité qui reste et restera forte et très différenciée selon les populations (âge, CSP) et les territoires (urbain/ périurbain/ rural) ;

- une nouvelle donne : la mutation progressive de l'offre de mobilité passant d'une approche « modale » à un système intermodal, de l'infrastructure à l'offre de service, de la logique d'offre à la qualité d'usage ;

- un besoin de nouvelles infrastructures de transports qui trouve ses limites compte tenu des ressources publiques et du besoin de modernisation de l'existant ;

- une mobilité participant à l'aménagement durable du territoire et répondant à ses enjeux environnementaux, sociaux (lutte contre la précarité énergétique, désenclavement) et économiques (attractivité) ;

- une priorité à donner aux modes alternatifs à la route même si le transport routier des marchandises et des personnes reste une réponse adaptée à bien des situations dont les territoires peu denses ;

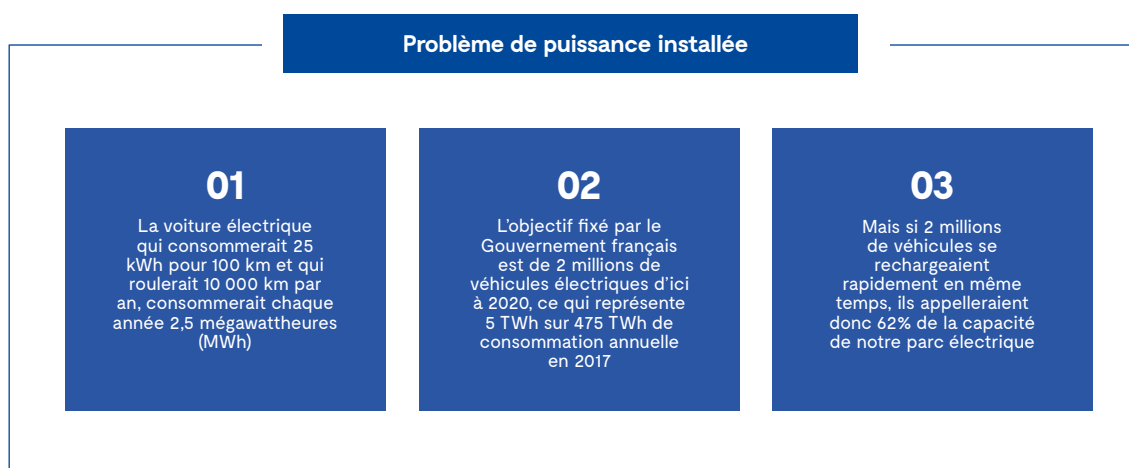
- la nécessaire réduction des flux, des émissions de GES et des consommations énergétiques en actionnant tant les technologies, l'organisation de l'espace que l'évolution des comportements.

Dans la mobilité aussi, plusieurs révolutions sont en cours et demain, la valeur ne sera plus dans le véhicule, mais dans la carte enrichie des services. Une mutation radicale se profile sous le triple effet : de l'intelligence artificielle qui renforce le pouvoir des plates-formes, de l'avènement du moteur électrique (sans carbone) et de l'évolution des pratiques.

L'alimentation par batterie du moteur électrique a fait son apparition dans notre environnement depuis plusieurs années. Ses évolutions technologiques lui ont permis d'augmenter ses performances et ainsi d'être intégrée par l'ensemble des constructeurs automobiles dans leurs gammes.

La batterie souffre néanmoins d'inconvénients majeurs pour en faire la seule solution de substitution aux énergies fossiles :

- le poids, qui la rend incompatible avec les véhicules de transports de charge lourde ;
- la durée longue de charge (40 minutes en charge rapide jusqu'à une demi-journée en charge domestique) et la faible autonomie (les batteries électriques se déchargent rapidement) ;
- le coût élevé, même si les premiers déploiements permettent de premières économies d'échelle ;
- la nécessité de mise en place d'un nouveau réseau d'alimentation sur le territoire ;
- mais surtout un problème de puissance installée :



L'hydrogène se révèle aujourd'hui un levier majeur de la transition énergétique, en se présentant comme une alternative sérieuse à l'électrique pour le stockage et le transport de l'énergie.

« La mobilité est dépendante du pétrole à 95 % et le secteur du transport est responsable de 23 % des émissions de CO2 dans le monde. Doit-on tout miser sur le véhicule électrique, alors que cela impliquerait des investissements de grande ampleur ? Songez qu'il faudrait doubler la taille du réseau électrique de Pékin pour y convertir à l'électrique 10 % du parc automobile. »

Isabelle KOCHER, CEO ENGIE, 11 juin 2018

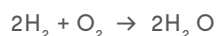
# 3. Présentation de l'hydrogène en 5 points

L'hydrogène de par ses propriétés physico-chimiques, constitue un moyen plus versatile et plus durable de stockage d'énergie que la batterie électrique comme nous le verrons ci-après.

## A. Les caractéristiques physico-chimiques

La molécule de dihydrogène, notée H<sub>2</sub>, se présente à température et pression ambiante sous la forme d'un gaz très volatile, inodore, incolore, non toxique et non polluant.

Sa combustion ne génère en effet que de l'eau, sans aucun rejet de CO<sub>2</sub> :



La molécule H<sub>2</sub> présente l'avantage d'être particulièrement énergétique. En effet, un kg d'hydrogène libère environ 3 fois plus d'énergie qu'un kilogramme d'essence (33 kWh/kg d'hydrogène contre 12kWh/kg pour l'essence).

En revanche, comme le dihydrogène est le gaz le plus léger sur Terre, il possède une densité énergétique volumique faible. Il occupe à poids égal, beaucoup plus de volume que les autres gaz. Ainsi, pour produire autant d'énergie qu'avec 1 litre d'essence, il faut 4,6 litres d'hydrogène comprimés à 700 bars.

Par simplification, le terme hydrogène est utilisé pour désigner le dihydrogène. L'hydrogène n'est pas une source d'énergie puisqu'il doit être produit à partir d'une source primaire, mais il joue le rôle de vecteur énergétique.

L'hydrogène est l'élément le plus abondant dans l'univers. Toutefois, il n'existe pratiquement pas dans la nature à l'état pur. Il se retrouve essentiellement combiné avec d'autres éléments comme dans l'eau, dans les hydrocarbures ou dans la biomasse.

Le principal risque lié à l'hydrogène est sa forte inflammabilité. Il possède une énergie minimale d'inflammation 10 fois inférieure à celle du méthane, composant principal du gaz naturel.



## B. La place dans le mix énergétique : stockage, transport

L'hydrogène se positionne comme :

- Un moyen de stockage sous forme gazeuse de l'énergie électrique afin de pallier l'intermittence des énergies renouvelables. En effet, l'électrolyse de l'eau, détaillée plus loin dans l'article, permet de convertir l'énergie électrique produite en hydrogène gazeux, forme plus durable que l'électricité. Les réseaux de gaz notamment peuvent permettre cet usage « power to gas » ou « gas to power » en stockant l'hydrogène produit.

- Un vecteur de transport d'énergie permettant soit de s'affranchir du réseau électrique dans certaines zones non desservies, soit de bénéficier d'un tampon pour réguler les variations de demande du réseau : il peut être transporté sous forme gazeuse en réseau ou dans des contenants sous pression. L'association d'une réserve à hydrogène et d'une pile à combustible rend possible le stockage de l'énergie et la production d'électricité n'importe où et n'importe quand, sans être relié au réseau électrique.

- Un vecteur permettant de décarboner les usages finaux de l'énergie, notamment dans le transport, le chauffage urbain et l'industrie : en effet, la conversion de l'hydrogène en énergie ne produit que de l'eau, et pas de dioxyde de carbone.

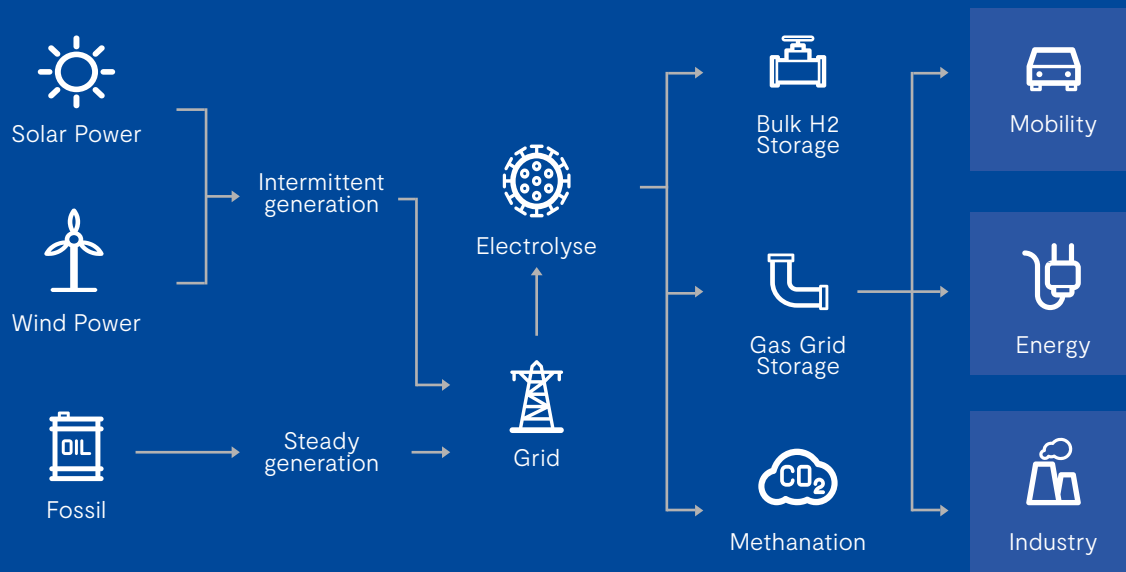
- Enfin, lorsque le stockage de CO2 sera suffisamment développé, l'hydrogène permettra de reconverter ce CO2 en produits organiques utilisés dans l'industrie par transformation chimique en méthane, méthanol, acide formique, urée. Dans une logique d'économie circulaire, les émissions de CO2 de l'industrie pétrolière pourront ainsi être compensées par une re-transformation de ce CO2 grâce à de l'hydrogène produit par des sources renouvelables.

Pour autant, l'hydrogène n'est pas en compétition avec la batterie électrique mais se positionne comme le chaînon manquant permettant la transition d'une mono-énergie identique pour tous les usages (le pétrole), vers un mix énergétique qui sera différent en fonction des usages.

L'usage de l'énergie	Vecteur énergétique		
	Pétrole	Hydrogène	Electricité
Transport urbain/ routier	✓		✓
Transport autoroutier	✓	✓	
Transport poids lourds	✓	✓	
Résidentiel	✓		✓
Industrie	✓	✓	✓

# L'hydrogène peut jouer plusieurs rôles dans la transition d'énergie

Power generation > Power conversion > Energy storage > Utilization



## C. Les technologies de production

Il existe aujourd'hui principalement 2 technologies de production de l'hydrogène :

- Le vaporeformage d'hydrocarbures qui représente 95% de la production actuelle d'hydrogène
- L'électrolyse de l'eau qui requiert une source d'énergie électrique

### 01 Production de l'hydrogène par vaporeformage du méthane

Le vaporeformage du gaz naturel qui est essentiellement composé de méthane (CH<sub>4</sub>) se produit entre 700 et 1100°C, sous une pression de 20 à 30 bars et en présence de vapeur d'eau. La vapeur d'eau réagit avec le méthane en produisant un gaz de synthèse composé de monoxyde de carbone CO et d'hydrogène H<sub>2</sub>. En présence d'un excès de vapeur d'eau, le monoxyde de carbone est oxydé en dioxyde de carbone, ce qui augmente la production d'hydrogène.

Dans ce processus, chaque kg d'hydrogène produit génère 10kg de CO<sub>2</sub>. L'usage de l'hydrogène quant à lui est neutre en CO<sub>2</sub>. Le vaporeformage ne fait donc que déplacer le problème de l'émission du CO<sub>2</sub>, de l'usage vers la seule production.

### 02 Production de l'hydrogène par électrolyse

L'électrolyse permet de décomposer chimiquement l'eau en dioxygène et dihydrogène sous l'action d'un courant électrique. La décomposition de l'eau est « forcée » par passage de courant (traduit par une circulation d'électrons) dans une cellule électrochimique.

Plusieurs technologies d'électrolyse sont aujourd'hui disponibles.

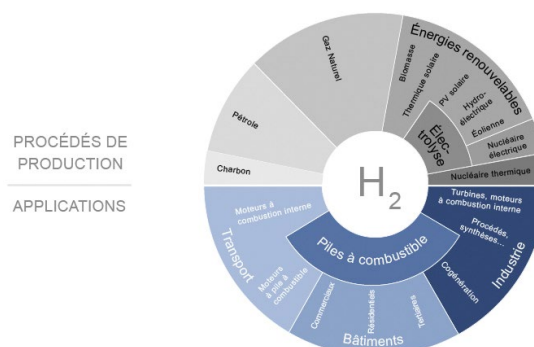
· L'électrolyse alcaline : c'est la technologie la plus mature aujourd'hui. L'électrolyse s'opère entre 80 à 180°C. Les rendements énergétiques sont de l'ordre de 70%, pour une durée de vie de 80 000 heures à 160 000 heures de fonctionnement

(soit environ 18 ans). L'avantage de ce type d'électrolyseurs, est qu'ils s'affranchissent de l'usage de catalyseurs à base de platine, ce qui rend cette technologie moins coûteuse que les électrolyseurs à membrane PEM.

· L'électrolyse PEM : Le domaine de température est de 80 à 120°C. Du fait de la forte acidité de l'électrolyte membranaire des membranes PEM, les électrodes sont à base de métaux précieux, notamment le platine, l'iridium, ruthénium, l'or, le rhodium ou le palladium. Le rendement de ces électrolyseurs atteint 70%.

· L'électrolyse haute température : à des températures de 500°C à 1000°C, Il s'agit de la technologie la moins mature mais qui présente l'intérêt de s'affranchir de métaux nobles pour les électrodes, et de réduire la consommation d'électricité nécessaire à la production. Le principe est de coupler la chaleur résiduelle avec l'énergie électrique produite dans les centrales nucléaires de génération IV. Le rendement de cette technologie peut atteindre 80 à 95% à terme.

Si elle est réalisée à partir d'énergie électrique renouvelable, l'électrolyse permet un bilan carbone de production et de consommation de l'hydrogène nul.



La chaîne hydrogène

(©Connaissance des Énergies d'après AFH2 – UE)

## D. Le stockage de l'hydrogène

Le stockage de l'hydrogène représente un enjeu majeur dans la chaîne de valeur. En effet la densité de stockage de l'hydrogène conditionne sa capacité à être transporté et à servir de vecteur énergétique. Le stockage peut s'effectuer sous forme gazeuse sous pression, liquide ou solide (sur matrice solide métallique) :

- Le stockage gazeux de l'hydrogène se fait sous haute pression à 350 ou 700 bars. Il s'agit de la forme la plus répandue et la plus mature pour un stockage à l'échelle industrielle. Le stockage gazeux se prête aux applications mobiles, pour alimenter des piles à combustible pour véhicules électriques par exemple. Les enjeux technologiques sont la capacité de compression, la capacité de stockage et le système de contrôle de la pression et le

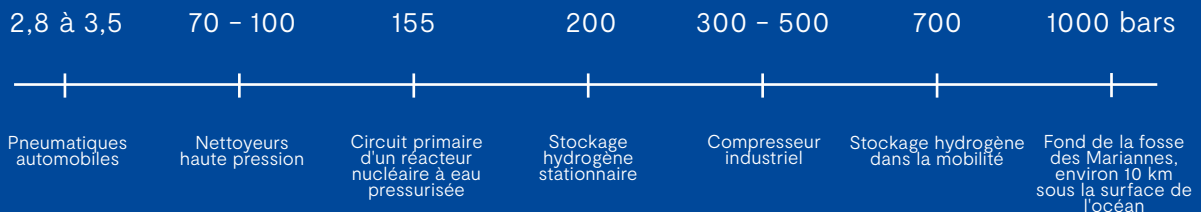
maintien de l'étanchéité. Quelques ordres de grandeur pour illustrer le défi que représente le stockage gazeux de l'hydrogène.

- Le stockage liquide se fait à pression atmosphérique, à des températures inférieures à  $-253^{\circ}\text{C}$

- Le stockage par voie solide, à température ambiante, sous une pression de 1 à 10 bar par absorption sur des matrices solides comme les nanomatériaux, ou des hydrures métalliques, composés de formule  $\text{MH}_x$ , où M représente un métal ou un alliage de métaux. Le défi est d'atteindre de fortes capacités de stockage à température ambiante.

## L'hydrogène en 3 dimensions :

En pression...



En taille...



La molécule d'hydrogène est si petite que les niveaux d'étanchéité requis sont extrêmes. En considérant que cette étanchéité doit être réalisée à 700 bars, il s'agit d'un réel défi technologique.

Capacité volumique stockage



## E. L'hydrogène dans la mobilité de demain

Tiré par la demande croissante du marché pour décarboner le transport, le marché des batteries au lithium ion a connu ces cinq dernières années des avancées technologiques de rupture, de sorte que la barrière à la commercialisation de masse a été franchie en 2017 : en 2018, le coût à l'achat d'un véhicule électrique (VE) de taille moyenne a été divisé par 2 par rapport à l'année précédente, pour une autonomie au-delà de 350 km.

Plutôt que d'entrer en compétition avec les véhicules électriques à batterie, les véhicules électriques à hydrogène viendraient en complément de l'offre électrique déjà existante, car les deux technologies présentent des caractéristiques qui les rendent complémentaires. De plus l'hydrogène électrique devrait bénéficier de l'engouement et de la maturité du marché de l'offre et de la demande pour l'électrique.

En synthèse, dans la voiture électrique à batterie (BEV), l'électricité est fournie par une batterie qui est rechargée en la branchant sur le réseau.

Faire une charge rapide de 50 kW, équivaut à rajouter un petit bâtiment sur le réseau.

Il va falloir s'habituer à charger au moment des arrêts mais ne pas s'arrêter pour charger.

Les chargeurs rapides rechargent 80% de la batterie en 40 minutes, pour permettre de faire 400 km.

Le stockage par batterie nécessite une modification profonde des usages.

Dans le cas de la voiture à hydrogène, l'hydrogène est stocké dans un réservoir sous pression et l'électricité est produite par une pile à combustible qui transforme l'hydrogène en électricité.

La voiture à H2 intègre une motorisation électrique identique à celle des autres VE

L'H2 n'est pas le combustible qui fait marcher la voiture, mais est la forme de stockage de l'électricité

H2 : 4 minutes de recharge pour parcourir plus de 600 km

Le complément de l'H2 permet de s'affranchir de solutions adaptées aux usages

Là encore, les vertus du vecteur Hydrogène en font une solution complémentaire prometteuse pour répondre à l'ensemble des usages de la mobilité.

La plus faible densité énergétique des batteries les rend plus adaptées à la conduite urbaine

tandis que l'hydrogène, avec une meilleure densité énergétique convient mieux aux véhicules plus lourds et aux grandes distances. Le marché devrait donc se développer en priorité dans ce dernier segment, notamment dans les transports publics.

# 4. Le développement actuel de la filière hydrogène

## 1. Coordination des industriels à l'échelle mondiale : Hydrogen Council (dont les Français Plastic Omnium, ENGIE, ALSTOM, Air Liquide, McPhy)

Suite à la COP 21 à Paris en décembre 2015, 18 industriels, acteurs historiques de l'énergie et de la mobilité, se réunissent en un Consortium Hydrogène (Hydrogen Council) pour affirmer leur ambition de faire de l'hydrogène un vecteur majeur de la transition énergétique. Selon le Consortium, l'hydrogène pourrait contribuer de 1/5 à l'objectif d'abattement de 60% des émissions de CO2 liées à l'énergie d'ici 2050. Selon le scénario de l'Hydrogen Council, les véhicules alimentés à l'hydrogène pourraient représenter en 2050, 20% de la flotte totale de véhicules, soit environ 400 millions de voitures, 15 à 20 millions de camions et 5 millions de bus.

Le groupe est actuellement composé de 24 multinationales de premier rang et de 15

acteurs dynamiques de la chaîne de valeur qui représentent un chiffre d'affaires global supérieur à 1 600 milliards d'euros et plus de 2,5 millions d'emplois dans le monde.

La bonne représentation des industriels français dans le consortium montre la présence de la France parmi les précurseurs de la filière à l'international.

A l'échelle nationale, les investissements effectués à ce jour en France sont importants mais la filière hydrogène doit capitaliser sur les atouts de la France pour renforcer son avantage concurrentiel face aux Etats Unis et aux pays asiatiques.

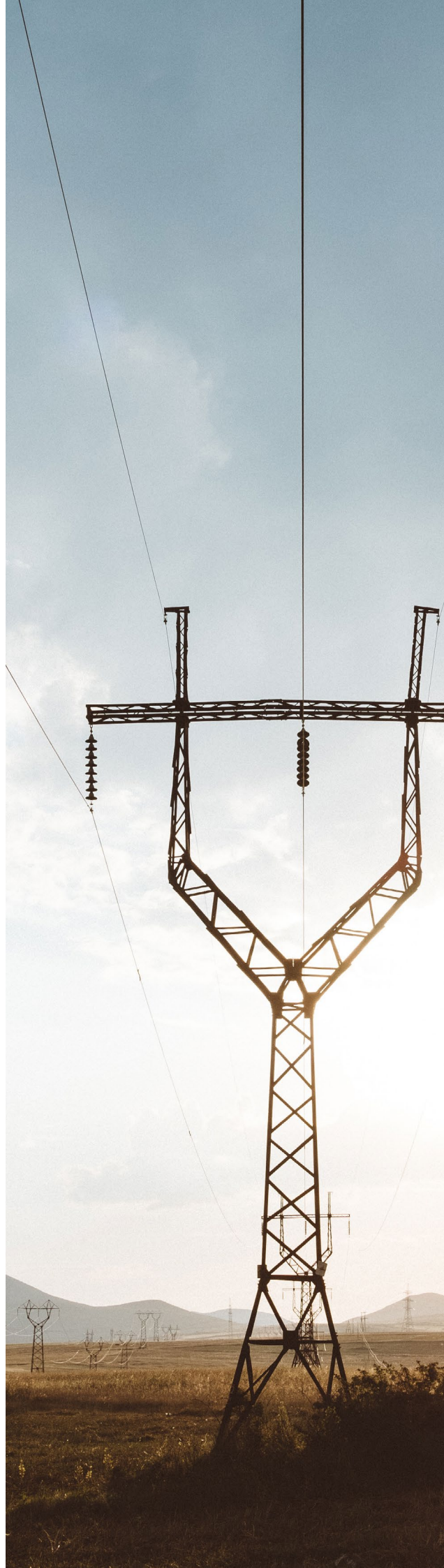
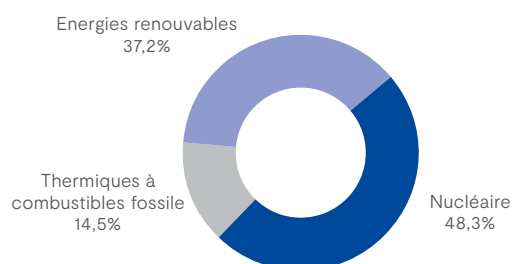


**Hydrogen Council**

## 2. Atouts de la France : mix énergétique existant, réseaux, contextes locaux

La France dispose de nombreux atouts favorables à la transition décarbonée via l'hydrogène :

- D'une part le mix énergétique : du fait que les énergies décarbonées représentent 85% du parc installé et 90% de la production d'électricité : la production d'hydrogène par électrolyse électrique serait déjà majoritairement décarbonée.
- D'autre part, la couverture nationale déjà existante en réseaux électrique et gaz facilite le transport des 2 vecteurs que sont l'électricité et l'hydrogène. Mais la couverture régionale inégale, loin d'être un frein, est plutôt un atout permettant d'inciter dans les régions les moins couvertes, au développement à l'échelle locale d'une production renouvelable et décentralisée d'hydrogène. Le transport en commun dans ces régions, généralement moins desservies en transports, pourra alors s'appuyer sur une nouvelle offre de bus alimentés à l'hydrogène.
- Mais aussi l'avance de la France sur la technologie d'électrolyse à haute température, aujourd'hui moins mature, mais plus prometteuse en terme de rentabilité et de rendement
- Et enfin, le soutien de l'Etat français à cette révolution, à travers le Plan de déploiement de l'Hydrogène.



### 3. Programmes institutionnels : le signal de l'investissement de l'état français

La France a présenté le 1er juin 2018 son Plan de Déploiement de l'hydrogène pour la transition énergétique. La filière française est à la pointe avec de nombreux industriels de premier rang sur la scène internationale qui sont présents sur toute la chaîne de valeur.

L'objectif de ce plan est d'accélérer les premiers déploiements industriels de l'hydrogène décarboné pour en faire un pilier de la transition énergétique à moyen terme.

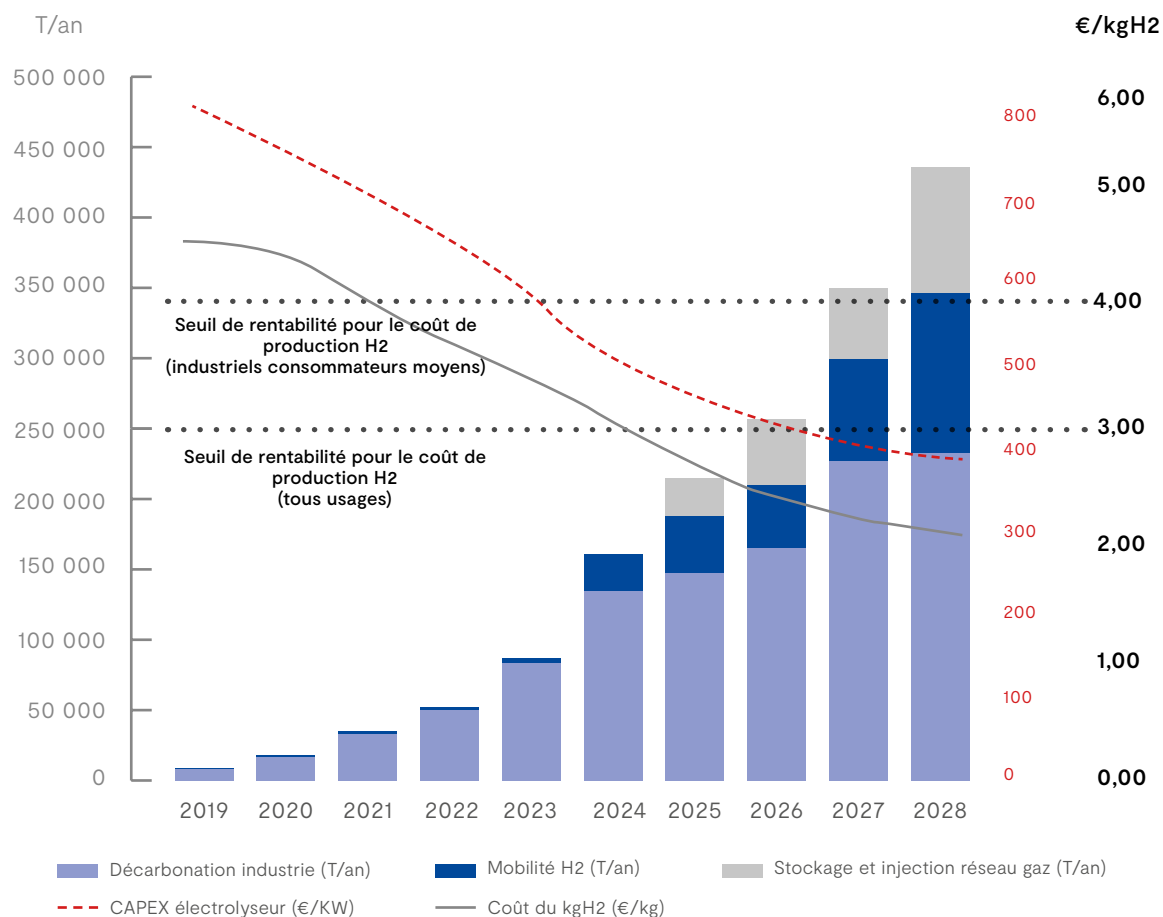
La feuille de route concrète et chiffrée se structure autour de 3 axes :

- 01 La production par l'électrolyse pour l'industrie, phase d'amorçage du plan français**
- 02 Une valorisation par des usages de la mobilité en complémentarité des filières batterie**
- 03 Un élément de stabilisation des réseaux énergétiques sur le moyen-long terme**

Toutes les briques technologiques existent dans notre industrie pour permettre d'aborder tous les usages de l'hydrogène. L'amorçage doit se faire en commençant par les secteurs les plus proches de la rentabilité pour permettre un développement pérenne maximisant l'effet des soutiens publics.

Le graphique suivant illustre la stratégie française :

Baisse du coût de l'hydrogène en fonction des volumes de production H2 par usage et de la baisse du CAPEX des électrolyseurs liée aux puissances annuelles fabriquées





## AXE 1 :

# Production d'H2 par électrolyse pour l'industrie, phase d'amorçage du plan français

Le coût de revient de l'hydrogène produit en grande quantité à partir de produits fossiles (vaporeformage du gaz) s'élève aujourd'hui entre 1,5 et 2,5 €/kg pour les clients industriels consommant de gros volumes (ex : raffineries).

Cependant, pour certains usages moins intensifs mais suffisamment stables (ex : verrerie, agroalimentaire, métallurgie, électronique), pour lesquels l'hydrogène est transporté et acheminé par camion, dit « usages industriels diffus », l'hydrogène revient entre 10 et 20 €/kg, rarement en dessous de 8 €/kg.

Ce coût pourrait atteindre, à l'horizon 2028, 2 à 3 €/kg, ordre de grandeur comparable au prix aujourd'hui payé par les grands industriels consommateurs d'hydrogène.

### L'ENJEU :

Faire passer le coût de revient de l'hydrogène de 10-20€/kg à 4-6€/kg pour les usages peu intensifs mais suffisamment stables, représentant 20 % du marché et pour lesquels l'hydrogène est transporté et acheminé par camion : verrerie, agroalimentaire, métallurgie, électronique.

« L'objectif de production d'hydrogène décarboné dans les usages de l'hydrogène industriel en France est de 10% en 2023 et 20 à 40% en 2028.

Il sera accompagné par la mise en place en 2020 d'un système de traçabilité sur l'origine de l'hydrogène, afin que cet hydrogène décarboné ou produit à partir d'énergies renouvelables puisse être valorisé par les acteurs. »

## AXE 2 :

# Une valorisation par des usages de la mobilité en complémentarité des filières batterie

En raison d'un effet volume encore limité, le coût total de possession d'un véhicule hydrogène reste supérieur à celui des équivalents thermiques (entre 20 et 50%).

Les avantages des véhicules thermiques se retrouvent surtout dans certains transports lourds (routier, ferroviaire et fluvial), pour lesquels le poids, l'encombrement et l'énergie embarquée des batteries restent pénalisants. Ces transports lourds sont un levier majeur pour assurer rapidement des consommations de volume d'hydrogène important.

### L'ENJEU :

A l'horizon 2030, grâce notamment aux progrès espérés en termes de coût de l'électrolyse, l'hydrogène décarboné distribué en station devrait être à un niveau de prix comparable (< 7 €/kg) au coût de l'énergie pour un véhicule diesel.

« Pour développer la mobilité à partir d'hydrogène, il faudra :

- accompagner le développement d'une gamme de véhicules lourds routiers mais aussi pour d'autres modes (bateaux, trains, aéronautique).
- poursuivre la logique de flottes territoriales, sur la base de l'hydrogène produit dans la phase d'amorçage. A ce titre, le rôle des collectivités pour agréger les usages au sein de projets territoriaux, autour des industriels et des utilisateurs présents sur leur territoire est primordial.

D'autres usages pourront d'ailleurs être envisagés dans ces projets territoriaux (par exemple, mise en commun d'usages industrie/mobilité). »

## AXE 3 :

# Un élément de stabilisation des réseaux énergétiques sur le moyen-long terme

L'introduction de l'hydrogène dans les réseaux de gaz naturel constitue une opportunité de réduction de l'utilisation de combustible fossile importé. Ce principe est à l'étude notamment aux Pays-Bas où il est même envisagé de remplacer les gaz naturels par l'hydrogène, mais aussi en France au travers des projets d'expérimentation GRHYD et JUPITER 1000.

Un groupe de travail avec les industriels concernés devra être missionné pour préciser les données technologiques et les mesures réglementaires qu'il convient de mettre en œuvre pour permettre l'injection d'hydrogène dans les infrastructures gazières, avec une première restitution avant fin 2018.

### L'ENJEU :

A moyen terme, l'hydrogène pourra contribuer à la flexibilité du système électrique en apportant un mode de stockage notamment saisonnier, nécessaire lors d'une intégration accrue des énergies renouvelables non pilotables.

En France, où nous avons l'un des réseaux les plus stables, un stockage électrique inter-saisonnier à base d'hydrogène – pour lequel les batteries ne sont pas pertinentes – ne serait nécessaire qu'à partir de 60% d'énergies renouvelables dans la production totale... ce dont nous sommes encore loin. En revanche, dans des pays disposant de réseaux incomplets ou instables, ce stockage stationnaire va se développer très vite.

Florence Lambert, Directrice du CEA – LITEN – Les Défis du CEA n°227 (mai 2018)

# 5. Réussir le défi de la transition vers l'hydrogène

Dans le domaine de la mobilité, la filière hydrogène suscite de l'intérêt dans de nombreux pays.

Déjà pionnière en matière de voiture électrique, la Chine (1ère puissance mondiale depuis 2010) s'est également lancée dans le match de la mobilité hydrogène et prévoit une vente de véhicules à grande échelle pour 2030.

Le Japon dont l'industrie nucléaire a souffert du syndrome consécutif à Hiroshima-Nagasaki puis à Fukushima a besoin de ressources énergétiques locales afin de réduire ses importations massives de gaz naturel liquéfié (LNG) pour subvenir à l'importante demande de son archipel très peuplé et très industrialisé.

La politique active de l'Allemagne la place en position de leader. Les subventions portent sur différentes applications allant des voitures aux transports publics en passant par l'énergie. Le Coradia iLint d'Alstom, premier train à hydrogène

au monde, a transporté cet été ses premiers passagers en Allemagne, pays où moins de la moitié du réseau ferré est électrifiée.

Pour finir, sous la pression de l'opinion publique suite au Dieselgate (scandale automobile de triche généralisée aux contrôles pollution), les grandes métropoles du monde accélèrent leur politique relative à la mobilité zéro émission et envisagent d'interdire l'usage de voitures diesel dans les centres ville à horizon 2020-2025.

De grands appels d'offres stratégiques sont lancés pour remplacer et mettre à jour les vieilles flottes de bus diesel (principalement équipée de moteurs Euro 3).

La France va s'appuyer sur l'expertise stratégique de ses industriels pour accélérer sa transition énergétique et contribuer par la même occasion au renforcement de leur compétitivité.

« Toyota ne le dit pas trop fort mais la grande difficulté de construire des piles à combustibles explique en partie l'attirance du Japon concernant cette technologie. Le business de la voiture électrique ressemble à celui des téléphones portables : simple, modulaire, facile à assembler et vulnérable aux nouveaux entrants provenant de Chine et de la Silicon Valley. »

Financial Times (28 mars 2017)

# Les 3 défis principaux à relever pour réussir la transition vers l'hydrogène :

## 1. Qualifier les technologies innovantes à court terme pour avoir une avance compétitive à l'échelle significative du MWe

Comme à chaque déploiement d'innovation, il est nécessaire de conjuguer les efforts de R&D (pour l'amélioration des performances et des rendements notamment de briques technologiques) et la mise en place de démonstrateurs ou « Proof of Concept » (POC) afin d'étudier l'intégration des solutions sur la chaîne complète de la valeur.

La mise en perspective de ces solutions avec les besoins des marchés doit permettre de valider les cibles prioritaires, leurs besoins spécifiques en termes d'usages, de performances et de coûts. Dans une filière naissante où les investissements initiaux (CAPEX) représentent environ 50% des coûts de production d'énergie, la nécessité d'anticiper les prochaines évolutions des marchés

est vitale, sous peine de devoir réinvestir trop souvent.

Olivier Saint Esprit, Partner chez IAC, dans la publication « Sécuriser et optimiser les budgets de développement des projets » dresse un état des lieux des écueils et des bonnes pratiques dans l'évaluation et le pilotage de projets dans le secteur de l'aéronautique. Plusieurs des notions et des outils abordés sont intéressants pour le secteur de l'énergie.

Les échelles d'évaluation de la maturité doivent s'adapter en fonction du contexte afin de donner de la visibilité aux acteurs sans ralentir inutilement le processus.

## 2. Pouvoir concurrencer économiquement les solutions « fossiles » sur les segments de marchés cibles

Au-delà des bonnes pratiques, une vision cross-industry permet aussi de gagner du temps en allant capter le savoir-faire d'autres secteurs leader sur certaines technologies pour renforcer la maturité des solutions, mais aussi celle de la supply chain.

L'architecture des systèmes et les solutions techniques différeront en fonction des business models.

Notre expérience dans le secteur de l'énergie, la mobilité et d'autres secteurs pourvoyeurs de technologies comme l'aéronautique et la défense nous amène à penser que ces objectifs ambitieux sont accessibles à la condition d'avoir une remise en question rigoureuse et profonde des solutions techniques très en amont des phases d'industrialisation.

### 3. Intégrer dès le départ la dimension de nouveaux modèles économiques pour définir des architectures évolutives

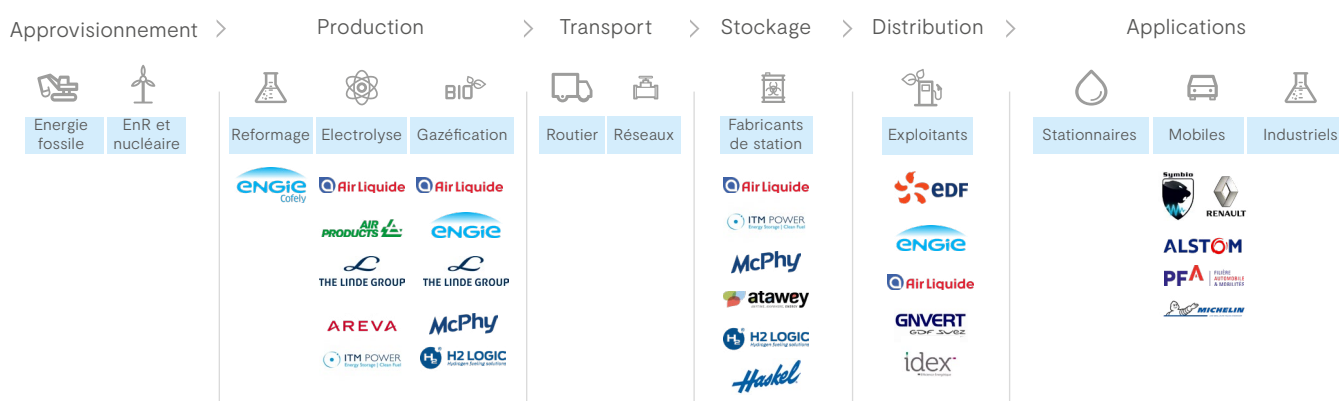
Chaque révolution est une opportunité à saisir. Les acteurs de la filière naissante de l'hydrogène doivent :

- Affiner leurs modèles économiques afin d'être en mesure de donner des signaux économiques clairs et pérennes.
- Anticiper l'évolution de la chaîne de la valeur afin de se positionner sur les segments les plus porteurs

A titre d'exemple dans la mobilité, plusieurs révolutions sont en cours et demain, la valeur ne sera plus dans le véhicule, mais dans la carte enrichie des services. Une mutation radicale se profile sous le triple effet de l'intelligence artificielle qui renforce le pouvoir des plateformes, du moteur électrique et de l'évolution des pratiques.

Les évolutions programmées et/ou latentes de la chaîne de valeur, des usages et des technologies doivent être intégrées dans de nouveaux business models innovants pour capter de nouveaux revenus. Ce thème fera l'objet d'une future publication IAC.

Filière hydrogène : de nombreux acteurs encore peu présents sur l'ensemble de la chaîne de valeur



<http://www.spinpart.fr/hydrogene-une-opportunite-pour-le-mix-energetique/>



## Pour conclure

La filière hydrogène suscite un intérêt croissant à l'échelle mondiale. Pour autant les signaux faibles observés restent à convertir en tendance de fond pour réussir la révolution énergétique décarbonée nécessaire à la préservation de la planète.

Pour cela, une meilleure maturité technico-économique au sein de chaque maillon de la chaîne de valeur est nécessaire mais non suffisante. Pour que le modèle soit viable, l'articulation entre ces différents chaînons est essentielle : la définition du business model de

chaque chaînon repose sur une expression du besoin bien identifiée du chaînon suivant.

IAC Partners dispose, de par sa connaissance des acteurs sur l'ensemble de la chaîne, d'une vision transversale permettant de faciliter la coopération entre différents acteurs et de créer de la valeur au bon endroit et au juste besoin.