



## La filière hydrogène-énergie en France

Le développement de la filière hydrogène accélère, porté par la multiplication des projets de démonstration et la montée en puissance des investissements : plus de 50 acteurs français se mobilisent fermement pour répondre aux enjeux d'un marché qui pourrait représenter 20% de la demande d'énergie en 2050.

*Janvier 2019*

# Sommaire

0

Executive summary

1

La structuration du marché et des acteurs en France

2


Les nouveaux usages de l'hydrogène aux perspectives prometteuses

3


Stratégies et défis de la filière hydrogène-énergie


### H<sub>2</sub>

**Vecteur énergétique** d'avenir en raison de ses facultés de **stockage** et sa **forte densité énergétique**, l'hydrogène se présente aujourd'hui comme un substitut possible aux hydrocarbures, et un moyen efficace pour faciliter l'intégration des énergies renouvelables. Les quelques **60 millions de tonnes d'hydrogène produites par an** sont issues à plus de 95% d'énergie fossile et sont essentiellement utilisées comme matière première pour la chimie et le raffinage pétrolier. L'hydrogène décarboné et l'hydrogène d'origine renouvelable pourraient cependant être des contributeurs majeurs à la réalisation des objectifs environnementaux ambitieux que s'est fixée la France, et ouvre de réelles perspectives de croissance écologique.

 L'hydrogène peut servir à produire de l'électricité par l'intermédiaire d'une pile à combustible, ou être lui-même produit à partir d'électricité via la réaction d'électrolyse de l'eau. Si l'électricité utilisée est d'origine renouvelable, **l'hydrogène produit sera « vert »**. C'est cette réaction qui est à l'origine de l'intérêt suscité par l'hydrogène aujourd'hui et qui permet le développement de nouvelles applications de l'hydrogène-énergie, amenées à transformer de nombreux secteurs :

- Les transports, puisqu'équipés d'une pile à combustible alimentée par hydrogène, **les véhicules hydrogènes (FCEV) représentent une alternative de choix pour répondre aux défis de la mobilité durable**. Ils ne rejettent que de l'eau, disposent d'une autonomie de l'ordre de 800km, et se rechargent en moins de 5 minutes.
- Dans le cadre d'un mix électrique futur toujours plus renouvelable, le vecteur hydrogène-énergie permet de **pallier l'intermittence des énergies renouvelables** en stockant, sous forme gazeuse, l'électricité excédentaire produite lors des périodes de forte production et de faible consommation (Power-to-Gas). Le stockage d'énergie rendu possible par l'hydrogène permet aussi d'étendre les perspectives de l'autoconsommation à l'échelle d'une maison, d'un bâtiment ou d'un village.

 Les impacts de la montée en puissance de ce vecteur énergétique sont loin d'être négligeables. L'essor de la mobilité hydrogène permettrait de réduire les polluants atmosphériques de plus **70 000 tonnes d'oxyde d'azote** et de **60 000 tonnes de CO par an d'ici à 2050**. De manière plus générale, le déploiement des nouvelles applications de l'hydrogène-énergie pourrait **réduire d'environ 55 Mt les émissions de CO<sub>2</sub>** en France, et pourrait générer **un marché de plus de 20Md€ en 2050, créant ainsi plus de 150 000 emplois**<sup>1</sup>.

 Aussi la dynamique initiée au début de la décennie avec **l'émergence de start-up innovantes** s'est amplifiée ces dernières années grâce aux **investissements importants de la part des industriels et énergéticiens** - notamment les prises de participation de EDF et ENGIE dans McPhy et Symbio. Au niveau politique, la dynamique **insufflée par les territoires** se poursuit avec **l'émergence d'une centaine de nouveaux projets en deux ans**, notamment dans le cadre de l'appel à projet « Territoires hydrogènes » lancé en 2016. Cette dynamique territoriale s'est vu complétée en 2018 d'une **stratégie nationale de développement de la filière portée par le Plan Hydrogène puis la Programmation Pluriannuelle de l'Énergie (PPE)**. Néanmoins, les aides financières promises par le gouvernement restent limitées face aux besoins en investissement nécessaires au développement des infrastructures et à l'amélioration des rendements des technologies hydrogène.

# Sommaire

0

Executive summary



La structuration du marché et des acteurs en France

2

Les nouveaux usages de l'hydrogène aux perspectives prometteuses

3

Stratégies et défis de la filière hydrogène-énergie



## 1 La structuration du marché et des acteurs en France

De la filière historique à l'émergence des futurs marchés de l'hydrogène

---

### La filière hydrogène est une filière ancienne qui s'est construite depuis plus de deux siècles

- La **filière historique de l'hydrogène** se développe à partir du début du XXème siècle.
- Elle regroupe alors la **production d'hydrogène industriel**, la **distribution** et enfin la **consommation à travers les industries chimiques et pétrolières**.

### Des compétences fortes au sein de la filière historique assurées par de grands groupes français

- **Air Liquide** dynamise **l'ensemble de la filière** de par son expertise, sa capacité d'investissement en R&D et sa proximité forte avec le tissu industriel.
- **Total** et **ENGIE**, acteurs majeurs de la chaîne de valeur du gaz naturel, participent depuis plusieurs années à l'émergence de la filière hydrogène-énergie à travers des **travaux de recherche et des projets de démonstration**.

### Les années 2000 marquent l'émergence d'une nouvelle filière de l'hydrogène-énergie

- Les technologies associées aux **piles à combustible** et au **stockage de l'hydrogène** passent le stade de la recherche expérimentale et **gagnent en maturité**.
- Un réseau de **PME innovantes** émerge à partir du milieu des années 2000 pour développer les **nouvelles applications de l'hydrogène** : transports, services réseaux (Power-to-Gas), applications stationnaires et mobiles.
- Ces dernières années, les **grands groupes industriels** français des secteurs du **transport et de l'énergie** multiplient les **investissements et prises de participation** dans les PME spécialisées dans les nouvelles applications de l'hydrogène-énergie.

### La France a des atouts pour se positionner en tête de course face aux nouveaux enjeux de l'hydrogène

- Une **offre complète de l'industrie française**, positionnée sur l'ensemble des nouvelles filières de l'hydrogène, par l'intermédiaire de PME-PMI toujours plus nombreuses, dans lesquels investissent les grands groupes industriels et énergéticiens.
- Un **tissu industriel de pointe associé à des laboratoires de recherche et des universités** qui se regroupent autour de **plateformes d'innovation** pour développer de nouvelles solutions et conforter leur leadership en Europe et à travers le monde.
- Un **savoir-faire reconnu**, grâce à des projets à forte visibilité et des industriels leaders dans leur domaine, **qui s'exporte en Europe et à l'international** et qui doit permettre à la filière française de passer de l'étape R&D à celle de la commercialisation de technologies.

# 1 La structuration du marché et des acteurs en France

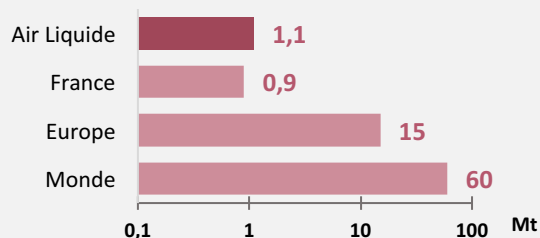
L'implication dans la filière hydrogène industriel est assurée par de grands groupes

L'hydrogène (H<sub>2</sub>) est aujourd'hui presque exclusivement **produit à partir d'énergie fossile** et **utilisé comme composant chimique intervenant dans des procédés industriels**, principalement le **raffinage** et la **production d'ammoniac**. De nouveaux procédés, dans le domaine de la sidérurgie et de la production de biocarburants de seconde génération, pourraient accroître à l'avenir ces usages industriels de l'hydrogène.

## Production

Environ 60 Mtonnes d'hydrogène ont été produites en 2017 dans le monde

- La production industrielle est réalisée au sein d'unités dédiées via l'utilisation d'énergies fossiles. Air Liquide possède et opère plusieurs unités de production en France.
- L'hydrogène industriel est également le **coproduit de la fabrication d'autres composants chimiques** tels que l'éthylène ou des produits de raffinage.



Production annuelle d'hydrogène (en millions de tonnes)\*

## Distribution

L'H<sub>2</sub> peut être produit sur le lieu de consommation ou transporté par camions ou pipelines

- Le transport de l'hydrogène est réalisé entre les sites industriels du nord de l'Europe à travers un **réseau de pipelines** dédié à l'hydrogène et opéré par Air Liquide.
- Le transport d'hydrogène liquéfié ou gazeux par **camions citernes** permet d'alimenter les sites industriels plus isolés.

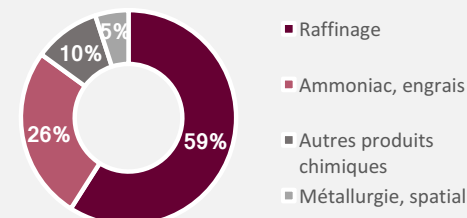


Réseau européen de distribution d'hydrogène exploité par Air Liquide

## Consommation

Près de 100% de cet hydrogène est utilisé comme matière première dans le secteur industriel

- L'hydrogène est principalement utilisé dans le **raffinage**, notamment pour la **désulfuration des carburants**.
- Il est également utilisé pour la **production d'ammoniac** et de dérivés chimiques (polymères).
- Enfin, il est employé comme vecteur d'énergie pour **l'aérospatial**.



Répartition par usages de l'hydrogène consommé en France








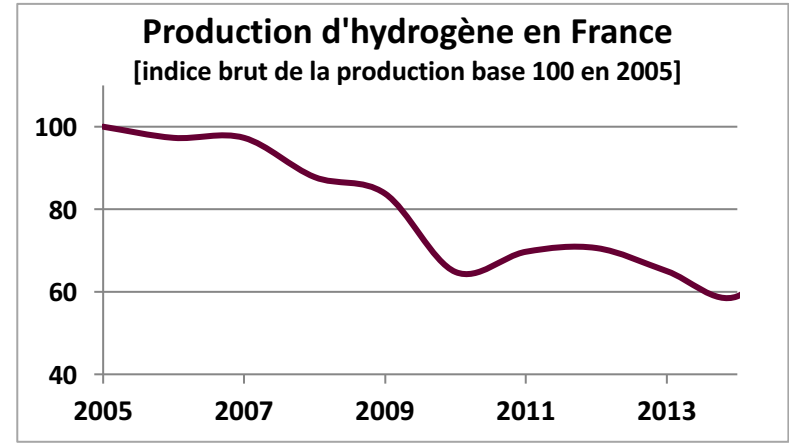
La France, portée par de grands industriels chimiques, est impliquée sur les 3 volets de la filière historique de l'hydrogène, que sont la production, la distribution, et la consommation industrielle. Le développement des nouvelles applications de l'hydrogène-énergie, faisant appel à l'hydrogène en tant que vecteur énergétique, pourra s'appuyer sur l'expertise de ces industriels, à travers des partenariats avec les acteurs émergents.

# 1 La structuration du marché et des acteurs en France

La France, leader mondial du marché des gaz industriels a un rôle à jouer dans le développement de la filière H<sub>2</sub>

## La France figure parmi les leaders mondiaux du marché des gaz industriels dont fait partie la filière hydrogène historique

Pays	Groupe	Description	CA 2017 (croissance)	Effectif 2017
	<b>Linde - Praxair</b>	L'allemand Linde et l'américain Praxair ont annoncé en 2016 leur fusion, créant ainsi le leader mondial du marché des gaz industriels	<b>27,2 Md€</b> (-)	<b>83 000</b>
	<b>Air Liquide</b>	Suite au rachat de l'américain Airgas en 2016, Air Liquide un des leaders mondiaux des gaz pour l'industrie, la santé et l'environnement.	<b>20,35 Md€</b> (+2,9%)	<b>65 000</b>
	<b>Air Products</b>	Deuxième fournisseur de gaz industriel américain, Air Products est présent dans 50 pays.	<b>8,1 Md\$</b> (+9,1%)	<b>15 300</b>
	<b>Taiyo Nippon</b>	Taiyo Nippon est principalement présent au Japon et aux Etats Unis.	<b>5,24 Md\$</b> (-9,0%)	<b>15 800</b>
	<b>Messer Group</b>	Messer group est présent sur le secteur du gaz industriel dans près de 32 pays.	<b>1,23 Md€</b> (+7,8%)	<b>5 650</b>



- Dans un **contexte économique et industriel difficile**, accompagné d'une **forte pression sur les prix**, les acteurs du marché des gaz industriels **cherchent de nouveaux relais de croissance**.
- Les producteurs s'engagent de plus en plus dans le **développement durable et l'innovation** et s'intéressent aux technologies de rupture telles que l'électrolyse de l'eau, la pile à combustible et la mobilité hydrogène.
- **Air Liquide** a ainsi conçu et fourni à ce jour, **plus de 100 stations de recharge d'hydrogène** pour des véhicules légers, des bus ou des chariots élévateurs.

Suite à son approbation en octobre 2018 par l'autorité américaine de la concurrence, la fusion Linde-Praxair va donner naissance au **numéro un mondial du secteur, devant Air Liquide**.

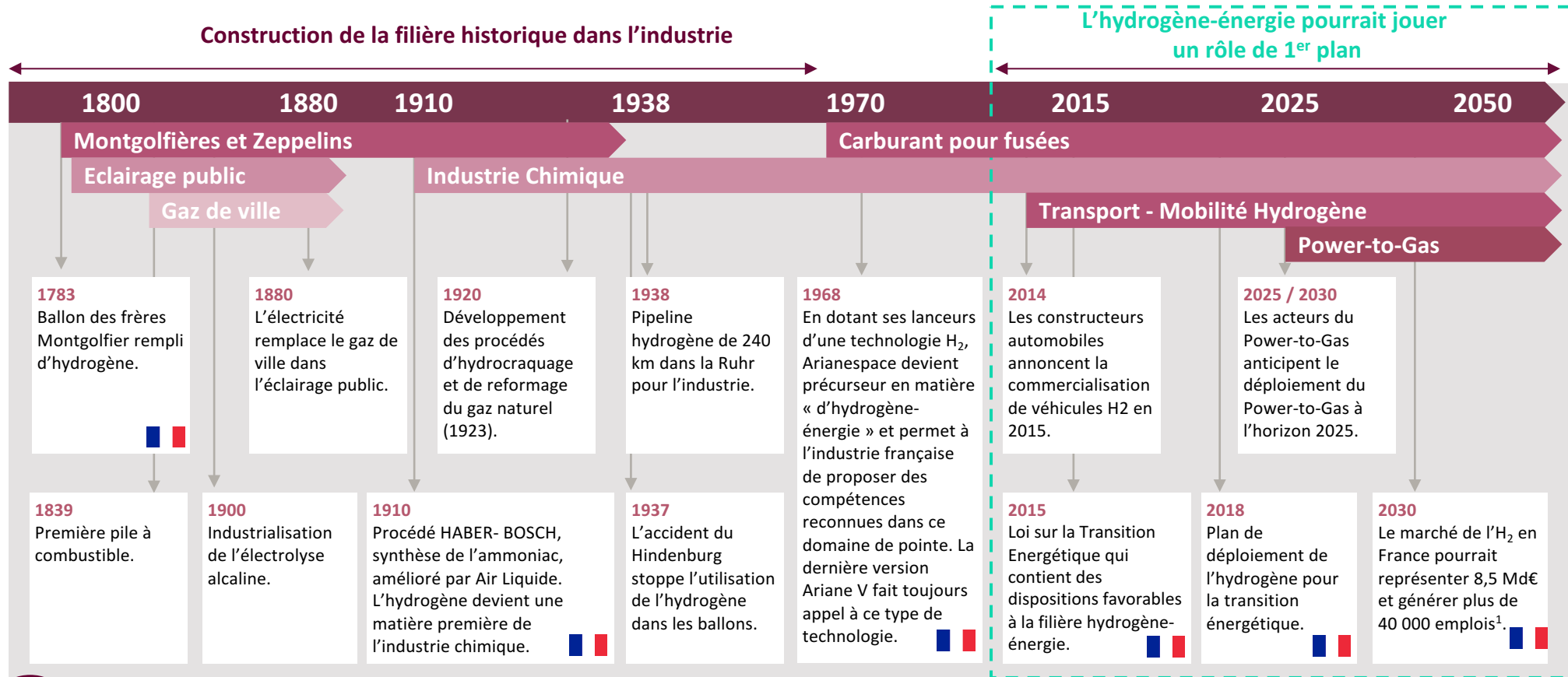


Le marché français des gaz industriels est très concentré et détenu à 97% par 5 acteurs dont près de 70% par Air Liquide. La production traditionnelle d'hydrogène pour l'industrie est ancrée dans une tendance baissière depuis une dizaine d'années et pousse les acteurs à développer de nouveaux relais de croissance à la fois dans la production décarbonée d'hydrogène et dans les nouvelles applications de l'hydrogène-énergie.

# 1 La structuration du marché et des acteurs en France

Faits marquants de la construction de la filière hydrogène : de l'industrie vers les applications « hydrogène-énergie »

L'hydrogène-énergie : depuis les années 2000, l'hydrogène est considéré comme un **vecteur énergétique** d'avenir. De par ses facultés de **stockage** et sa **forte densité énergétique**, la molécule H<sub>2</sub> se présente comme un substitut possible aux hydrocarbures en particulier dans le secteur des transports, et un moyen efficace pour faciliter l'intégration des énergies renouvelables.



La France, historiquement engagée dans le développement de la filière hydrogène industrielle, investit depuis une dizaine d'années dans les nouvelles applications de l'hydrogène-énergie. Le lancement en juin 2018 par le gouvernement du « Plan Hydrogène » témoigne de cet investissement.



# 1 La structuration du marché et des acteurs en France

Un réseau dense de PME innovantes se positionne sur les nouveaux marchés de l'hydrogène-énergie

Un tissu de PME et start-up spécialisées voit le jour depuis une quinzaine d'années pour commercialiser les solutions techniques et services associés à l'hydrogène-énergie<sup>1</sup>



La dynamique ne faiblit pas : en deux ans, plusieurs entreprises à fort potentiel ont vu le jour, portant à une cinquantaine le nombre d'entreprises françaises présentes sur la chaîne de valeur de l'hydrogène\*

Date de création	Avant 2002	2006	2010	2014	2018
Production H <sub>2</sub> par électrolyse	 	 Driving clean energy forward		 	
Applications stationnaires et mobiles	 	 	 	 ANYTIME, ANYWHERE, ENERGY  Fluid-Control & Services	 POWER IN ALL MERIDIANS  Hydrogen to system  Prenez le pouvoir sur votre énergie
Mobilité hydrogène		 The fuel cell company		 	
Power to Gas Réseaux Services		 INNOVATIVE ENGINEERING	 HYDROGEN DE FRANCE		 Libérons les énergies durables



L'intérêt croissant pour l'hydrogène-énergie et ses applications, aussi bien en terme de mobilité que de production et stockage, se traduit par l'arrivée de nombreuses start-up innovantes. Depuis 2002, ce sont plus de 20 entreprises spécialisées qui ont vu le jour, souvent adossées à de grands groupes et/ou laboratoires de recherche.

<sup>1</sup> : Sociétés présentées en fonction de leur domaine principal d'expertise bien que leurs activités puissent être transverses

<sup>2</sup> : CETH<sub>2</sub>, créée en 1997, est devenue Areva H2Gen suite à l'entrée au capital d'Areva et de l'ADEME en 2014

<sup>3</sup> : HELION, créée en 2001 est devenue AREVA Stockage d'Énergie en 2013

<sup>4</sup> : Filiale française de l'entreprise suisse Nova Werke AG

# 1 La structuration du marché et des acteurs en France

Les grands groupes industriels français se positionnent sur les nouveaux marchés de l'hydrogène-énergie

	Groupe	Description	Marchés	Dynamique d'investissements
Industriels historiques	Air Liquide	Deuxième producteur mondial d'hydrogène, Air Liquide se positionne sur les nouveaux usages de l'hydrogène : les stations de distribution (plus de 100 stations livrées dans le monde <sup>1</sup> ) et les PAC.		
	TOTAL	Total s'implique dans la recherche sur l'hydrogène comme carburant automobile et met en place des stations service distribuant de l'hydrogène en Allemagne notamment.		
	EDF	EDF se positionne sur les marchés de l'hydrogène, notamment via un investissement de 16M€ dans le fabricant d'électrolyseurs McPhy et un accord de partenariat pour le développement de l'H <sub>2</sub> décarboné.		2018
Énergéticiens	ENGIE	ENGIE dispose des compétences sur toute la chaîne de valeur hydrogène, de la production d'énergies renouvelables pour générer de l'hydrogène vert, à la mobilité, l'industrie et le stockage d'énergie.		2018
	GRTgaz  TERÉGA	GRTgaz et Teréga s'intéressent de près au Power-to-Gas et ont lancé fin 2015 Jupiter1000, un projet de démonstration d'une puissance prévue de 1MW.		
	GRDF	GRDF s'investit fortement dans le power-to-gas (projet GRHYD), mais également dans les applications résidentielles en développant une pile à hydrogène associée à une chaudière à condensation.		
	orano	La nouvelle structure issue d'Areva conserve les filiales spécialisées dans les technologies de stockage d'hydrogène et d'électrolyse : AREVA H <sub>2</sub> Gen et AREVA Stockage d'Énergie.		
Equip. Auto.	faurecia	Faurecia développe des solutions des réservoirs à hydrogène en collaboration avec Stelia Aerospace et via sa participation dans ad-Venta, et commercialise des pile à combustible en collaboration avec le CEA.		2018
	MICHELIN	Michelin s'investit dans la filière hydrogène transport avec l'entrée au capital de Symbio en mai 2015, spécialiste français de la pile à combustible pour véhicule électrique.		
	PLASTIC OMNIUM	Leader mondial des pièces et modules de carrosserie et des systèmes à carburant, Plastic Omnium se positionne sur les technologies de la mobilité hydrogène par le biais de plusieurs acquisitions.		2018
Autres	ALSTOM	Alstom se positionne sur le marché de la mobilité ferroviaire à hydrogène avec le développement de trains à hydrogène.		2018
	Schneider Electric	Schneider Electric est présent dans les technologies de stockage d'hydrogène, via notamment un partenariat avec Areva et le co-développement avec ENGIE du micro-réseau SPORE en Asie.		
Légende	Stations de ravitaillement H <sub>2</sub>	Production d'H <sub>2</sub> par électrolyse	Power-to-Gas	Mobilité H <sub>2</sub>
	Distribution d'H <sub>2</sub> (camion, pipeline)	Stockage d'H <sub>2</sub>	Applications stationnaires	2018 Invest. récent



Les industriels historiques du secteur, mais aussi les énergéticiens et les équipementiers automobiles, multiplient les initiatives de développement du marché de l'hydrogène, en multipliant les projets innovants dans les transports, le stockage et la production décarbonée d'hydrogène.

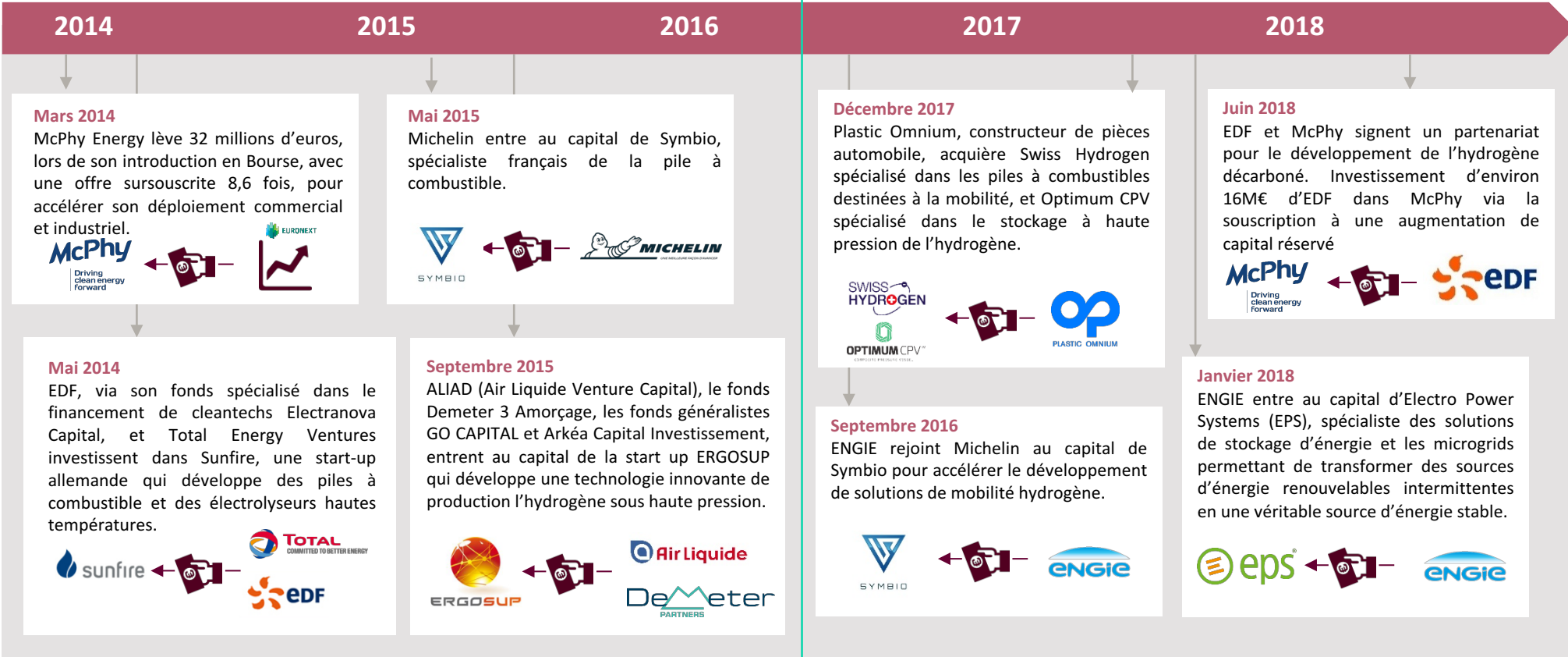
# 1 La structuration du marché et des acteurs en France

La filière hydrogène-énergie suscite un intérêt croissant de la part des industriels historiques et des investisseurs

Les fonds d'investissement, les industriels et énergéticiens français de 1<sup>er</sup> plan s'impliquent financièrement dans les nouvelles applications de l'hydrogène



Depuis 2016, les énergéticiens de premier plan ont noué des partenariats financiers avec les pionniers français des technologies de l'hydrogène-énergie



Le nombre de partenariats et rapprochements financiers entre les industriels historiques français et les acteurs en développement de la filière hydrogène-énergie continue d'augmenter (4 acquisitions de premier plan depuis 2016). Ils témoignent d'un engouement croissant pour cette nouvelle filière et permettront aux nouveaux acteurs d'intensifier leur déploiement commercial et industriel.

# 1 La structuration du marché et des acteurs en France

Les acteurs publics fédèrent et catalysent le développement de la nouvelle filière hydrogène-énergie

## Des partenariats de recherche actifs soutenus par les acteurs publics

### Centres de recherche

- Ils définissent des priorités de R&D et participent au dépôt de brevets.
- Ils apportent leur expertise technique et théorique sur les technologies, et contribuent à l'émergence de start-up sur la base de technologies issues de leurs laboratoires de recherche
- Ils labélisent des projets pour obtenir des financements et de la visibilité.
- Ils mènent des programmes de recherche visant à prévenir les risques liés au développement des nouvelles applications de l'hydrogène.



### Agences nationales

- Elles définissent la stratégie nationale en matière de recherche.
- Elles participent à la mise en œuvre des politiques publiques, au financement des projets et de la recherche.
- Elles apportent une expertise et du conseil aux porteurs de projets.



### Associations et plateformes

- Elles contribuent à créer des synergies et des échanges au sein de la filière hydrogène-énergie.
- Elles réalisent la promotion des technologies H<sub>2</sub>, animent la filière industrielle et la représentent auprès des pouvoirs publics.
- Elles proposent des évolutions réglementaires, réalisent des études et accompagnent les projets.



### Clusters de recherche

- Ils participent au développement des technologies hydrogène-énergie.
- Ils organisent des ateliers autour des technologies et projets H<sub>2</sub> et contribuent au développement de la stratégie nationale de recherche.
- Ils participent à l'émergence de projets dans les territoires et labélisent ces projets pour obtenir des financements et de la visibilité (pôles de compétitivité).



Symbio s'appuie sur des technologies développées avec le CEA



McPhy est partenaire du CEA et du CNRS depuis sa création



Sylfen co-développe avec le CEA le démonstrateur SmartHyes (Smart Energy Storage) et est membre du cluster Tenerrdis

Des clusters de recherche impliquant PME, laboratoires publics, et grands groupes industriels participent activement au développement des technologies et à l'émergence de débouchés commerciaux notamment via l'accompagnement de start-up. Les acteurs publics (associations et plateformes de promotion, agences nationales) fédèrent les acteurs et apportent leur expertise pour un soutien actif de la filière.

# Sommaire

0

Executive summary

1

La structuration du marché et des acteurs en France

2

Les nouveaux usages de l'hydrogène aux perspectives prometteuses

3

Stratégies et défis de la filière hydrogène-énergie

## 2 Les nouveaux usages de l'hydrogène aux perspectives prometteuses

Des secteurs multiples, porteurs à des horizons différents mais tous dans une dynamique de croissance

La production

### La production d'hydrogène est à la veille d'une mutation majeure.

- Historiquement établie et dominée par l'utilisation de **matières fossiles**, la production d'hydrogène pourrait bien **évoluer radicalement dans les prochaines années**. Les **méthodes de production « propres » par électrolyse** permettent d'obtenir un **hydrogène très pur** dont la demande est tirée par les nouvelles applications de l'hydrogène. Elles sont en passe de devenir économiquement viables, en plus de répondre à une **demande de décarbonation de l'économie**.
- En France, Air Liquide fait figure de champion du domaine et s'engage doucement dans la **production décarbonée d'hydrogène**.

Les nouveaux usages de l'hydrogène

### La mobilité est le nouvel usage de l'hydrogène le plus en vue. Son développement pourra porter les autres secteurs en faisant pénétrer les technologies hydrogène sur les différents marchés.

- Les pays leaders de l'automobile sont aussi leaders sur la **mobilité hydrogène** : **Japon, Allemagne, USA**.
- La mobilité H<sub>2</sub> se distingue de la technologie batteries par une **autonomie supérieure** et un **temps de recharge plus court** ; elle répond également aux **besoins des véhicules lourds et de forte puissance**.
- Le défi majeur après la mise au point de véhicules hydrogène est le **déploiement d'un réseau de distribution et de ravitaillement**.
- Les acteurs de la chaîne de valeur (gaziers, distributeurs de carburant, constructeurs et équipementiers automobiles...) forment des **consortiums** visant d'une part à mettre au point les **standards nécessaires** et d'autre part à soutenir l'émergence de ce nouveau marché.

### Les électrolyseurs peuvent répondre aux besoins de flexibilité du réseau électrique lié à l'intégration croissante des énergies intermittentes en renforçant les synergies entre les réseaux d'électricité et de gaz.

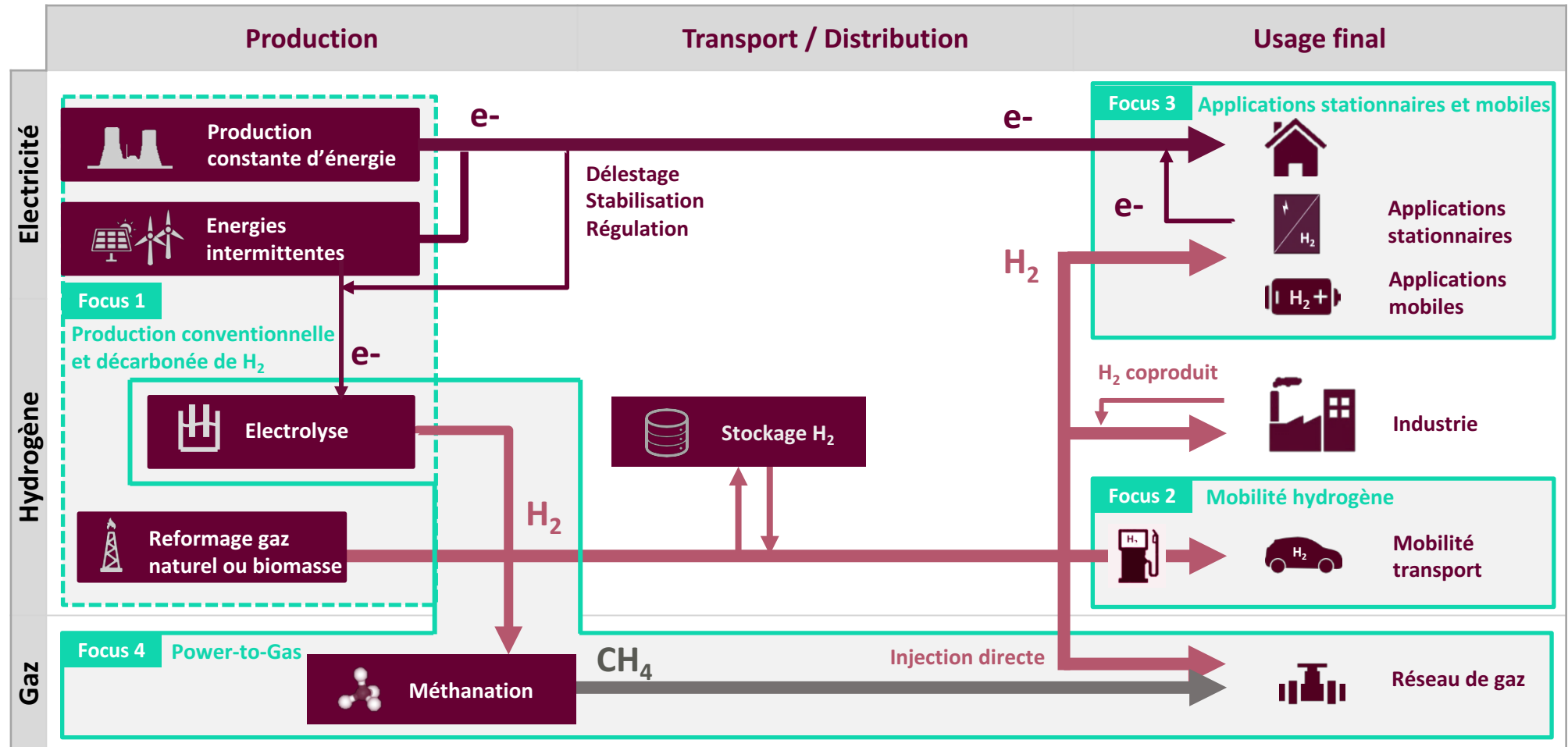
- La **régulation en fréquence** pourrait permettre de **rentabiliser la production de l'hydrogène** par la vente d'un service.
- Les électrolyseurs se présentent dans certains cas comme une **alternative à un coûteux renforcement du réseau électrique**.
- Couplé à la croissance des EnR, **l'injection dans le réseau de gaz** permet de **verdir les réseaux de gaz**.

### Les applications stationnaires et nomades se développent dans une logique de décentralisation de la production d'énergie et d'un besoin d'énergie en tout lieu.

- Les **piles à combustible** sont d'ores et déjà largement utilisées pour **l'alimentation de sites critiques et/ou isolés** comme les centres de données informatiques.
- Les applications nomades se concentrent sur la **recharge d'objets connectés mobiles** et concurrencent les batteries.

## 2 Les nouveaux usages de l'hydrogène aux perspectives prometteuses

Synoptique de la filière hydrogène : un vecteur énergétique à l'interface entre les chaînes de l'électricité et du gaz



L'hydrogène possède son propre cycle : la transformation d'électricité en hydrogène par électrolyse et la production d'électricité par hydrogène via les piles à combustible permettent de multiplier les applications de l'hydrogène comme vecteur énergétique. Les nouvelles applications de l'H<sub>2</sub> se développent principalement dans les secteurs du transport et du stockage d'énergie.

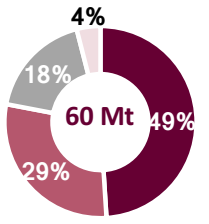




# 2 Les nouveaux usages de l'hydrogène aux perspectives prometteuses

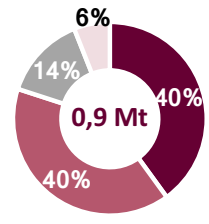
## Une production d'hydrogène décarboné comme alternative aux hydrocarbures

### L'hydrogène est aujourd'hui produit principalement à partir de sources fossiles...



Monde

- Gaz naturel
- Hydrocarbures
- Charbon
- Electrolyse



France

- Gaz naturel
- Hydrocarbures
- Charbon
- Electrolyse

L'hydrogène produit en France et dans le monde est très majoritairement d'origine fossile. En France, les procédés de production de dihydrogène sont responsables de l'émission de **11,5 Mt de CO<sub>2</sub>**, soit environ **3% des émissions totales de CO<sub>2</sub>**.

### Chiffres clés

- 60 Mt** Production annuelle mondiale d'hydrogène
- 8,8 Mt** Production annuelle européenne d'hydrogène
- 0,9 Mt** Production annuelle française d'hydrogène
- 94 %** Part de la production française d'H<sub>2</sub> d'origine fossile
- 6 %** Part de la production française d'H<sub>2</sub> par électrolyse

### ...par vaporeformage de gaz naturel, ...gazéification du charbon,



En présence de vapeur d'eau surchauffée, les atomes carbonés (C) du **méthane (CH<sub>4</sub>)** se **dissocient**. Après deux réactions successives, ils se **reforment séparément** pour obtenir, d'un côté, de l'**hydrogène (H<sub>2</sub>)** et de l'autre, du **dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>)**.

1,5 à 2,5 € / kg d'H<sub>2</sub> produit

10 kg de CO<sub>2</sub> émis / kg d'H<sub>2</sub> produit



Brûlé dans un réacteur à très haute température (entre 1 200 et 1 500 °C), le charbon libère des gaz qui vont alors se séparer et se reformer pour obtenir, d'un côté, de l'**hydrogène (H<sub>2</sub>)** et de l'autre, du **monoxyde de carbone (CO)**.

3 € / kg d'H<sub>2</sub> produit

22 kg de CO<sub>2</sub> émis / kg d'H<sub>2</sub> produit

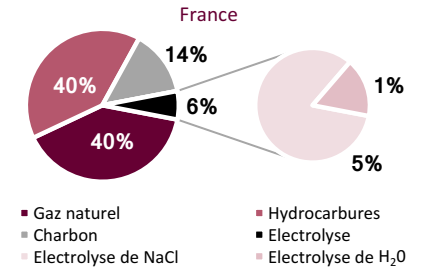
### ...ou par électrolyse



A l'aide d'un courant électrique, l'eau (H<sub>2</sub>O) est décomposée en **dioxygène (O<sub>2</sub>)** et en **hydrogène (H<sub>2</sub>)**. Ce **procédé est propre** (à condition d'avoir recours à une électricité décarbonée) mais est encore peu compétitif face à la production à partir de sources fossiles.

3 à 12 € / kg d'H<sub>2</sub> produit<sup>1</sup>

0 kg de CO<sub>2</sub> émis / kg d'H<sub>2</sub> produit<sup>2</sup>



L'hydrogène produit par électrolyse est souvent un **coproduit** de l'électrolyse du chlorure de sodium (industrie du chlore).

La production par électrolyse de l'eau ne représente aujourd'hui que **1 % de l'hydrogène produit**.



La quasi-totalité de l'hydrogène produit aujourd'hui provient de la décomposition d'hydrocarbures. Mais les contraintes environnementales, associées au développement des nouveaux usages de l'hydrogène-énergie, requièrent un hydrogène plus propre et ouvrent ainsi de vastes perspectives au développement d'une filière de production décarbonée d'hydrogène.

<sup>1</sup> : ce coût dépend des technologies d'électrolyse et du prix du MWh d'électricité

<sup>2</sup> : sous réserve d'avoir recours à une électricité produite à partir d'énergies renouvelables

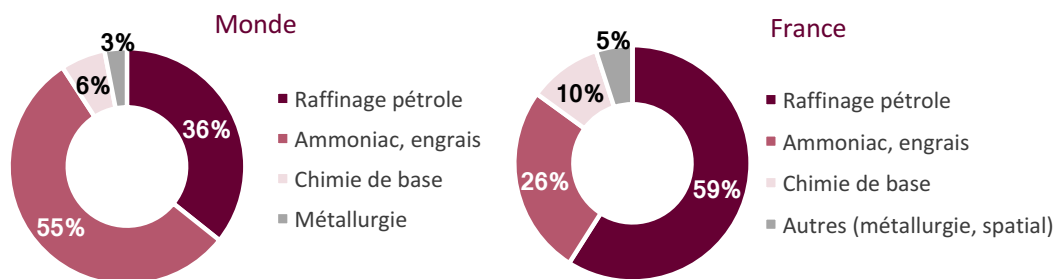




## 2 Les nouveaux usages de l'hydrogène aux perspectives prometteuses

Une demande croissante en hydrogène décarboné, portée à long terme par les nouveaux usages de l'hydrogène

### La demande d'hydrogène, aujourd'hui portée par l'industrie,...



### Chiffres clés

<b>1,3 %</b>	Part actuelle de l'H <sub>2</sub> dans la consommation mondiale d'énergie
<b>18 %</b>	Part possible de l'H <sub>2</sub> dans la consommation mondiale d'énergie en 2050 <sup>1</sup>
<b>&lt; 1 Mt</b>	Production mondiale d'H <sub>2</sub> utilisé aujourd'hui à des fins non industrielles
<b>550 Mt</b>	Production mondiale possible d'H <sub>2</sub> en 2050 <sup>1</sup> pour les nouvelles applications de l'hydrogène-énergie

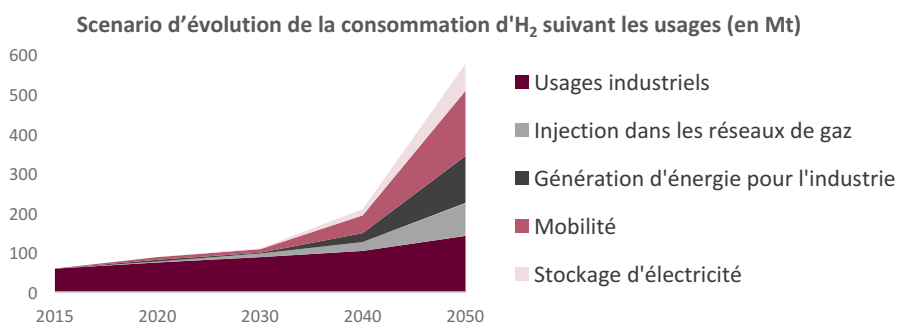
...devrait considérablement augmenter avec le développement des nouveaux usages comme vecteur énergétique...

Portée par les nouvelles applications de l'hydrogène-énergie, la demande mondiale d'hydrogène pourrait doubler d'ici 2030 et atteindre 550Mt en 2050<sup>1</sup>, soit près de 20% de la demande d'énergie finale<sup>1</sup>.

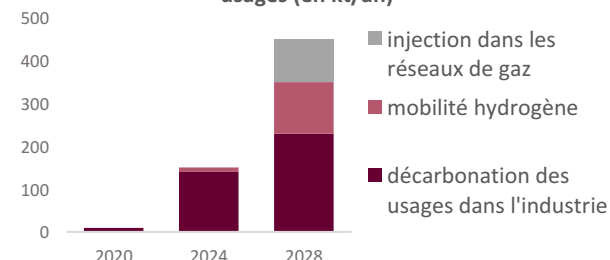
...et se verdir pour répondre aux enjeux environnementaux

Pour satisfaire les objectifs de réduction d'émissions de CO<sub>2</sub>, cet hydrogène devra être plus propre que celui produit actuellement par vaporeformage de gaz naturel, ouvrant de vastes perspectives à la production d'H<sub>2</sub> par électrolyse.

En France, la production d'hydrogène décarboné pourrait atteindre 450 000 tonnes par an<sup>2</sup>, dont près de la moitié pour répondre aux enjeux de décarbonation dans l'industrie.



Volumes de production d'hydrogène vert par usages (en kt/an)



En France et dans le monde, l'hydrogène est majoritairement consommé dans les raffineries et pour la synthèse de l'ammoniac. Portée par le développement des nouveaux usages de l'hydrogène (transports, power-to-gas), sa consommation pourrait atteindre d'ici 2050 plus de 500 Mt. Pour répondre à cette demande tout en respectant les contraintes environnementales, de nouveaux modes de production propre d'hydrogène se développent.



## 2 Les nouveaux usages de l'hydrogène aux perspectives prometteuses

Une production d'hydrogène « bleu » comme première étape vers un hydrogène totalement décarboné ?

### Les différents types d'hydrogène décarboné

95% de l'hydrogène produit aujourd'hui l'est à partir de sources fossiles, ce qui entraîne des émissions de CO<sub>2</sub>. On parle d'**hydrogène « gris »**.

Si l'hydrogène est produit par électrolyse de l'eau effectuée à partir d'électricité issue de **sources renouvelables** (éolien, solaire), on parle alors d'**hydrogène « vert »**.

L'hydrogène produit de manière non carbonée peut également être « **bleu** ». Il est dans ce cas produit :

- soit par les méthodes de production conventionnelles d'H<sub>2</sub> auxquelles on adjoint un **process de stockage ou valorisation du CO<sub>2</sub> émis**,
- soit par électrolyse de l'eau en ayant recours à de l'électricité d'origine nucléaire.

H<sub>2</sub> « gris »



Production d'H<sub>2</sub> à partir de sources fossiles



H<sub>2</sub> « vert »



Production renouvelable d'électricité



Électrolyse de l'eau



H<sub>2</sub> « bleu »



Production d'H<sub>2</sub> à partir de sources fossiles



Captage du CO<sub>2</sub>



Production nucléaire d'électricité



Électrolyse de l'eau



Hydrogène décarboné

### Les objectifs du Plan Hydrogène

Le Plan Hydrogène fixe des **objectifs ambitieux en matière de production décarbonée d'H<sub>2</sub>** :

- **10% d'hydrogène décarboné** dans l'hydrogène industriel d'ici à 2023, **20% à 40% d'ici à 2028**
- Mise en place d'un **système de traçabilité** de l'hydrogène dès 2020
- Mise en évidence de l'impact environnemental de l'hydrogène dans la réglementation relative aux gaz à effet de serre

La **compétitivité de l'hydrogène décarboné** pourrait être atteinte à l'horizon 2035, par rapport aux technologies utilisant le gaz fossile\*.

### Des initiatives prometteuses de production d'hydrogène « bleu »



#### H21 North of England

Construction d'une unité de production d'hydrogène par vaporeformage et séquestration du CO<sub>2</sub> pour injection de l'H<sub>2</sub> produit dans le réseau de gaz naturel.

**Objectif de décarbonation de 14%** du réseau de gaz naturel anglais dès 2034.

Coût estimé de **£22bn**.



#### CRYOCAP™

Innovation technologique de captage de CO<sub>2</sub> utilisant un procédé cryogénique.

**Permet de capter une partie du CO<sub>2</sub> émis lors de la production d'hydrogène.** Le CO<sub>2</sub> est ensuite valorisé.

Investissement d'Air Liquide de **30m€**.



#### MONOLITH

Technologie de **transformation du gaz naturel en carbone et en hydrogène** par pyrolyse du méthane par un procédé plasma.

Bien qu'envisagé dans ce cas que comme un coproduit, cette technologie de création d'H<sub>2</sub> propre est prometteuse



Bien que parfois opposé à l'hydrogène vert, l'hydrogène bleu pourrait permettre le développement des technologies d'électrolyse de l'eau, ainsi que l'atteinte rapide des objectifs de production décarbonée, en attendant une meilleure compétitivité des énergies renouvelables permettant alors une transition vers l'hydrogène vert.



## 2 Les nouveaux usages de l'hydrogène aux perspectives prometteuses

Une production verte d'hydrogène par électrolyse de l'eau comme alternative aux hydrocarbures

### Chiffres clés

<b>0,9 Mt</b>	Production annuelle française d'hydrogène
<b>180 t</b>	Production annuelle française d'hydrogène par électrolyse de l'eau
<b>1,5 à 2,5 €</b>	Coût de production du kg d'H <sub>2</sub> par vaporeformage de gaz naturel
<b>3 à 12 €</b>	Coût de production du kg d'H <sub>2</sub> par électrolyse de l'eau
<b>1 Md€</b>	Taille estimée du marché de la production verte décentralisée d'hydrogène d'ici 2020

### Production par électrolyse centralisée ou décentralisée ?

- ▶ La production décentralisée par électrolyse pour un usage local permet de **se dispenser d'un réseau de distribution** qui nécessite des **investissements lourds**. Elle s'insère également dans une **logique de valorisation des énergies renouvelables et de l'hydrogène à l'échelle du territoire**.
- ▶ La production centralisée dans des électrolyseurs de taille importante pourrait permettre de **réaliser des économies d'échelle** et donc de **lancer la filière grâce à un coût de production plus faible**.

### Concept, Atouts & Obstacles

<b>Concept</b>	La <b>production verte</b> d'hydrogène consiste à produire l'hydrogène à l'aide de <b>matières premières renouvelables</b> et selon des <b>procédés à faible émission de CO<sub>2</sub></b> . Il peut s'agir de production à partir de <b>vaporeformage de biogaz</b> , mais le procédé le plus propre reste l'électrolyse de l'eau à partir d' <b>électricité renouvelable</b> .
<b>Atouts</b>	L'hydrogène produit de façon centralisée par reformage du gaz naturel est généralement <b>liquéfié</b> ou fortement <b>comprimé</b> pour pouvoir être transporté. Cette étape a un coût énergétique important, et renchérit l'hydrogène. Les électrolyseurs de petite ou moyenne taille peuvent être installés localement et valoriser les excédents d'énergie renouvelable.
<b>Obstacles</b>	Le coût de production du H <sub>2</sub> par électrolyse de l'eau est fortement <b>dépendant du prix de l'électricité</b> utilisée, mais reste en moyenne <b>4 fois supérieur au coût de production par vaporeformage</b> de gaz naturel. Cependant, selon le CEA, ce coût de production pourrait diminuer à <b>3€/kg, voire 2€/kg</b> dans des unités de production de très grande échelle (500t/jour) et avec un tarif d'électricité correspondant à un usage industriel massif aux alentours de 50€/MWh*.

### Les acteurs de la production verte d'hydrogène

<b>Energéticiens</b> 	Les énergéticiens initient les nouveaux projets démonstrateurs et produisent selon des procédés faiblement émetteurs en CO <sub>2</sub> l'électricité qui vient alimenter les électrolyseurs.	
<b>Fabricants d'électrolyseurs</b> 	Les industriels développant les électrolyseurs sont responsables de la diminution des coûts de production du H <sub>2</sub> , principal frein à leur compétitivité.	
<b>Producteurs de gaz industriels</b> 	Ils proposent des solutions de valorisation, de transport et de stockage de l'hydrogène produit par électrolyse (souvent décentralisé).	



En l'absence de taxes CO<sub>2</sub> fortes, la production d'hydrogène vert par électrolyse n'est pas encore économiquement compétitive. Mais la production verte décentralisée pourrait répondre aux enjeux des nouvelles applications de l'hydrogène-énergie, en évitant des investissements massifs dans des réseaux de transport de l'hydrogène.



# 2 Les nouveaux usages de l'hydrogène aux perspectives prometteuses : le transport

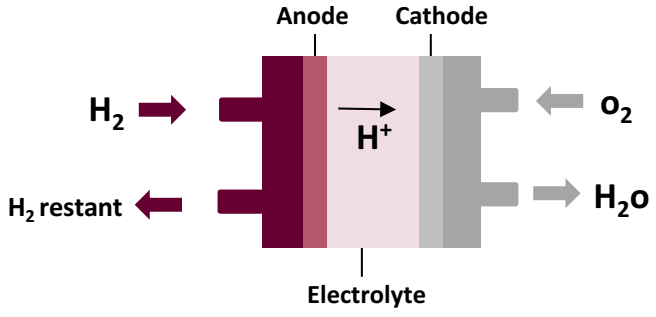
La mobilité hydrogène, un domaine à fort potentiel pour demain

## La mobilité hydrogène, basée sur la pile à combustible...



Les véhicules embarquent un réservoir stockant de l'hydrogène comprimé qui est transformé en électricité via une **pile à combustible** pour alimenter le moteur électrique, généralement en association avec une batterie.

### Fonctionnement d'une pile à combustible :



La pile à combustible transforme l'hydrogène et l'oxygène en eau, générant ainsi un courant électrique selon la formule chimique :  $2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O$

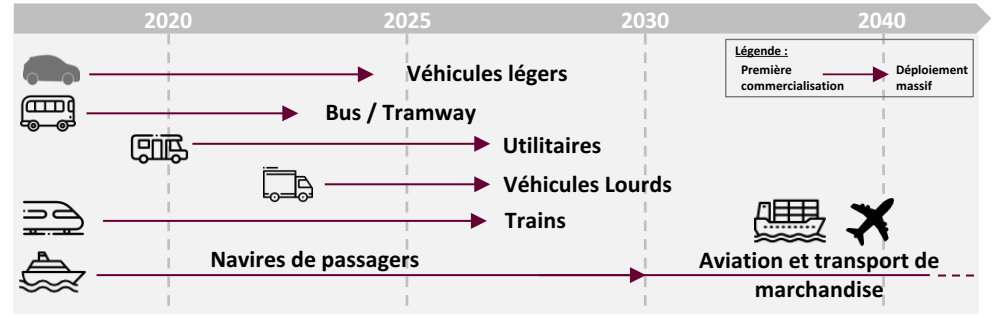
La pile à combustible génère de l'électricité à partir d'hydrogène et d'oxygène, **réaction qui ne rejette que de l'eau.**

Un véhicule **alimenté par un hydrogène vert** (produit de manière décarbonée) a donc un **bilan carbone bien inférieur à un véhicule à combustion.**

## ...permet de décarboner tous les types de transports...

La technologie pile à combustible alimentée en hydrogène vert peut donc être mise à profit pour **verdir le secteur des transports**, responsable de plus de 20% des émissions de CO<sub>2</sub>.

La pénétration de l'hydrogène dans les transports est fortement dépendante des investissements réalisés pour l'infrastructure de distribution et l'amélioration des rendements de la PAC (limités aujourd'hui à 50%), mais **tous les types de mobilité sont concernés**, à des horizons plus ou moins proches :



Disponibilité de la technologie hydrogène par type de transport\*



Selon une étude prospective des usages de l'hydrogène à 2050, proposée par l'Hydrogen Council, le déploiement dans le monde de **400 millions de voitures**, **5 millions de camions** et **plus de 15 millions de bus**, ainsi que le remplacement de 20% des trains diesel par des trains à hydrogène permettraient de **remplacer 20 millions de barils de pétrole par jour**, et de **diminuer de 3,2 Gt les émissions de CO<sub>2</sub> par an.**



Le secteur du transport est très dépendant des énergies fossiles et représente à lui seul plus de 20% des émissions mondiales de CO<sub>2</sub>. Adapté à tout type de transport, l'hydrogène se présente comme un substitut idéal au pétrole et un moyen efficace d'accélérer la décarbonation du secteur.



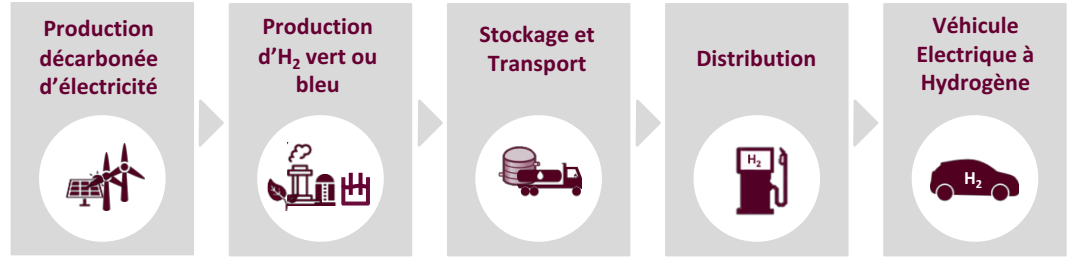
# 2 Les nouveaux usages de l'hydrogène aux perspectives prometteuses : le transport

Le routier, premier secteur des transports concerné par la mobilité hydrogène

### Chiffres clés

- 7000+** FCEV\* aujourd'hui dans le monde
- 500 000** FCEV\* en 2020 dans le monde
- 190+** Stations H<sub>2</sub> aujourd'hui dans le monde
- 20 Mds€+** Marché des FCEV\* pour un taux de pénétration de 1%
- 1 à 2 M€** Coût d'une station de ravitaillement de grande taille
- 200 à 300 k€** Coût d'une station de petite taille

### La chaîne de valeur de la mobilité hydrogène décarbonée



### Concept, Atouts & Obstacles

- Concept** : La mobilité hydrogène adopte l'**hydrogène comme carburant pour des véhicules à moteur électrique, alimentés par une pile à combustible**, ne rejetant que de l'eau à l'usage. La propulsion hydrogène n'émet donc aucun GES, sous réserve d'une **production décarbonée d'hydrogène**.
- Atouts** : Les FCEV ont une **autonomie élevée** (de l'ordre de 650 à 800km), et leur **'recharge' est très rapide** : 5 minutes contre plusieurs heures de charge pour un BEV\*\*. Souvent mis en compétition avec les voitures à batteries (BEV), les FCEVs sont en fait **complémentaires des BEV** et **mieux adaptés pour les transports lourds**.
- Obstacles** : Un nouveau type de station service doit être mis en place afin de permettre l'arrivée des FCEV. Après des débuts hésitants, ce déploiement pourrait être réalisé, avec quelques pays en pointe sur le sujet (Japon, Etats-Unis, Allemagne). **La France propose un plan de déploiement ambitieux et compte déjà 23 stations de ravitaillement**.

### Les acteurs de la mobilité hydrogène

 <b>Distributeurs</b>	<p><b>Les distributeurs d'essence et fabricants de stations hydrogène</b> sont responsables, au même titre que les gaziers, de <b>développer les infrastructures de distribution</b> d'hydrogène, le principal défi pour la mobilité H<sub>2</sub> aujourd'hui.</p>	
 <b>Constructeurs automobiles</b>	<p><b>Les constructeurs automobiles</b> sont les <b>moteurs des consortiums pour la mobilité hydrogène</b>, et se mobilisent pour la mise en place des infrastructures pour alimenter les véhicules H<sub>2</sub>.</p>	
 <b>Equipementiers spécialisés</b>	<p>Des équipementiers spécialisés et <b>producteurs de piles à combustibles (PAC)</b> apportent des solutions technologiques pour la mise en place de cette mobilité.</p>	



La deuxième génération de véhicules électriques à hydrogène est d'ores et déjà en commercialisation. Elle devrait permettre de consolider ce marché encore largement dépendant de l'action gouvernementale ainsi que de quelques industriels clés. L'obstacle principal est l'établissement des infrastructures qui doit s'accompagner de la mise en place d'une réglementation adaptée.





## 2 Les nouveaux usages de l'hydrogène aux perspectives prometteuses : le transport

Le FCEV<sup>1</sup>, complément nécessaire au BEV<sup>2</sup> sur les usages 'longue distance' et 'transport lourd' ?

### Les avantages des FCEV...

	BEV : Battery Electric Vehicle	FCEV : Fuel Cell Electric Vehicle
Autonomie	250km	800km
Ravitaillement	de 1h à 10h	4-5 minutes
Poids de la batterie / PAC	300kg	150kg
Rendement du puits à la roue	~70%	~30%
Utilisation de métaux rares	Lithium, Nickel et Cobalt dont le prix pourrait augmenter fortement	Platine



Le prix à l'achat d'un FCEV est aujourd'hui bien supérieur à celui d'un BEV, mais l'augmentation des prix des métaux rares pourrait **entraver la baisse des coûts de production des BEV** et profiter aux FCEV.

Source Investir n°2319, de 16 juin 2018

### ...Permettent un usage complémentaire aux BEV sur des segments de marché spécifiques



Le moteur électrique à batterie est adapté à un **usage urbain pour des véhicules de petites tailles**, mais ne répond pas aux besoins de puissance et d'autonomie nécessaires aux véhicules lourds.



Malgré des **rendements énergétiques du puits à la roue encore inférieurs aux batteries**, la technologie pile à combustible alimentée en hydrogène est plus adaptée aux applications nécessitant une **plus grande autonomie**, et des **charges plus importantes** comme des bus ou des camions.



L'**hybridation** des véhicules électriques est possible. La faible autonomie des BEV est alors complétée par un **prolongateur d'autonomie à hydrogène**. L'entreprise française **Symbio** développe ce type de prolongateur qui équipe déjà plusieurs dizaines de véhicules Renault Kangoo.

### Mais des défis de tailles sont à relever

- L'essor de la mobilité hydrogène nécessite le **déploiement d'un réseau de stations de recharge**, ce qui implique de **forts investissements**.
- Les **rendements énergétiques du puits à la roue** des technologies à hydrogène sont encore faibles comparé aux technologies à batterie.
- Le **prix de vente du kg d'H<sub>2</sub> à la pompe (supérieur à 10€/kg)**, fortement lié aux coûts de production, est encore très élevé.



Les coûts élevés des stations de recharge à hydrogène ainsi que les meilleurs rendements énergétiques des batteries ont orienté le développement de la mobilité verte vers les véhicules à batteries. Cependant les caractéristiques techniques avantageuses de la pile à combustible (autonomie, temps de ravitaillement), répondent à certaines lacunes des technologies batterie et permettent d'envisager un déploiement de la mobilité H<sub>2</sub> pour les transport lourds et les flottes d'entreprise.



## 2 Les nouveaux usages de l'hydrogène aux perspectives prometteuses : le transport

Les constructeurs automobiles s'engagent dans le développement et la commercialisation des FCEV

Commercialisation — Démonstration — Intérêt







Constructeur	Pays	Véhicule	Description
<b>TOYOTA</b>		● Commercialisation du FCEV série « Mirai » en 2015	Fort du succès de son FCEV <b>déjà présent aux USA et dans 9 pays européens</b> , Toyota espère pouvoir commercialiser son Mirai dans de nouveaux pays dont l'Australie, ou la Chine
<b>HYUNDAI</b>		● Commercialisation du Nexo en septembre 2018	En 2018, Hyundai lance <b>sa seconde génération de véhicule</b> à pile à combustible inaugurée par le Nexo qui remplace le ix35 Tucson commercialisé en 2015
<b>HONDA</b>		● Commercialisation du Clarity Fuel Cell en mars 2016	Honda avait déjà sorti un <b>premier FCEV série en 2007</b> , le FCX Clarity. Le Clarity Fuel Cell, sorti en mars 2016, se présente comme un concurrent sérieux au Mirai de Toyota.
<b>RENAULT</b>		◐ Kangoo électrique à prolongateur d'autonomie H2 testé en 2015	Symbio donne à Renault la possibilité de rester dans la course à l'hydrogène sans lourd programme de recherche sur les PAC.
<b>Audi</b>		◐ Concept Audi h-tron quattro présenté en 2016	Après le prototype Audi A7 h-tron de 2014 et le concept Audi h-tron quattro de 2016 Audi prend l'initiative sur la technologie pile à combustible, <b>et souhaite en commercialiser dès 2020</b>
<b>Volkswagen</b>		◐ Prototype Golf HyMotion présenté fin 2014	VW dit être avancé technologiquement et achète des brevets, mais <b>attend les infrastructures pour songer à la commercialisation.</b>
<b>LEXUS</b>		◐ Prototype LF-FC présenté fin 2015, commercialisation prévue en 2020	Lexus a présenté le concept car LF-FC en novembre 2015 à l'occasion du salon de Tokyo. Ce <b>véhicule électrique dopé à l'hydrogène devrait être commercialisé à l'horizon 2020.</b>
<b>BMW GROUP</b>		◐ Présentation de 2 prototypes mi-2015, commercialisation en 2020	Partenaire de Toyota et membre du consortium allemand CEP, BMW a présenté en juillet 2015 2 concept cars à hydrogène, <b>la Série 5 GT et l'i8, pour une commercialisation en 2021.</b>
Mercedes-Benz		◐ Commercialisation du GLC F-Cell envisagée pour 2018	Présenté lors de l'édition 2017 du salon de Francfort, le GLC F-Cell est la première voiture à hydrogène de Mercedes. Sa commercialisation interviendra fin 2018
<b>GM</b>		◐ Plateforme à hydrogène de 2 <sup>nd</sup> e génération	<b>GM, 1<sup>er</sup> possesseur de brevets liés à la mobilité hydrogène</b> a mis en place une plateforme à hydrogène de 2 <sup>nd</sup> e génération qui pourra servir de véhicule de transport.
<b>PSA</b>		◐ Commercialisation envisagée pour 2020	Suite au rachat d'Opel, PSA a développé un intérêt pour la technologie à hydrogène et pourrait dévoiler un premier <b>prototype dès 2019</b>
<b>KIA</b>		◐ Commercialisation envisagée pour 2020	Le constructeur sud-coréen souhaite lancer un véhicule à pile à combustible à l'horizon 2020 et tablerait sur une production de 1000 unités par an.

Source : Analyse Sia Partners (Toyota, Honda, Daimler, Renault, Opel, Audi, Ford, Nissan, VW, Autocar, Yoocorp, FuelCellsWorks, NHK World, Economic Times India)



## 2 Les nouveaux usages de l'hydrogène aux perspectives prometteuses : le transport

La mobilité hydrogène ambitionne de se développer sur tous les types de transport

	 <b>Transport Ferroviaire</b>	 <b>Transport Maritime</b>	 <b>Transport Aérien</b>
<b>Maturité</b>	 Premier modèle mis en circulation à l'été 2018	 Plusieurs initiatives lancées	 Plusieurs initiatives lancées
<b>Enjeux</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Actuellement, différents types d'alimentation des trains cohabitent, principalement des locomotives diesel, ou électriques nécessitant des infrastructures électrifiées.</li> <li>Le train à hydrogène apparaît comme une <b>alternative, respectueuse de l'environnement</b>, aux trains diesel. Son utilisation permet de <b>s'affranchir des coûts d'électrification des lignes</b> existantes.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Le transport maritime est une <b>source de pollution importante</b>. Des contraintes environnementales fortes ont été instaurées ces dernières années pour limiter les émissions de soufre notamment.</li> <li>De plus en plus de navires fonctionnent au gaz naturel. L'hydrogène est une autre alternative verte aux carburants d'origine fossile.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Le secteur de l'aviation représente <b>3% des émissions polluantes</b>, et sa croissance est très forte (le trafic aérien devrait tripler d'ici 2050).</li> <li>Le <b>besoin en carburants décarbonés dans le secteur de l'aviation</b> est donc de plus en plus important et pourrait profiter aux technologies hydrogène.</li> </ul>
<b>Initiatives et acteurs</b>	<p><b>ALSTOM</b></p> <p>En circulation depuis septembre 2018, le premier train à hydrogène conçu par Alstom dessert une ligne de 100 km en Allemagne. Un plein d'hydrogène assure 1000 km d'autonomie pour une vitesse maximale de 140 km/h.</p> <p><b>SNCF</b></p> <p>La SNCF a pour projet de mettre en circulation un premier train TER à hydrogène d'ici 2022, et envisage de sortir complètement du diesel ferroviaire d'ici 2035.</p>	<p><b>ENGIE</b> <b>ENERGY OBSERVER</b></p> <p>ENGIE est partenaire du projet « Energy Observer » ayant pour but d'évaluer la capacité de la navigation autonome à l'hydrogène.</p> <p><b>NAVAL GROUP</b></p> <p>Naval Group a participé au démonstrateur FILHyPyne, navire de pêche à propulsion hydrogène, et développe des systèmes de pile à combustible embarqués pour améliorer l'autonomie en plongée des sous-marins.</p>	<p><b>AIRBUS</b> <b>SIEMENS</b></p> <p>Airbus et Siemens ont présenté en 2016 « HY4 », un avion électrique alimenté en hydrogène.</p> <p><b>Air Liquide</b></p> <p>Air Liquide mène un projet de stockage haute pression d'hydrogène et gazeux à destination du transport aérien.</p> <p><b>HES</b> Energy Systems</p> <p>HES Energy System a dévoilé en octobre 2018 son projet d'avion électrique à hydrogène pour 2025.</p>

Les technologies hydrogène répondent aux besoins de décarbonation dans tous les types de transports. Les perspectives de déploiement pour le transport maritime et aérien sont plus éloignées que pour le routier et le ferroviaire mais les projets de démonstration se multiplient.

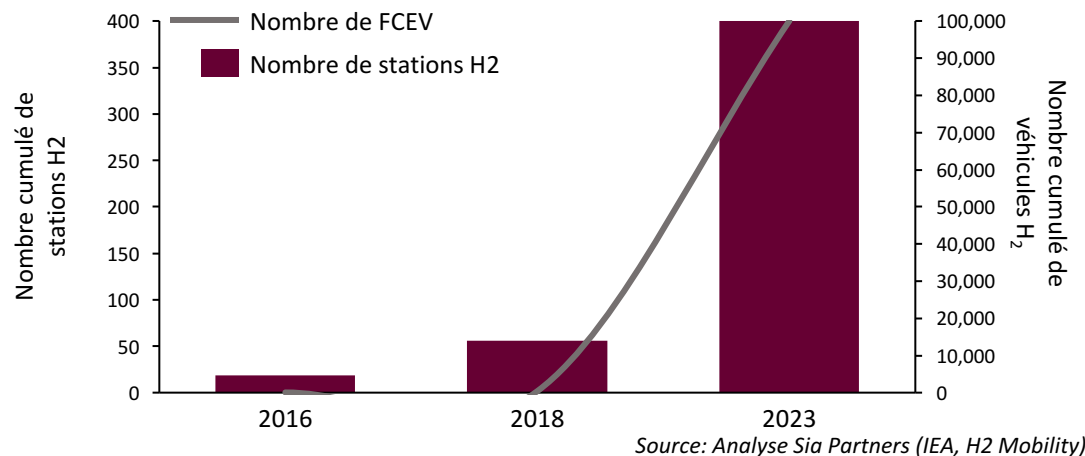




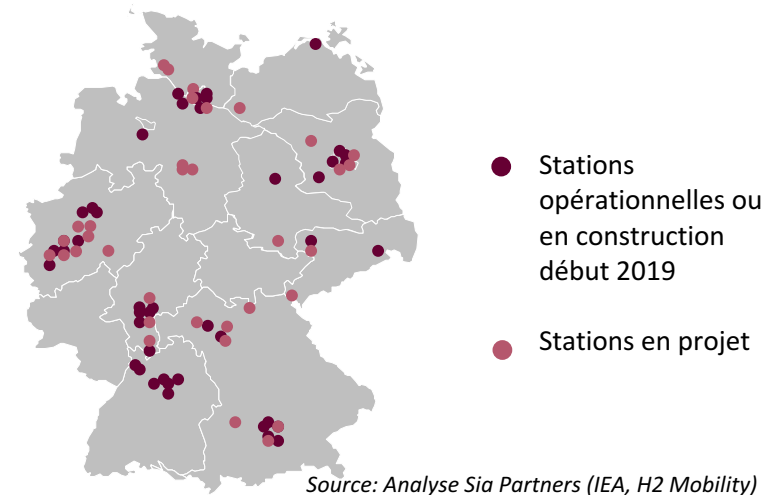
## 2 Les nouveaux usages de l'hydrogène aux perspectives prometteuses : le transport

### L'Allemagne, leader du déploiement de la mobilité hydrogène en Europe

#### Le plan de mobilité allemand



#### Cartographie des stations de ravitaillement



#### Bilan et Stratégie de déploiement

Bilan

Lancé dès 2006, et soutenu par des politiques locales, le plan mobilité hydrogène de l'Allemagne accélère avec l'installation de 24 stations en 2017 faisant du pays le 2<sup>nd</sup> marché mondial pour ce type d'infrastructure. Chapeauté par la **NOW GmbH** (Organisation Nationale pour l'Hydrogène et les PAC), le déploiement de la mobilité hydrogène bénéficie également d'une forte **impulsion industrielle emmenée par Daimler et Linde**, acteurs du **consortium H<sub>2</sub> Mobility Deutschland**.

Stratégie

La couverture du territoire se fait **par cluster dans les Länder**, avec de fait une couverture inégale. Les Länder les plus actifs sont ceux particulièrement **concernés par les EnR ou avec une compétence automobile marquée**. L'enjeu de la mobilité hydrogène est double en Allemagne puisqu'elle vient **soutenir le développement de l'hydrogène comme intégrateur d'EnR**. En effet, l'Allemagne se positionne en **leader mondial du Power-to-Gas**.

#### Chiffres clés

<b>400</b>	FCEV début 2019
<b>100 000</b>	FCEV en 2023
<b>19</b>	Stations H <sub>2</sub> début 2019
<b>400</b>	Stations H <sub>2</sub> en 2023
<b>247m€</b>	Investis par l'état entre 2017 et 2023

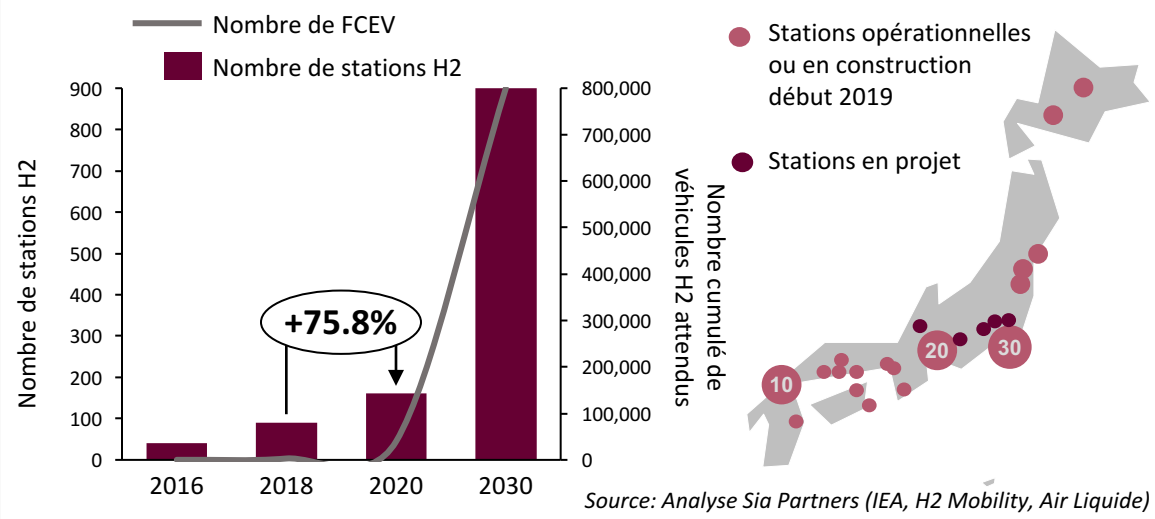
L'Allemagne capitalise sur ses compétences automobiles et chimiques pour faire de la mobilité hydrogène un enjeu stratégique. Cet enjeu est double car l'intégration des énergies renouvelables est au centre de ce projet, et le développement de la mobilité hydrogène va de pair avec celui du Power-to-Gas.



# 2 Les nouveaux usages de l'hydrogène aux perspectives prometteuses : le transport

## Le Japon, porte-étendard de la mobilité hydrogène

### Le plan de mobilité japonais



### Le Japon, une société hydrogène



- En avance sur l'Europe sur le sujet, et pour répondre à ses besoins énergétiques après sa sortie du nucléaire en 2018, le Japon souhaite devenir une société hydrogène
- Profitant de la forte couverture médiatiques des Jeux Olympiques de 2020, le Japon entend bien démocratiser la technologie hydrogène. Les 6,000 logements du village et une centaine de bus utilisés pour les compétitions fonctionneront grâce à des piles à combustible.

### Bilan et stratégie de déploiement

**Bilan** Bien que leader mondial de la mobilité hydrogène avec une **centaine de stations en service** et plus de **2,700 véhicules en circulation** sur l'archipel, le Japon reste loin de ses 900 stations et 800,000 véhicules annoncés pour 2030. Afin d'atteindre ces objectifs, le **consortium Japan H<sub>2</sub> Mobility** a été créé, réunissant constructeurs automobiles (Toyota, Nissan, Honda), fournisseurs d'infrastructures et investisseurs.

**Stratégie** Par son aspect insulaire, le Japon n'a pas à tenir compte du développement d'un réseau de stations transfrontalier comme en Europe. Dans un premier temps, l'hydrogène sera produit par gazéification du charbon à faible coût à l'importation. **L'intégration des EnR des importantes installations solaires nippones n'est pas prévue pour l'instant** et pourra devenir un second objectif à terme.

### Chiffres clés

<b>2 700</b>	FCEV début 2019
<b>800 000</b>	FCEV attendus en 2030
<b>91</b>	Stations H <sub>2</sub> début 2019
<b>900</b>	Stations H <sub>2</sub> en 2030



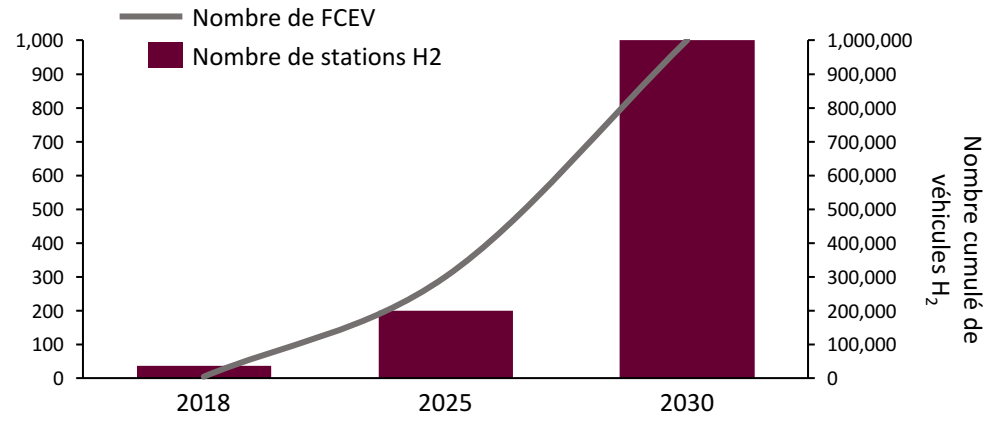
Depuis 2016, le Japon a accéléré le développement de la mobilité hydrogène et a doublé en l'espace de 2 ans le nombre de stations de recharge sur son territoire. Pleinement engagé, le pays apparaît comme un précurseur et souhaite démontrer son savoir faire et son leadership dans le domaine à l'occasion des jeux olympiques de 2020.



# 2 Les nouveaux usages de l'hydrogène aux perspectives prometteuses : le transport

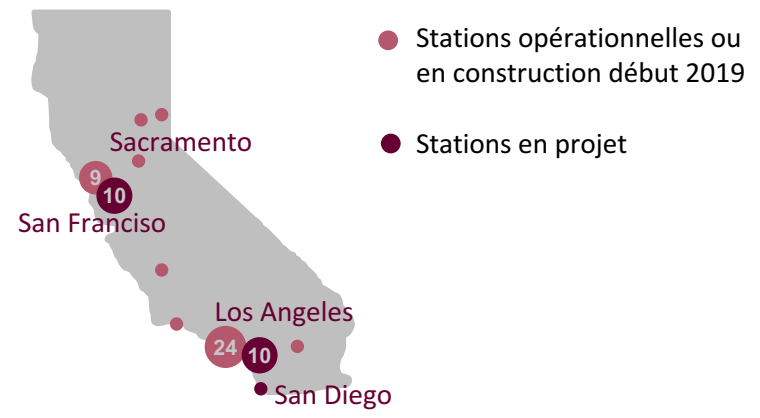
L'Etat de Californie, moteur du déploiement de la mobilité hydrogène aux Etats-Unis

Le plan de mobilité californien



Source: Analyse Sia Partners (IEA, Air Resource Board, CAFCP)

Cartographie des stations de ravitaillement



Source: Analyse Sia Partners (NREL, DOE, CAFCP)

## Bilan et Stratégie de déploiement

Bilan

Début 2019, **une près de quarante stations sont opérationnelles** et plus de **4 400 véhicules en circulation** sur le territoire. Au travers du « **California Fuel Cell Partnership** », consortium rassemblant constructeurs automobiles et industriels, la Californie a mis en place un plan hydrogène des plus ambitieux dont l'objectif est d'atteindre **un million de véhicules en circulation d'ici 2030**.

Stratégie

La Californie s'organise en **clusters autour des villes principales**. C'est de façon générale une région privilégiée par les constructeurs pour l'introduction de véhicule à carburants alternatifs. Elle accueille les premiers FCEVs japonais. L'objectif fixé par le régulateur est que **87% des voitures vendues en 2050** en Californie soient des **véhicules « zéro-émission »**.

## Chiffres clés

- 4 400** FCEV début 2019
- 1 000 000** FCEV en 2030<sup>1</sup>
- 37** Stations H<sub>2</sub> début 2019
- 1 000** Stations H<sub>2</sub> en 2030<sup>1</sup>
- 5 000\$** De réduction à l'achat d'un véhicule H<sub>2</sub>



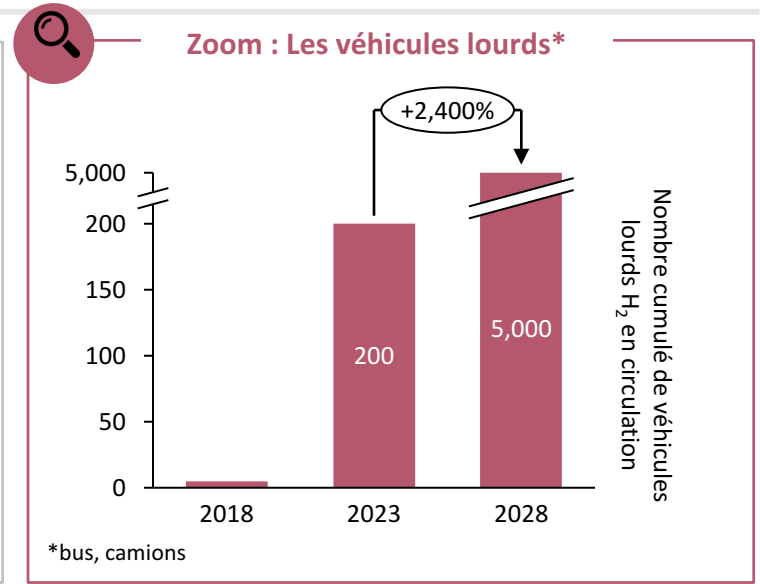
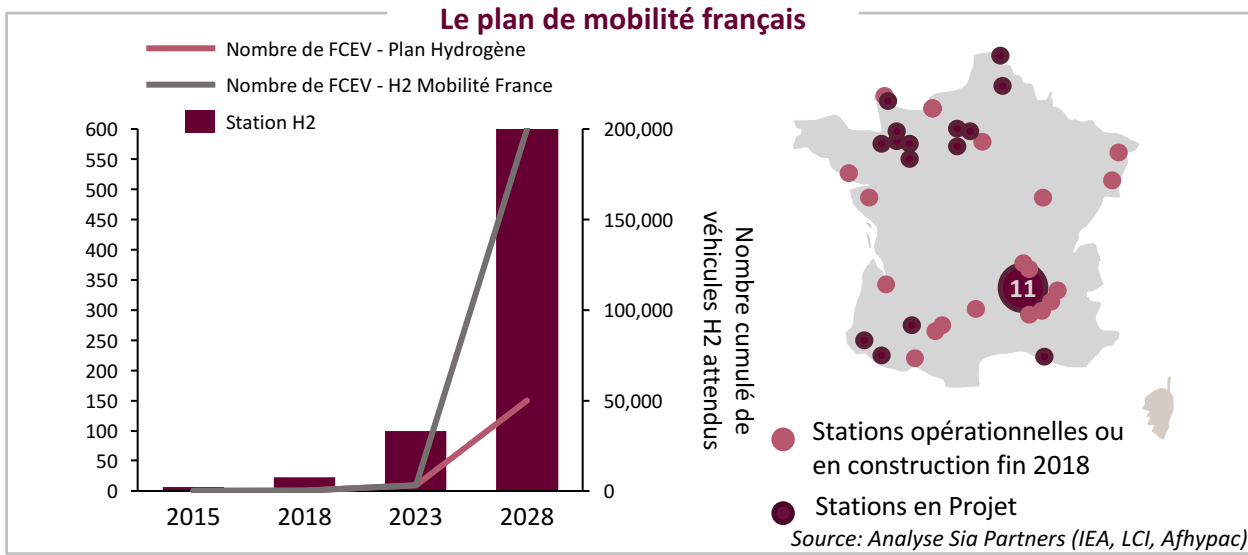
Organisée en cluster autours de ses métropoles, la Californie, au travers du consortium « CAFCP » a dévoilé le plan de mobilité hydrogène le plus ambitieux au monde, soutenu financièrement par le gouvernement californien.

<sup>1</sup> : Projections basées sur les objectifs fixés par l'Executive Order B-48-18 : 5 millions de véhicules zéro-émission en 2030 et 200 station H<sub>2</sub> en 2025.



# 2 Les nouveaux usages de l'hydrogène aux perspectives prometteuses : le transport

Le plan de mobilité français s'appuie sur des initiatives régionales



## Bilan et Stratégie de déploiement

Bilan

Début 2019, **plus de 250 FCEV** sont en circulation et **une vingtaine de stations**, publiques ou privées, ont été déployées. Avec plus de 30 stations aujourd'hui en projet, l'ambition de 100 stations fonctionnelles en 2023 fixée par le Plan Hydrogène se rapproche.

Stratégie

Le déploiement de la mobilité hydrogène est **initié à l'échelle des territoires par les régions et collectivités**. La stratégie est de s'appuyer sur des **flottes captives** (utilitaires, taxi, logistique urbaine...) et développer des **clusters** avant une **couverture progressive du territoire**. Pour lancer le marché des véhicules, le **prolongateur d'autonomie** à hydrogène pour les voitures électriques précèdera les voitures à pile à combustible. Sur dix ans, l'AFHYAC estime les besoins en investissement à 114 M€ d'investissements publics cumulés, et **586 M€ d'investissement total** pour les véhicules et les stations.

## Chiffres clés

- 250** FCEV début 2019
- 20k à 50k** FCEV en 2028
- 23** Stations H<sub>2</sub> début 2019
- 400 à 1000** Stations H<sub>2</sub> en 2028



C'est par le biais de flottes captives à usage professionnel et d'une dynamique territoriale que la France entend développer la mobilité hydrogène. Cette stratégie est soutenue par les financements et appels à projets annoncés à l'été 2018 par le Plan Hydrogène, et reprise dans la Programmation Pluriannuelle de l'Energie en novembre 2018.



## 2 Les nouveaux usages de l'H<sub>2</sub> aux perspectives prometteuses : les applications stationnaires

Applications stationnaires : les piles à combustible comme levier de décentralisation énergétique

### Chiffres clés

**20 000 €** Prix de vente en 2018 d'une PAC\* résidentielle

**7 000 €** Montant de subvention pour l'achat d'une PAC résidentielle en Allemagne

**200 000** PAC résidentielles installées au Japon

**5,2 millions** PAC résidentielles installées au Japon en 2030 (objectif gouvernemental)

### Des domaines d'applications variés



**Sécurité énergétique de sites critiques ou isolés**



**Résidentiel**



**Génération de puissance moyenne**

### Concept, Atouts & Obstacles

Concept

Les piles à combustibles permettent la **génération décentralisée d'électricité**. Plusieurs segments de marchés sont possibles : **l'alimentation de sites critiques et/ou isolés** comme les data centers ou les relais téléphoniques ( 1-5 kW), **le résidentiel** (1-5 kW) ou encore **la génération à puissance moyenne** (ex: centrale de 60 MW en Corée du Sud).

Atouts

Les PAC sont une **alternative propre, flexible et silencieuse** aux générateurs diesel utilisés comme générateurs de secours sur des sites isolés. La **stabilité du courant fourni** est également un critère de choix pour l'alimentation des data centers. En résidentiel, la **cogénération** permet de porter le rendement total des PAC à plus de 90%.

Obstacles

Alors que l'utilisation de PAC stationnaires se répand au Japon, aux USA et plus récemment en Allemagne, le **taux de pénétration de cette solution en France est encore très faible**. Des efforts restent à fournir pour augmenter **l'acceptabilité des PAC**, notamment dans le résidentiel, et pour baisser leur coût, encore trop élevé.

### Les différentes technologies de PAC

**Proton Exchange Membrane (PEM)**

Les PAC à membrane échangeuse de protons présentent une grande flexibilité de fonctionnement et demandent très peu de maintenance. Le rendement moyen est de 40% à 55%. Le coût des PAC PEM est compris entre 1 500 et 3 800 USD/kW.



**Molten Carbon Fuel Cell (MCFC)**

Les piles à carbonates fondus sont des PAC haute température à reformage interne. Elles peuvent être alimentées au gaz naturel et présentent un excellent rendement (60%, 85% en cogénération). Elles sont adaptées à la production décentralisée de puissance moyenne. Leur coût est compris entre 4 000 et 6 000 USD/kW.



FuelCell Energy  
Ultra-Clean, Efficient, Reliable Power

**Solid Oxide Fuel Cell (SOFC)**

Les piles à oxyde solide sont des PAC haute température qui sont similaires aux MCFC mais présentent une technologie plus mature, un oxyde solide facilitant l'industrialisation et une plus grande durabilité. Leur rendement est supérieur à 50% et leur coût varie entre 3 000 et 4 000 USD/kW.



Le marché des piles à combustible pour des applications stationnaires est déjà établi dans le monde, mais dispose d'une grande marge de progression, notamment pour les usages résidentiels. Si la pénétration en France est faible pour l'instant, elle augmente déjà en Allemagne et au Japon, pays affichant des objectifs ambitieux.



## 2 Les nouveaux usages de l'H<sub>2</sub> aux perspectives prometteuses : les applications stationnaires

### L'hydrogène au service de l'autonomie des objets portables

#### Chiffres clés

**1 semaine**

Autonomie d'un smartphone équipé d'une microPAC

**6,5 Md\$**

Marché mondial des batteries portables en 2018

**13,4 Md\$**

Marché mondial des batteries portables attendu en 2023

#### Des domaines d'applications variés



Objets connectés



Générateurs mobiles



Transport léger

#### Concept, Atouts & Obstacles

Concept

Les micro piles à combustibles permettent l'alimentation des smartphones, tablettes, ordinateurs portables, et autres objets transportables. Ces générateurs fonctionnent à une **température proche de la température ambiante**, du fait de leur proximité avec l'utilisateur. Elles fournissent des puissances de l'ordre de **100mW à 1kW**. Ces systèmes sont généralement alimentés par des **recharges sous forme de capsules de combustible**.

Atouts

Les micro piles à combustible peuvent potentiellement multiplier par 3 à 5 les performances actuelles des batteries. Elles offrent également la **suppression du temps de charge** pour certaines utilisations grâce au remplacement quasi-instantané d'une capsule de combustible.

Obstacles

En raison des contraintes de température de fonctionnement basses, les micro piles ont des **rendements faibles** (30% environ). Les contraintes techniques de compacité et de poids ne permettent pas une compétitivité économique face aux batteries. En outre, la **recharge en hydrogène des capsules est problématique**, pour les particuliers notamment.

#### Les domaines d'application

Objets connectés



Les objets connectés sont de plus en plus énergivores alors que la demande d'autonomie croît également. Les chargeurs ou alimentations à l'hydrogène via des micropiles à combustible (0,1-1W) permettent d'embarquer plus d'énergie à moindre poids. Même Apple a déposé son brevet.



Générateurs mobiles



Les générateurs mobiles sont utilisés pour des interventions de secours, ou encore pour alimenter des appareils sur des lieux isolés du réseau. Ils sont également adaptés aux utilisations militaires.



Transport léger



PRAGMA Industries s'est associée à Cycleurope pour mettre au point l'Alter Bike, un vélo électrique alimenté par des cartouches d'hydrogène en plus d'une batterie Li-ion.



Les PAC mobiles gagnent en performance et s'imposent progressivement dans le secteur du transport léger. Pour l'alimentation et la recharge d'objets connectés, malgré les avantages en terme d'autonomie, les micro-PAC ne parviennent pas encore à s'imposer sur un marché grand public ultra-dominé par les batteries Li-ion.

# Sommaire



Executive summary



La structuration du marché et des acteurs en France



Les nouveaux usages de l'hydrogène aux perspectives prometteuses



Stratégies et défis de la filière hydrogène-énergie



### Les stratégies nationales et régionales au sein des territoires contribuent à l'éclosion de ces nouveaux marchés

- En France, **les territoires se mobilisent aux côtés des industriels** et contribuent au développement de la R&D, des **projets de démonstration** et au leadership industriel national. Depuis 2016, de nombreux projets ont vu le jour, notamment suite à **l'appel à projets « Territoires hydrogènes »**. Ils visent à démontrer, à l'échelle d'un territoire, la faisabilité technico-économique et l'intérêt environnemental de projets hydrogène intégrés sur toute la chaîne de valeur et pour des usages multiples et locaux.
- La France doit conforter sa légitimité aux côtés de pays tels que **les Etats-Unis, l'Allemagne et le Japon** qui se positionnent comme des **leaders du développement de l'hydrogène-énergie**. Leur leadership est marqué en particulier sur les marchés précurseurs que sont la mobilité H<sub>2</sub> et les piles à combustibles résidentielles.
- La **stratégie de la France**, engagée par le « **Plan Hydrogène** » présenté en juin 2018 doit permettre d'accélérer le rythme de déploiement initié par les collectivités tout en augmentant l'échelle des projets.

### Les stratégies européennes de déploiement favoriseront l'émergence de la filière dans les pays membres

- La mobilisation des acteurs internationaux, industriels mais aussi des **autorités régulatrices transnationales**, doit permettre la **création de standards technologiques** et **l'harmonisation des normes** et des codes nécessaires au déploiement d'un **usage transfrontalier de l'hydrogène**.
- La promotion des **projets de coopération internationale** permet de maximiser l'efficacité des financements et de soutenir les progrès technologiques.
- A l'échelle européenne, le FCH-JU, **partenariat public-privé financé à hauteur de 1,33Mds€** soutient les activités de recherche, de développement technologique et de démonstration sur les technologies des piles à combustible et de l'hydrogène-énergie en Europe.

### Des défis technologiques, réglementaires et sociétaux communs aux nouvelles applications de l'hydrogène

- Des **travaux de recherche transversaux**, notamment sur les matériaux utilisés dans les PAC et électrolyseurs, pourront jouer un rôle déterminant dans **l'amélioration du rapport coût/performance** des systèmes actuels.
- Les **réglementations sécuritaires et administratives** associées à l'usage de l'hydrogène ont été établies pour les industriels, et ne sont **pas adaptées aux nouveaux usages décentralisés** (transport, micro-piles à combustible). L'utilisation par le grand public nécessite l'adaptation de cette réglementation tant pour le stationnaire que pour la mobilité.
- **L'acceptation sociale de l'hydrogène** est conditionnée par la **confiance du public en sa sûreté**. L'amélioration de la perception par les usagers est nécessaire à la percée de l'hydrogène sur les marchés.



### 3 Stratégies et défis de la filière hydrogène-énergie

Les territoires poursuivent le développement de la filière via des appels à projets

#### L'appel à projets « Territoires Hydrogènes »..

Dans le cadre de « la Nouvelle France Industrielle » visant à construire l'industrie du futur, l'Etat a lancé en mai 2016 un appel à projets destiné à **faire émerger des projets de démonstrateurs** mettant en œuvre l'hydrogène dans ses différents usages.

Objectifs de l'appel à projets (AAP) : **catalyser le déploiement de la filière hydrogène en France :**



**développer un modèle économique de l'hydrogène à l'échelle d'un territoire sur l'ensemble de la chaîne de valeur :** production, stockage, distribution, valorisation d'hydrogène dans les applications finales



**démontrer l'intérêt environnemental de l'hydrogène associé aux réseaux énergétiques et à des usages énergétiques locaux :** mobilité, alimentation autonome, lissage des énergies intermittentes, usage industriel, power-to-gas...

#### ..Témoin de l'émergence d'un écosystème territorial global de l'hydrogène



**57** projets déposés, répartis sur 98 territoires français



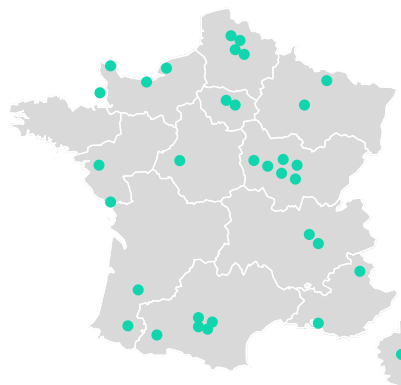
**29** projets labellisés



Les 29 projets sélectionnés bénéficient d'un **accompagnement des financeurs publics** (ministères en charge du développement durable et de l'industrie, CGI, ADEME, BPI France, Caisse des Dépôts et Consignations) pour **mobiliser les dispositifs de financement existants** (européens, nationaux, locaux) sur **une durée de 4 ans**.

Cartographie des projets lauréats de l'AAP « Territoires Hydrogènes »

EasHyMob, Le Havre  
Production H2 pyrolyse ETIA, Caen  
ErgoSup, Cherbourg  
Île de Chausey  
Vendée hydrogène et SEP-PAC, Vendée et Pays de la Loire  
STORH, Nantes  
VELHyRE, Centre-Val de Loire  
Atlantech H-H, La Rochelle  
Wood-Hy / Hy-Boy, Armagnac  
Bus H<sub>2</sub>, Pau  
SEM Hyport, Tarbes  
Pippaa Hyport, Hydrone, Modélisation H2, SPV Hyport, Toulouse



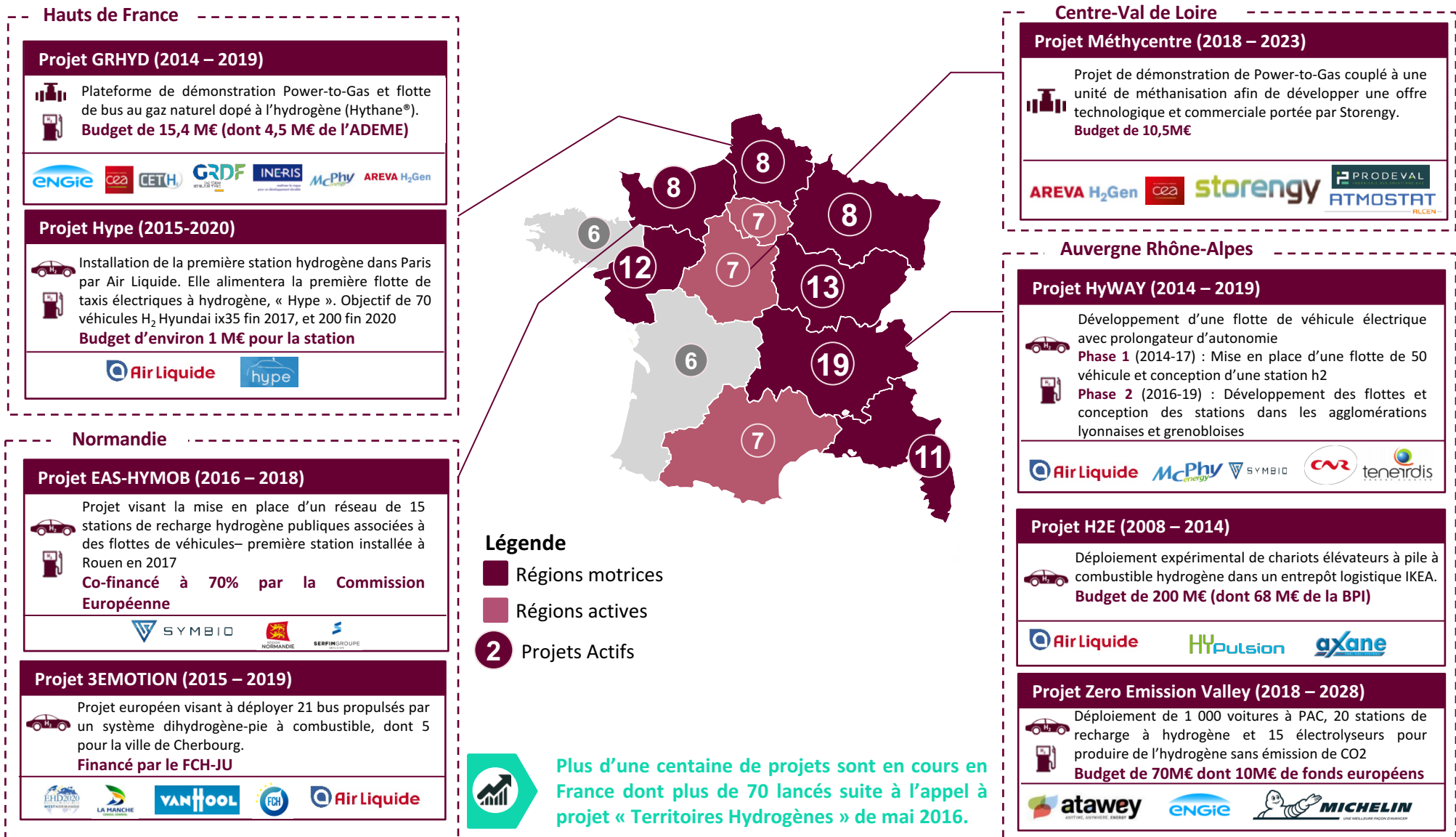
Projets EffiH2, Hauts-de-France  
HYPE, Paris  
SPHYNX, Ile-de-France  
MHyRABEL, Metz  
VitrHydrogène, Vitry-le-François  
Six projets en Bourgogne-Franche-Comté  
Cashemir et Hyway II, Auvergne-Rhône-Alpes  
Be-e, Provence Alpes Côte d'Azur  
VALHYDATE, Marseille Fos sur Mer  
HYPACORSICA, Corse  
Et aussi : Cleargen, Martinique



Avec une centaine de projets présentés au total, la réussite de l'AAP « Territoires Hydrogènes » illustre la forte mobilisation des territoires et des industriels en faveur de la filière hydrogène, et le dynamisme de la France sur ce sujet. Il trace la voie pour le développement d'un modèle économiquement viable et écologiquement vertueux.

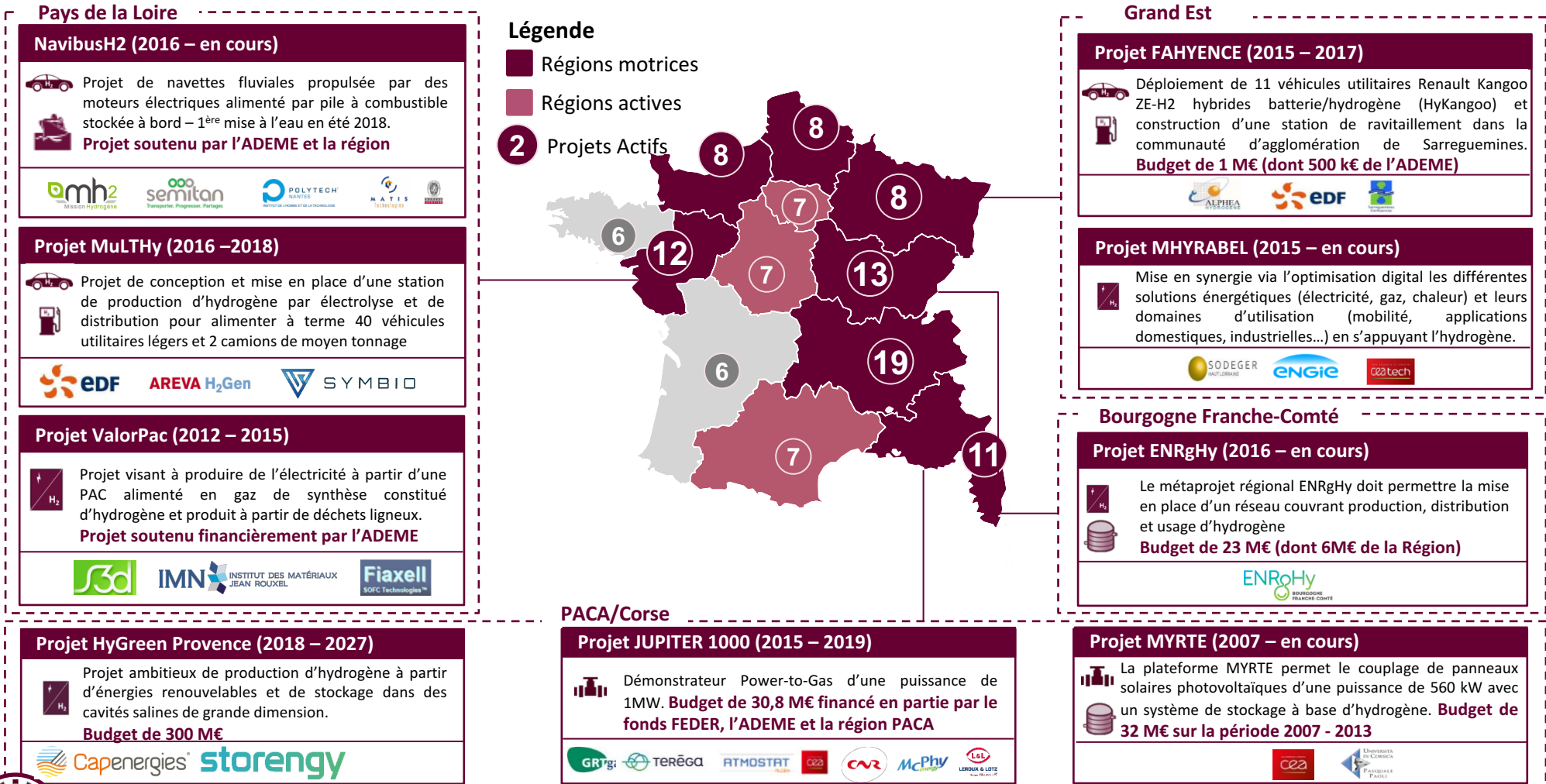
# 3 Stratégies et défis de la filière hydrogène-énergie

Les territoires se mobilisent de plus en plus sur des projets innovants pour continuer à développer cette filière (1/2)



# 3 Stratégies et défis de la filière hydrogène-énergie

Les territoires se mobilisent de plus en plus sur des projets innovants pour continuer à développer cette filière (2/2)



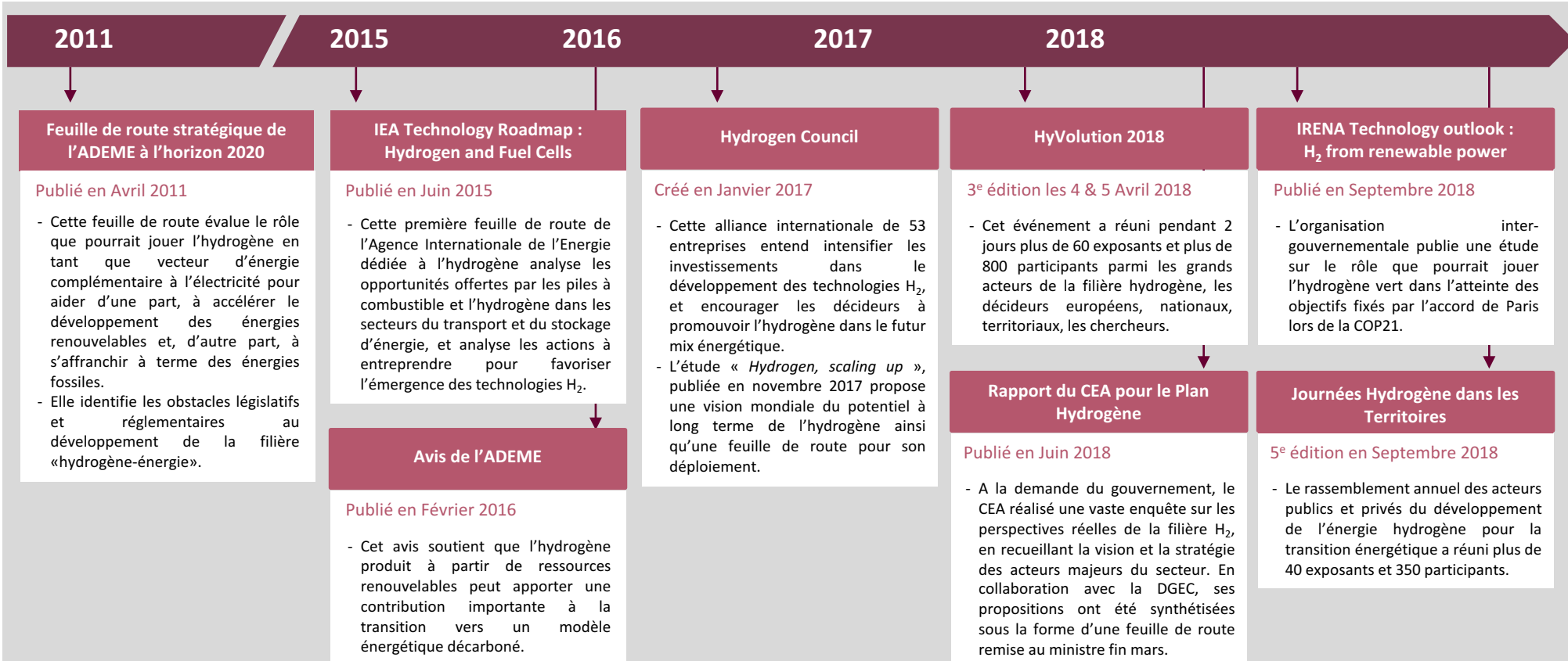
Les territoires contribuent au développement de démonstrateurs à travers des pôles de compétitivités, des associations régionales et des plateformes de recherche. Le nombre de projets ne cesse d'augmenter grâce aux différents appels à projets lancés par le gouvernement, et laisse espérer un déploiement national des nouveaux usages de l'hydrogène-énergie

### 3 Stratégies et défis de la filière hydrogène-énergie



Une dynamique sociétale et de recherche affirmée par de nombreuses publications

Les **événements nationaux**, regroupant les acteurs de la filière, ainsi que les **publications de recherche** se sont multipliées ces deux dernières années, et reflètent **l'intérêt sociétal grandissant pour les technologies hydrogène**.



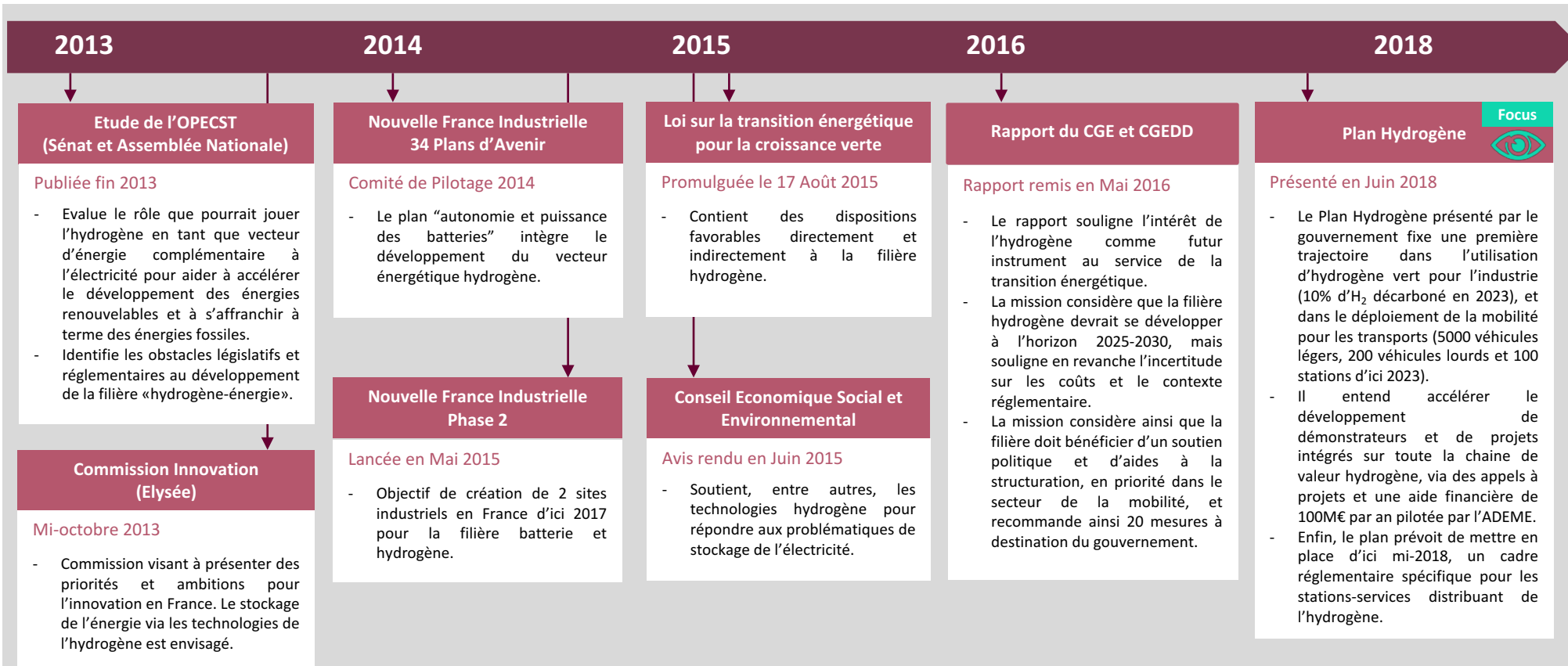
La multiplication des publications d'organismes nationaux et internationaux sur les perspectives d'évolution de la filière hydrogène confirment l'engouement de la part des chercheurs pour ces technologies et appellent de futurs soutiens politiques et réglementaires pour appuyer le déploiement de la filière hydrogène-énergie.

### 3 Stratégies et défis de la filière hydrogène-énergie



Une dynamique territoriale et industrielle établie, mais une stratégie gouvernementale à confirmer

La sphère politique s'est emparée ces dernières années de l'intérêt pour la filière hydrogène et a engagé une série de réflexions autour d'une **accélération de son développement, aboutissant à la présentation en Juin 2018 du « Plan Hydrogène ».**



L'avenir de la filière hydrogène dépendra beaucoup de l'engagement des pouvoirs publics, et de la stratégie mise en œuvre pour soutenir son développement. Après une série de rapports ministériels sur le sujet, le gouvernement a finalement initié une stratégie nationale hydrogène en dévoilant le Plan Hydrogène. Les objectifs définis dans le plan apparaissent néanmoins timides, en comparaison des moyens mis en œuvre par l'Allemagne ou le Japon.



## 3 Stratégies et défis de la filière hydrogène-énergie

### Le « Plan Hydrogène », premier maillon de la stratégie nationale pour le développement de la filière hydrogène ?

Les applications de l'hydrogène-énergie constituent des leviers intéressants pour **atteindre les objectifs fixés dans la LTECV de 2015** :

- atteindre en 2030 d'un taux de 30% d'énergies renouvelables dans la consommation finale d'énergie et de 40% d'énergies renouvelables dans la production d'électricité,
- réduire la consommation des énergies fossiles de 30% en 2030 et décarboner 10% du gaz.

A cet effet, le ministre de la Transition écologique et solidaire a présenté en juin 2018 le « **Plan Hydrogène** », qui a pour objectif d'**accompagner l'innovation et les premiers déploiements industriels de l'hydrogène décarboné**, pour en faire à moyen terme un des piliers de la transition énergétique. Ce plan stratégique s'articule autour de trois axes :



#### 1. L'industrie



#### 2. La mobilité



#### 3. L'énergie

Objectif	Produire de l'hydrogène par électrolyse pour l'industrie	Valoriser l'hydrogène par des usages de la mobilité	Stabiliser les réseaux énergétiques sur le moyen-long terme via le Power-to-Gas
<b>Stratégie d'amorçage</b>	Consolider la filière naissante de production par électrolyse en adressant le marché de l'hydrogène industriel dont les besoins en volume importants permettront un développement en grande série d'électrolyseurs et une réduction des coûts.	Adresser en priorité les transports lourds dont les besoins en autonomie et puissance ne sont pas satisfaits par les batteries. Assurer ainsi des volumes de consommation d'H <sub>2</sub> importants et déployer rapidement des stations de taille importante.	Développer des projets pilotes dans les zones non interconnectées (ZNI) où le taux d'intégration des ENR intermittentes est élevé et les moyens de flexibilité faibles.
<b>Principales mesures</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Objectif de production d'hydrogène décarboné pour l'industrie de 10% en 2023 puis 20 à 40% en 2028.</li> <li>▪ Mise en place en 2020 d'un système de traçabilité sur l'origine de l'hydrogène.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Mise en place d'ici mi-2018 d'un cadre spécifique pour les stations services distribuant de l'hydrogène.</li> <li>▪ Accompagnement par l'ADEME des porteurs de projets et les maîtres d'ouvrage pour leur faire bénéficier de financements (à hauteur maximum de 35% des CAPEX).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Identification par RTE et ENEDIS de la valorisation des services rendus au réseau par les électrolyseurs.</li> <li>▪ Identification par les transporteurs et distributeurs de gaz des conditions d'injection d'hydrogène acceptables pour les réseaux, les installations et les usages.</li> </ul>
	<p>100 M€/an en 2019 débloqués par l'Etat, pour des projets sélectionnées sur la base d'un appel à projets</p> <p>Le premier appel à projets « <b>H<sub>2</sub> mobilité 2018</b> » a été lancé par l'ADEME le 19 octobre 2018 ; les candidatures sont attendues jusqu'au 11 janvier 2019.</p>		

Les mesures et objectifs du « Plan Hydrogène », reprises dans la Programmation Pluriannuelle de l'Énergie pour la période 2019-2028, promettent d'initier une stratégie nationale de développement de l'hydrogène-énergie. Mais les moyens financiers mis en œuvre semblent cependant insuffisants au regard des investissements nécessaires.



# 3 Stratégies et défis de la filière hydrogène-énergie

Une réglementation et des programmes européens d'harmonisation pour développer la filière

## Les standards techniques internationaux se mettent en place progressivement...

- ➔ Le Conseil européen a adopté en septembre 2015 une directive sur la mise en place dans l'UE d'un **nombre minimum d'infrastructures** pour les **carburants de substitution**.
- ➔ Chaque Etat membre dispose d'un **délai de deux ans** pour élaborer une **stratégie en faveur du déploiement d'infrastructures** pour les carburants de substitution.
- ➔ Des groupes de travail regroupant des acteurs nationaux se mettent en place à l'échelle européenne pour définir des **normes communes** et ainsi assurer **l'interopérabilité des technologies déployées au niveau national**.



## ...à travers de nombreux programmes européens de Recherche et Développement

### FCH JU : Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking (2014 – 2020)

Partenariat public privé soutenant la recherche, le développement technologique et les opérations de démonstration des technologies de piles à combustible et d'énergie hydrogène en Europe.

**Budget de 1,33 Mds€**



### 3EMOTION : Hydrogen Infrastructure for Transport

Projet de démonstration visant à déployer dans 5 villes européennes une trentaine de bus à hydrogène ainsi que l'infrastructure de ravitaillement associée.

**Co-financé à hauteur de 42M€ par le FCH-JU**



### H2ME 1 & 2 : Hydrogen Mobility Europe 1 & 2

Mené par une coalition des quatre initiatives de mobilité H<sub>2</sub> allemand, français, britannique et scandinave et de partenaires industriels européens, le projet entend déployer d'ici 2020 1400 FCEV et RE-EV (véhicules électriques à prolongateur d'autonomie H<sub>2</sub> et près de 50 stations de ravitaillement dans 10 pays).

**Co-financé à hauteur de 180€ par le FCH-JU**



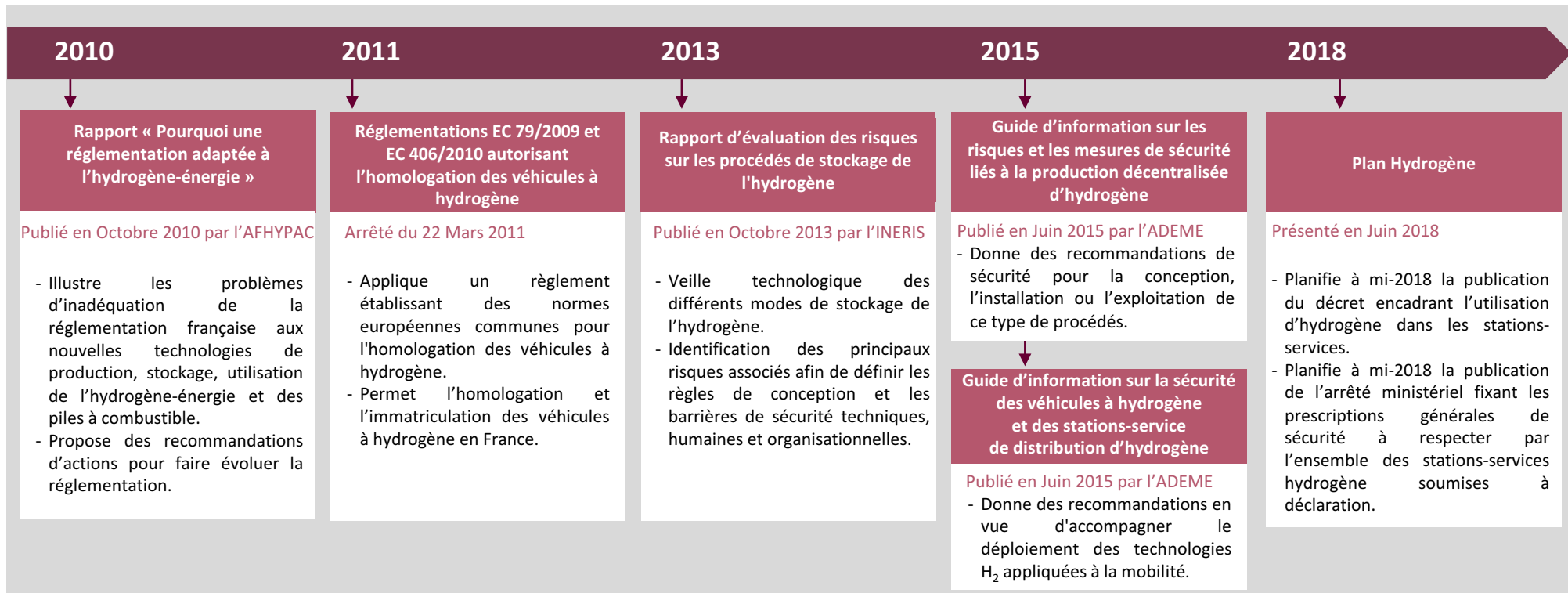
La commercialisation des technologies de l'hydrogène nécessite une réglementation harmonisée entre les pays européens, ainsi qu'une coopération dans les projets de recherche et développement. La montée en puissance des projets de coordination à l'échelle européenne, associée à un soutien financier adressé aux pionniers de ces initiatives est en bonne voie et accélérera le développement de la filière.

### 3 Stratégies et défis de la filière hydrogène-énergie



## Une évolution nécessaire de la réglementation et des normes de sécurité

- ▶ La réglementation existante en matière d'hydrogène a été construite pour les grandes unités de production chimique. Elle n'est **pas adaptée à un usage décentralisé** qu'impliquent les nouvelles applications de l'hydrogène-énergie.
- ▶ Des groupes de travail ont été lancés pour répondre aux besoins d'**adaptation** ou de **création de normes et règlements**.



De nombreux travaux doivent être menés en concertation avec les acteurs de la filière : instances réglementaires et normatives, organismes certificateurs, assureurs, industriels. La multiplication des projets de démonstration et les retours d'expérience des premières réalisations contribueront à l'évolution du cadre réglementaire et à l'acceptation sociale.



## Les nouvelles applications de l'hydrogène-énergie présentent des défis communs

Les secteurs du transport, du Power-to-Gas et des applications stationnaires et nomades, parce qu'ils reposent sur des technologies similaires faisant appel à l'électrolyse et aux piles à combustible, font face à des problématiques communes :

## Ensemble des applications de l'hydrogène-énergie

## 1. Réduire les coûts des technologies pile à combustible et électrolyseur

*La pile à combustible fonctionne selon le principe inverse de l'électrolyse. Les deux technologies reposent sur des processus chimiques similaires qui font appel à des matériaux rares et coûteux. La diminution des coûts associés au développement et à la production des équipements est un des enjeux principaux du développement de la filière hydrogène-énergie.*



## 2. Améliorer les performances et optimiser les durées de vie des équipements, leur flexibilité et temps de réponse

*Afin de tirer pleinement parti de l'hydrogène en tant que vecteur énergétique, les rendements et temps de réponse des équipements doivent être améliorés. La flexibilité des électrolyseurs et piles à combustible, soumis à des cycles de charge très courts sera un élément déterminant pour l'intégration des différentes technologies entre elles.*

## 3. Adapter les réglementations sécuritaires et administratives existantes aux nouvelles applications de l'hydrogène

*La longueur et la complexité des démarches administratives liées aux autorisations d'exploitation d'installations hydrogène représentent aujourd'hui un frein au développement d'une filière industrielle et commerciale. Les réglementations existantes ne sont pas adaptées aux usages décentralisés des nouvelles applications de l'hydrogène et doivent être allégées.*



## 4. Harmoniser les normes et établir des standards internationaux

*Le développement de la filière doit s'appuyer sur l'interopatibilité des technologies développées par les différents acteurs européens et internationaux, via l'établissement de normes et de standards communs.*

5. Développer de nouveaux modèles économiques, soutenir les investissements privés, monétiser les services réseau et les émissions de CO<sub>2</sub> évitées

*Des modèles économiques capables d'initier puis soutenir les investissements doivent être mis en place. Cela passe par l'établissement de nouveaux business models liés aux services réseau (effacement, agrégateurs d'énergie), et éventuellement par la monétisation des émissions de CO<sub>2</sub> évitées. Des mécanismes de subvention efficaces doivent être mis en place pour soutenir les acteurs privés et engager les consommateurs sur les technologies de l'hydrogène.*



## 6. Favoriser l'acceptabilité sociale de l'hydrogène

*L'hydrogène souffre d'une réputation peu attrayante, véhiculée par le souvenir de l'accident d'Hindenburg (destruction d'un dirigeable en 1937). Faire accepter l'idée que l'hydrogène n'est pas plus dangereux que le gaz naturel ou l'essence est un défi que la filière devra engager. La multiplication des projets de démonstration et des initiatives locales permettra de le relever. L'utilisation généralisée de l'hydrogène nécessitera néanmoins des garanties fortes sur la sûreté des technologies de production, stockage et distribution.*



La poursuite des travaux de recherche, la levée des contraintes réglementaires, la mise en place d'un soutien financier (tarifs de rachat, augmentation de la taxe carbone) et la mise en place de campagnes d'information et de programmes éducatifs sensibilisants sont autant d'actions à mener sur l'ensemble de la filière hydrogène afin de permettre son développement futur.

## Les défis de la filière mobilité hydrogène

### Les véhicules hydrogène



1. Diminuer les **coûts des véhicules**, notamment des  **piles à combustible et réservoirs H<sub>2</sub> embarqués**  
 Toyota commercialise sa Mirai 78 900 €, soit à un prix deux fois supérieur à la Prius, son équivalent hybride. Toyota espère cependant être en mesure de diviser par deux le prix de commercialisation de ses véhicules hydrogène d'ici 2020, et par quatre d'ici 2030.



2. Favoriser l'achat de véhicules FCEV au travers de **subventions efficaces**  
 Le gouvernement ne propose pas à ce jour de prime à l'achat de véhicule hydrogène, alors que de telles primes existent pour l'achat de véhicules électriques.



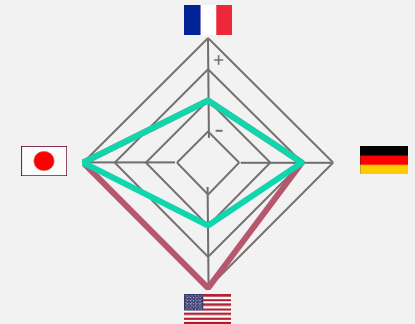
3. Définir une **fiscalité attractive** pour le carburant hydrogène via des **exemptions fiscales**  
 Selon l'étude réalisée par France Stratégies en 2013, le prix du km parcouru serait de 13c€ pour le carburant hydrogène contre 3,5c€ (hors taxes) pour le gazole. Exempté de taxes, le kg d'H<sub>2</sub> pourrait être compétitif face à l'essence (avec TICPE).



4. **Multiplier l'offre de FCEV** et s'appuyer en France sur les solutions de **prolongation d'autonomie basées sur l'hydrogène**  
 Etant donné la stratégie des constructeurs automobiles français en faveur du 100% électrique, le déploiement d'un parc national de FCEV devra s'appuyer sur la technologie de prolongateur d'autonomie fonctionnant à l'hydrogène, complémentaire des véhicules électriques, et notamment développé par l'entreprise française Symbio.

■ **Ambition des plans de mobilité H<sub>2</sub> en termes de FCEV attendus**

■ **Positionnement des constructeurs automobiles nationaux sur le marché des FCEV**



### Les stations de ravitaillement hydrogène



1. Développer des **hubs de consommation proches des stations et des électrolyseurs**, puis un réseau européen de **stations de ravitaillement**  
 En veillant chaque fois que possible à prendre en compte, lors de l'installation des bornes de chargement, la possibilité d'une ouverture, à terme, au public (ergonomie, positionnement dans les locaux, adjonction d'un moyen de paiement...).



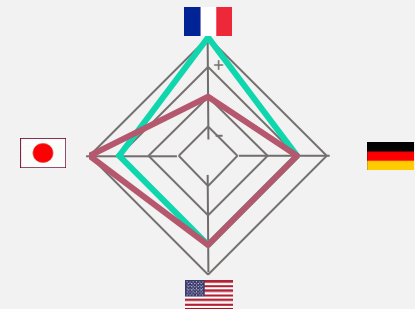
2. **Réduire les coûts d'investissement des stations** et définir des stratégies de financement  
 Evalués entre 1 et 3 millions d'euros par unité, ces coûts d'investissement et la question de leur financement constituent un frein important au développement de la filière. Au Japon, le gouvernement subventionne une partie de l'investissement et participe aux charges fixes d'exploitation.



3. **Adapter la réglementation** pour permettre la production d'hydrogène via électrolyse à proximité des stations  
 Cela permettra de s'affranchir de la difficulté de transport et distribution de l'hydrogène. En France, des textes de loi encadrant ces nouveaux usages sont attendus pour fin 2018.

■ **Ambition des plans de mobilité H<sub>2</sub> en termes de stations de ravitaillement**

■ **Positionnement des groupes nationaux sur le marché de la production/distribution**



## Les défis de la filière Power-to-Gas

### Le Power-to-Gas



1. Mettre en place **une réglementation efficace** et propice au développement d'une filière industrielle  
*Les normes de sécurité et réglementations actuelles sont élaborées pour des applications centralisées et de grande échelle de l'hydrogène. Elles ne sont pas adaptées à une diffusion plus large et décentralisée qu'implique son usage dans le PtG. Une réglementation plus claire et plus flexible, commune à tous les gaz énergétiques s'impose au niveau national et européen.*



2. Mettre en place un **mécanisme de soutien à l'injection de gaz issu d'hydrogène** dans le réseau  
*Selon une étude de l'ADEME publiée en 2013, le développement de la filière PtG est dépendant de la mise en place de mécanisme de soutien à horizon 2030, sous la forme de tarifs d'achat du gaz injecté, similaires à ce qui existe aujourd'hui pour l'injection de biométhane.*



3. Mettre en place un **système de subventions efficace** pour la production **d'hydrogène décarboné**  
*Le rapport final de l'OPECST publié fin 2013 proposait une exonération, durant une période transitoire, de toute taxation sur l'hydrogène, à l'exception de celui produit à partir d'hydrocarbures. Depuis 2016, la consommation d'électricité pour production d'H<sub>2</sub> par électrolyse est exonérée de CSPE. Sur la base des premiers retours de démonstrateurs, cette exonération représente entre 1,2 et 1,5€/kg, soit jusqu'à 30% du coût de production et presque 20% du prix de vente.*

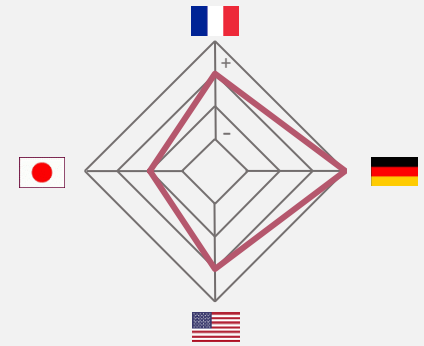


4. Encourager l'établissement d'un **partenariat fort entre acteurs gaziers et électriques**  
*La séparation et concurrence historiques des acteurs électriques et gaziers français constitue un frein au développement du PtG. La collaboration des GRT de gaz et d'électricité à l'échelle nationale, ainsi que le rapprochement des GRD à l'échelle locale permettront de tirer entièrement partie des synergies entre réseaux de gaz et d'électricité via le PtG.*

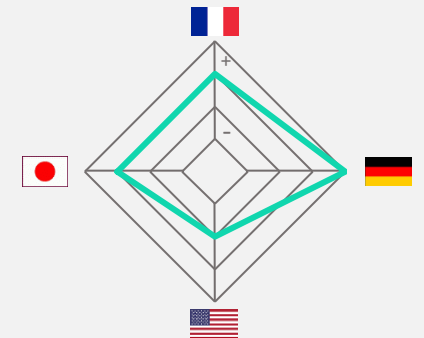


5. Favoriser un taux significatif d'**injection d'hydrogène dans le réseau** de gaz  
*La quantité d'hydrogène injectable sur les réseaux de transport et de distribution de gaz est aujourd'hui limitée à quelques pourcents pour des raisons de sécurité et de compatibilité technique. Le processus de méthanation, permettant, à partir d'hydrogène et de CO<sub>2</sub>, de créer un méthane de synthèse 100% miscible avec le gaz naturel et le biométhane, est une des solutions pour répondre à cette difficulté. Dans le cadre d'une des mesures du Plan Hydrogène, un rapport définissant les conditions techniques et économiques d'injection d'hydrogène dans les réseaux de gaz doit être remis pour mi-2019.*

### Projets de démonstration initiés




### Positionnement des groupes nationaux sur le marché du Power-to-Gas



### 3 Stratégies et défis de la filière hydrogène-énergie


#### Les défis de la filière applications mobiles et stationnaires

##### Les application stationnaires

- 


1. Poursuivre les **progrès techniques** et la **réduction significative des coûts** dans la perspective d'une **production en grande série** de ces systèmes  
*Notamment à travers le remplacement des matériaux rares et coûteux (platine) intervenant dans la fabrication des PAC.*

---

- 


2. Favoriser le **déploiement d'expérimentations à grande échelle** de piles à combustible hydrogène  
*Dans ce sens, le projet européen PACE (Pathway to a Competitive European Fuel Cell micro-Cogeneration Market), financé à hauteur de 90M€ par le FCH-JU, succède au projet Ene.field et vise à installer près de 3000 piles à combustible résidentielles dans 10 pays européens d'ici 2021.*

---

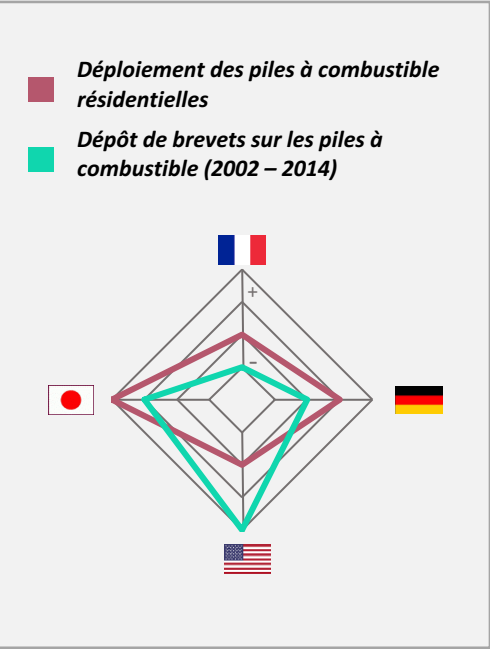
- 

3. Définir des **stratégies cohérentes et rentables de réapprovisionnement** en hydrogène des piles à combustible  
*Pour les villes, les réseaux de distribution de mélange gaz – hydrogène sont une solution d'approvisionnement (le projet GHRYD doit démontrer la possibilité d'alimenter de cette manière des piles stationnaires installées en résidentiel). Les points de consommation plus isolés pourront avoir recours à un système de production décentralisée d'H<sub>2</sub> à partir d'énergie renouvelable ou à l'approvisionnement par camions de livraison.*


---

- 

4. Poursuivre le développement de **systèmes de cogénération** basées sur la technologie de pile à combustible  
*Vaillant teste actuellement un système de micro-cogénération par pile à combustible alimentée au gaz naturel. La réaction d'électrolyse dégage de la chaleur qui est récupérée et utilisée pour les besoins en chauffage et en eau chaude de la maison.*




##### Les applications mobiles

- 


1. Poursuivre la R&D dans la **miniaturisation des PAC et les procédés d'industrialisation à grande échelle**

---

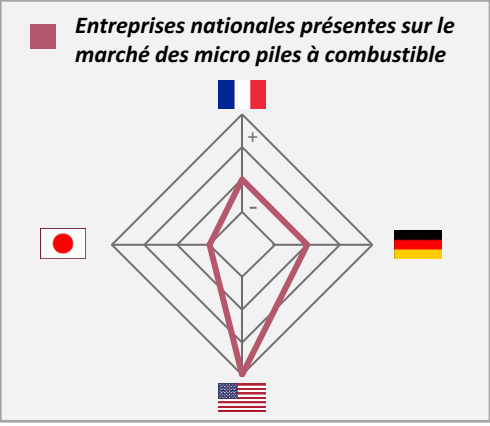
- 

2. **Convaincre le consommateur** de l'intérêt des PAC par rapport aux batteries pour l'alimentation des appareils mobiles

---

- 

3. Répondre à la **problématique de la recharge**, actuellement coûteuse  
*Les rares entreprises encore présentes sur ce marché commercialisent leurs chargeurs à un prix compris entre 100€ et 200€, alimentés par des cartouches d'hydrogène proposées entre 10€ et 20€.*





**Charlotte de LORGERIL**

**Associate Partner**

Mail: [charlotte.delorgeril@sia-partners.com](mailto:charlotte.delorgeril@sia-partners.com)

Tel: +33 6 24 73 18 34

 @cdelorgeril



**Gautier LAVEISSIERE**

**Consultant Senior**

Mail: [gautier.laveissiere@sia-partners.com](mailto:gautier.laveissiere@sia-partners.com)

 @glaveissiere



**Arthur CRUIZIAT**

**Consultant**

Mail: [arthur.cruiziat@sia-partners.com](mailto:arthur.cruiziat@sia-partners.com)



**Le magazine Energies et Environnement  
de Sia Partners**

<http://energie.sia-partners.com/>

<http://energylab.sia-partners.com/>

 @SiaEnergie


# Sia Partners est le leader français indépendant des cabinets de conseil en management et le pionnier du Consulting 4.0

## NOTRE ACTIVITE

 **200 M€**  
de CA FY18/19

 **20**  
Bureaux

 **1999**  
Date de création


 **65%** Projets de transformation  
**15%** Stratégie  
**15%** Stratégie IT & Digitale  
**5%** Data Science

 **35**  
Bots

## NOTRE EQUIPE

 **1 200**  
Consultants

 **41** Nationalités

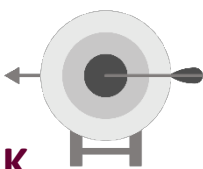
 **40%** Femmes  
**60%** Hommes


 **75**  
Partners


 **20**  
Consultants en programme de mobilité à l'international

## NOS CLIENTS

 **350** Clients dans le monde

 **1K**  
Missions par an

 Nos Clients incluent **20%** du **Fortune 500**

 **50** Etudes par an

**92%** De clients récurrents  


**Avec un portefeuille d'expertises de premier plan, nous apportons un regard innovant et des résultats concrets**

---

## **NOTRE EXPERTISE**

### **SECTEURS**

Assurance  
Banque  
Biens de consommation &  
Distribution  
Énergie et Utilities  
Immobilier  
Industrie  
Pharmacie  
Santé  
Secteur public  
Télécoms et Médias  
Transport & Logistique

### **SERVICES**

Actuariat  
Conduite du changement  
Conformité  
Data Science  
Excellence opérationnelle  
Marketing & Relation Client  
Performance de la fonction Achat  
Performance Financière  
Pricing & Revenue Management  
Ressources Humaines  
Stratégie & Direction Générale  
Stratégie IT  
Transformation numérique

### **DIGITAL ASSETS**

Data Management  
Due Diligence numérique  
Ecosystèmes d'innovation  
Intelligence Artificielle & RPA  
Internet of Things  
Lab Data Science  
Transformation Hub  
Valorisation des données



# Notre écosystème d'innovation

## DATA SCIENCE EXCELLENCE CENTER

0100100  
0111101  
0100100

## DIGITAL PLATFORM

Productivity Tools  
Collaborative Tools  
Design Thinking Lab  
MOOCs  
DataSets & DataLab  
Data Science Showroom  
APIs & Consulting Bots

## EMERGING TECH LAB

RPA  
IoT  
Data Management  
Cybersecurity  
Blockchain  
DevOps  
Serverless PaaS  
Quantum Computing  
Volumetric Displays

Voice Recognition/Virtual Assistants  
Taxonomy & Ontology  
Augmented/Virtual Reality  
Drones  
Conversational User Interfaces

BIM  
Autonomous Vehicles  
Connected Home

## STUDIO

Investment arm in startup  
E-commerce  
AI  
Startup trends

CONSULTING 4.0  
By siapartners

## DIGITAL TRANSFORMATION OFFERINGS

Digital Due Diligence  
Innovative Ecosystems  
Digital Trends Observatory  
Digital Assessment & Strategy  
Data Monetization  
Transformation Hub  
New ways of working  
POC to industrialization  
FOVE – Our digital agency

## IDEATION

Learning Expeditions  
Students Contests | Hackathon  
Sia Ideas  
Open Source Thought Leadership