

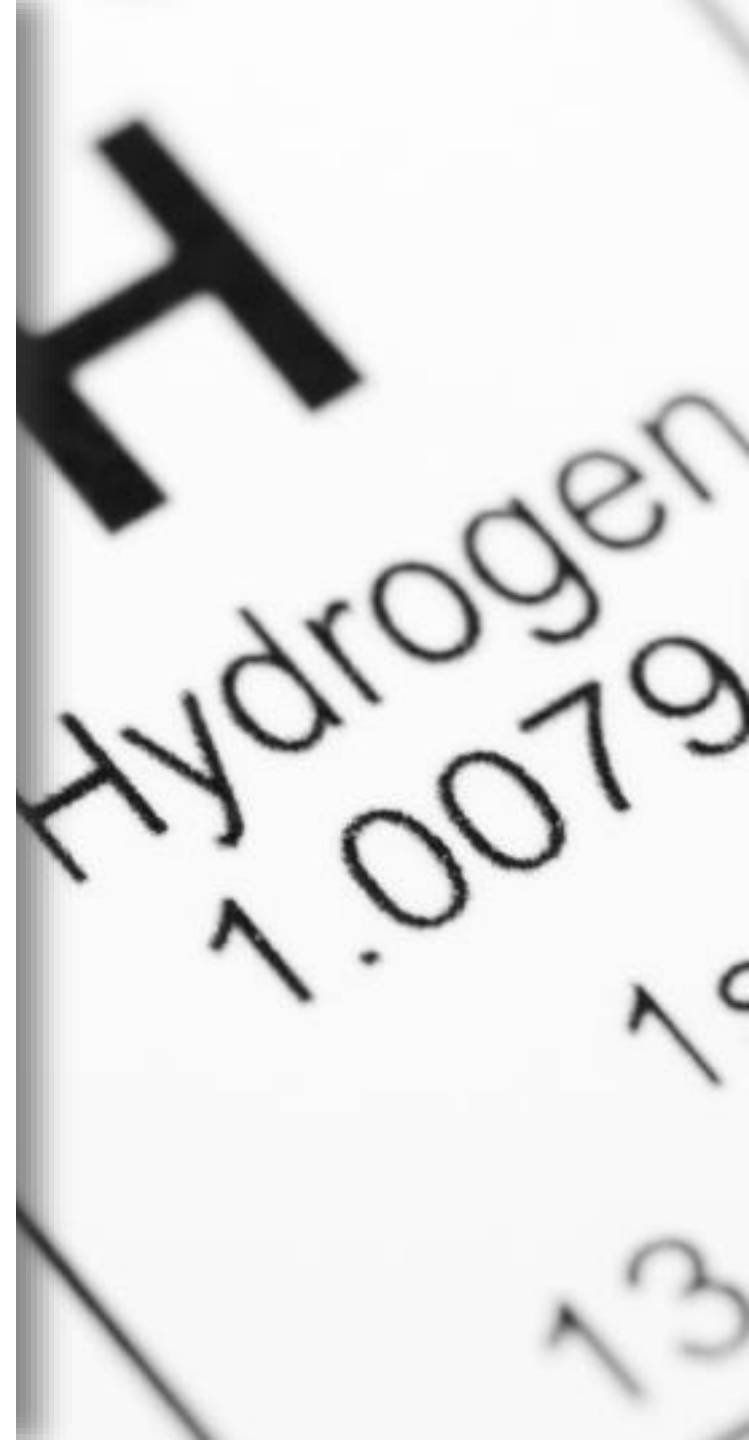
FEVRIER 2020

LA FILIÈRE HYDROGÈNE- ÉNERGIE EN FRANCE

Le développement de la filière s'est accéléré en 2019, porté par les appels à projets du Plan Hydrogène et le lancement par des industriels et énergéticiens majeurs de filiales spécifiques à l'hydrogène.

siapartners

Pioneer of Consulting 4.0



Etudes Hydrogène Sia Partners



Juin
2018



Le Power-to-Gas : La France dispose de nombreux atouts et des leaders reconnus sur la scène internationale

Cette étude présente la filière Française et acteurs Européens de ce procédé qui permet de transformer les surplus de production d'électricité renouvelable en gaz (hydrogène ou méthane de synthèse) et ainsi créer des synergies entre les réseaux électriques et gaziers.



Retrouvez l'étude ici : <https://www.energylab.sia-partners.com/power-to-gas-2018>



Janvier
2019



La filière hydrogène-énergie en France - 2019

Cette étude met à disposition les clés de compréhension de la filière Hydrogène-énergie et dresse l'état des lieux des nouveaux marchés au-delà du Power to gas.

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.



Retrouvez l'étude ici : <https://www.energylab.sia-partners.com/hydrogene-2019>



Février
2020



La filière hydrogène-énergie en France - 2020

Sia Partners publie le volet 2020 de son étude sur la filière hydrogène-énergie en France et analyse les tendances et faits marquants de l'année 2019 :

- les initiatives dans la **production d'hydrogène renouvelable et bas carbone**
- l'intérêt pour le déploiement de **bus et trains à hydrogène**
- la **montée en puissance des énergéticiens français**
- le **rôle clé des territoires** dans le développement des projets hydrogène
- le premier **bilan du Plan Hydrogène**, un an et demi après sa présentation
- les **évolutions réglementaires** et les **soutiens publics attendus pour 2020**

NEW

Sommaire

1. La production d'hydrogène face aux enjeux environnementaux
2. Les nouveaux usages de l'hydrogène aux perspectives prometteuses
 - a) Les nouveaux usages industriels
 - b) La mobilité
 - c) Les services réseaux
 - d) Les applications stationnaires et mobiles
3. La structuration des acteurs français
4. Stratégies et défis de la filière hydrogène-énergie

Executive summary

H₂

Jusqu'à présent principalement utilisé comme matière première pour la chimie et le raffinage pétrolier, l'hydrogène est de plus en plus identifié comme **vecteur énergétique** d'avenir en raison de ses facultés de stockage et du fait que son utilisation n'émet pas de CO₂. Il se présente aujourd'hui comme un substitut possible aux hydrocarbures, et un moyen efficace pour faciliter l'intégration des énergies renouvelables. Si les **70 millions de tonnes d'hydrogène produites par an dans le monde** sont pour l'instant issues à plus de 95% d'énergie fossile, **les nouvelles technologies permettant de produire de l'hydrogène décarboné continuent à gagner en maturité**. La production d'hydrogène à partir de biomasse ou par électrolyse est soutenue par l'émergence d'une nouvelle demande pour de « l'hydrogène vert » :



- Dans l'industrie, le recours à un hydrogène décarboné devrait intervenir dans les procédés utilisant traditionnellement de l'hydrogène fossile comme la production d'ammoniac et le raffinage du pétrole, mais également dans **de nouveaux procédés en substitut d'autres matières fossiles**. Les **projets d'expérimentation** de nouvelles voies d'intégration d'hydrogène décarboné ou de valorisation d'hydrogène fatal dans les chaînes de production se sont ainsi **multipliés ces dernières années**, et la loi énergie-climat 2019 fixe un **objectif de 20 à 40 % d'hydrogène bas carbone et renouvelable à l'horizon 2030**.



- Dans les transports, les véhicules hydrogène **représentent une alternative de choix pour répondre aux défis de la mobilité durable**. Ils ne rejettent que de l'eau, disposent d'une autonomie équivalente à un véhicule à combustion et se rechargent rapidement. En plus de la multiplication du nombre de modèles de voitures hydrogène, l'année 2019 aura été marquée par **l'accélération de la dynamique du ferroviaire hydrogène**, avec la multiplication des commandes du train développé par Alstom, et par **l'intérêt grandissant des collectivités locales pour le déploiement de lignes de bus à hydrogène**.



- 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.

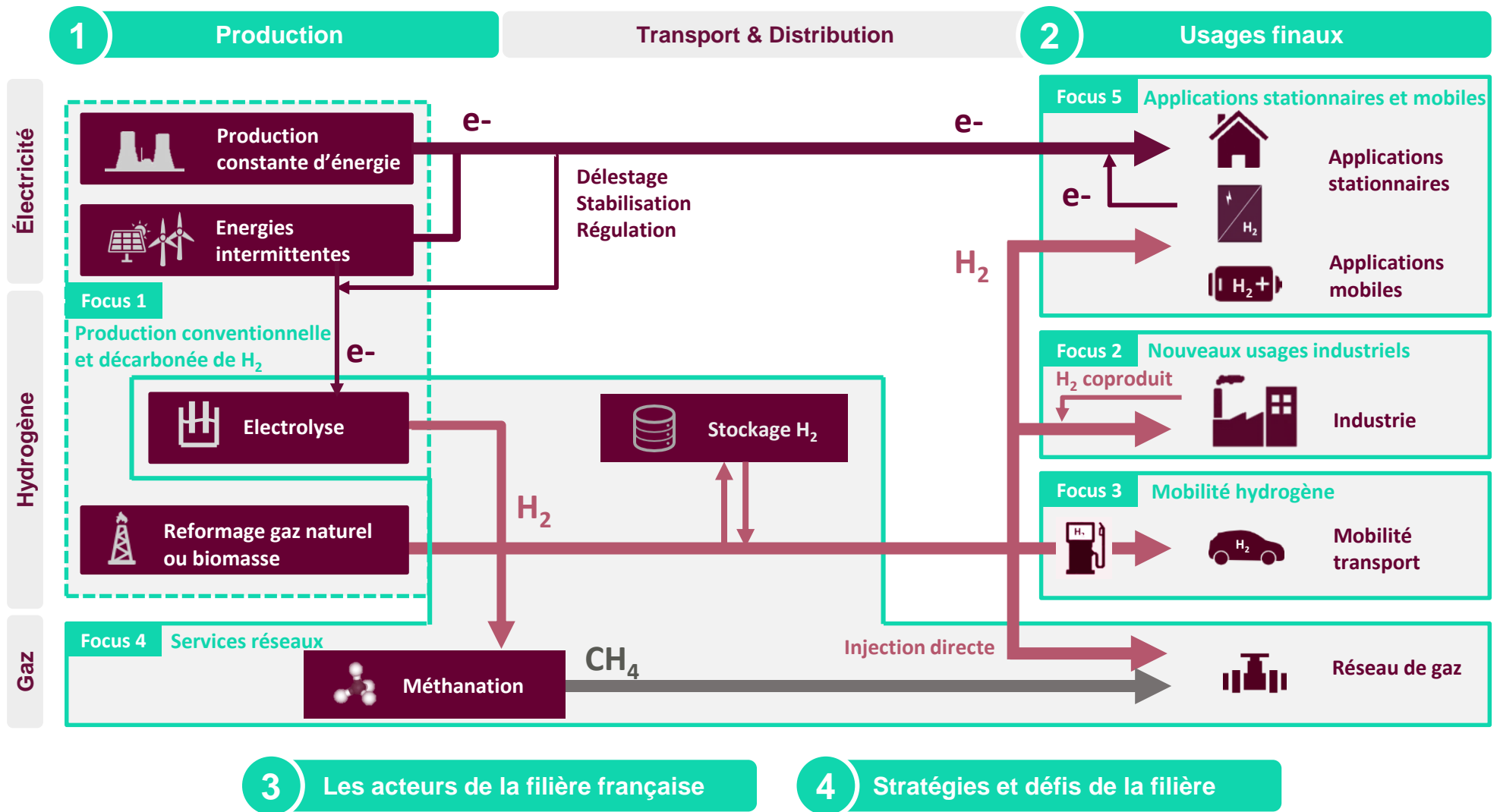


Les impacts environnementaux de la montée en puissance de ce vecteur énergétique sont loin d'être négligeables : le déploiement massif des nouvelles applications de l'hydrogène-énergie pourrait **réduire d'environ 55 Mt les émissions de CO₂ en France**¹.



Aussi la dynamique initiée au début de la décennie avec **l'émergence de start-up innovantes s'est accélérée récemment par le lancement, par des industriels et énergéticiens majeurs, de filiales dédiées à l'hydrogène** (lancement d'une filiale spécifique par ENGIE en 2018, lancement d'Hynamics par EDF en 2019, création de la co-entreprise Symbio par Michelin et Faurecia). Au niveau politique, **la dynamique continue d'être insufflée par les territoires, qui se mobilisent fortement pour répondre aux appels à projets de l'ADEME lancés dans le cadre du Plan Hydrogène et définissent des roadmaps locales de déploiement de l'hydrogène**. Les objectifs court terme fixés dans le Plan Hydrogène de 2018 ont été atteints, en particulier en ce qui concerne l'avancée des premiers travaux réglementaires, et les perspectives de soutien pour 2020 se précisent : sont attendus de nouveaux appels à projets et une évolution du cadre réglementaire en matière d'hydrogène renouvelable et bas carbone. Néanmoins, **les investissements annoncés apparaissent insuffisants face aux besoins nécessaires** au développement des infrastructures, à l'amélioration des rendements et à la diminution des coûts des technologies hydrogène.

Plan de l'étude



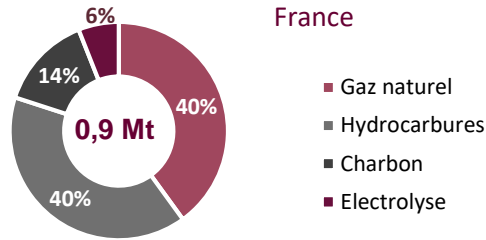
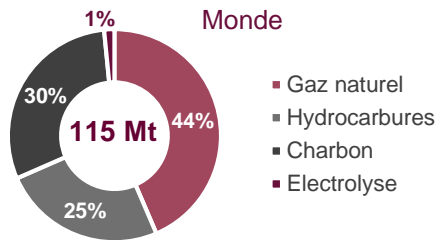
1

La production d'hydrogène face aux enjeux environnementaux

1. La production d'hydrogène face aux enjeux environnementaux

Etat des lieux : une production mondiale d'hydrogène toujours très fortement carbonée

L'hydrogène est aujourd'hui issu principalement de sources fossiles...



Chiffres clés

115 Mt Production annuelle mondiale d'hydrogène (2018)

0,9 Mt Production annuelle française d'hydrogène

94 % Part de la production française d'H₂ d'origine fossile

...par vaporeformage de gaz naturel,



En présence de vapeur d'eau surchauffée, les atomes carbonés (C) du **méthane** (CH₄) se **dissocient**. Après deux réactions successives, ils se **reforment séparément** pour obtenir, d'un côté, du **dihydrogène** (H₂) et de l'autre, du **dioxyde de carbone** (CO₂).

€ 1 à 2,5 € / kg d'H₂ produit

CO₂ 12 kg de CO₂ émis / kg d'H₂ produit

...par gazéification de charbon,



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, du **dihydrogène** (H₂) et de l'autre, du **monoxyde de carbone** (CO).

€ 1,5 à 3 € / kg d'H₂ produit

CO₂ 19 kg de CO₂ émis / kg d'H₂ produit

...comme co-produit d'hydrocarbures



Une part importante de l'hydrogène produit dans le monde est issu de la production d'autres éléments chimiques, **principalement des produits raffinés issus d'hydrocarbures**. On parle d'hydrogène « **co-produit** » ou « **fatal** »

€ Les coûts et émissions associés dépendent des process chimiques impliqués.

...ou obtenu par électrolyse



L'hydrogène produit par électrolyse est principalement un co-produit de l'électrolyse du chlorure de sodium. La production d'hydrogène par électrolyse de l'eau ne représente que 0,1% de la production mondiale : à l'aide d'un courant électrique, l'eau (H₂O) est décomposée en dioxygène (O₂) et en dihydrogène (H₂).

€ 3 à 12 € / kg d'H₂ produit¹

CO₂ 0 kg de CO₂ émis / kg d'H₂ produit²

En 2019, la quasi-totalité de l'hydrogène produit provient encore de sources fossiles. La production par électrolyse de l'eau, qui répond pourtant aux enjeux environnementaux², n'est toujours pas compétitive et ne représente encore que 0,1% de la production mondiale d'hydrogène.

1. La production d'hydrogène face aux enjeux environnementaux

Des technologies prometteuses de production pour une substitution de l'hydrogène carboné



En France, les procédés de production de d'hydrogène sont responsables de l'émission de **11,5 Mt de CO₂**, soit environ **3% des émissions totales de CO₂**.*

Les industriels se positionnent sur la décarbonation de la production d'hydrogène, en implantant des solutions de production d'hydrogène renouvelable ou bas carbone ou en valorisant l'hydrogène fatal sur des hubs industriels déjà producteurs.



La valorisation de l'hydrogène fatal

L'hydrogène fatal ou co-produit, c'est-à-dire issu d'un procédé industriel qui ne vise pas uniquement à produire de l'hydrogène est considéré comme décarboné dans les cas où il est consommé sur le site de production, ou transporté de manière non polluante.

- 25 % de l'hydrogène produit en France, actuellement brûlé, serait récupérable, hors considérations de coût,
- environ 5% de l'H₂ produit en France serait de l'hydrogène fatal rejeté dans l'atmosphère et pourrait être par conséquent valorisé pour d'autres applications.

Sources : IFPEN et ADEME, rapport gouvernemental N° 2015/07/CGE/SG



Les modes de production d'hydrogène bas carbone et renouvelable

Mode de production d'hydrogène	Hydrogène carboné	Hydrogène bas carbone	Hydrogène renouvelable	Maturité de la techno
Electrolyse de l'eau avec électricité renouvelable			✓	En cours d'industrialisation
Electrolyse de l'eau avec électricité bas carbone		✓		
Electrolyse de l'eau avec électricité carbonée	✓			Industrielle
Reformage du méthane contenu dans le gaz naturel, <u>sans</u> CCS/ CCU	✓			
Reformage du méthane contenu dans le gaz naturel, <u>avec</u> CCS/ CCU		✓		CCU : Industrialisé CCS : Ind. en cours
Reformage du biométhane, avec ou sans CCS/CCU			✓	Technologie mature mais pas de projet à grande échelle
Craquage/pyrolyse du méthane contenu dans le gaz naturel		✓		En cours d'industrialisation
Craquage/pyrolyse du biométhane			✓	Technologie mature mais coûts élevés
Gazéification du charbon <u>sans</u> CCS/CCU				Industrielle
Gazéification du charbon <u>avec</u> CCS/CCU		✓		Technologie mature mais pas de projet à grande échelle
Gazéification de la biomasse ou de déchets		✓	OU ✓	En cours de démonstration
Valorisation d'hydrogène fatal		✓		Industrielle

La filière de la production d'hydrogène bas carbone et renouvelable se développe mais demeure peu mature. En dehors de cas présentant un contexte particulièrement favorable (financement public, besoins décentralisés, non accessibilité des infrastructures gazières), le contexte de marché n'est pas encore propice au déploiement massif de ces nouveaux modes de production.



1. La production d'hydrogène face aux enjeux environnementaux

Focus : la production d'hydrogène vert par électrolyse

Chiffres clés

0,9 Mt Production annuelle française d'hydrogène

180 t Production annuelle française d'hydrogène par électrolyse de l'eau

1 à 2,5 € Coût de production du kg d'H₂ par vaporeformage de gaz naturel

3 à 12 € Coût de production du kg d'H₂ par électrolyse de l'eau

Concept, Atouts & Obstacles

Concept La **production d'hydrogène vert par électrolyse** consiste à produire l'hydrogène à partir d'électrolyse de l'eau en ayant **recours à de l'électricité issue de sources renouvelables (éolien, solaire, biomasse)**. Ce process de production n'est donc **pas émetteur de CO₂**.

Atouts L'hydrogène produit de façon centralisée par reformage du gaz naturel est généralement **liquéfié** ou fortement **comprimé** 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.

Obstacles Le coût de production d'hydrogène par électrolyse de l'eau est fortement **dépendant du prix de l'électricité** utilisée, mais reste en moyenne **4 fois supérieur au coût de production par vaporeformage** de gaz naturel. Cependant, selon le CEA, ce coût de production pourrait diminuer à **3€/kg, voire 2€/kg** 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*.

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 permettrait de **réaliser des économies d'échelle** et donc de **lancer la filière grâce à un coût de production plus faible**.

Les acteurs de la production par électrolyse

Energéticiens



Les énergéticiens initient les nouveaux projets démonstrateurs et produisent selon des procédés faiblement émetteurs en CO₂ l'électricité qui vient alimenter les électrolyseurs.



Fabricants électrolyseurs



Les industriels développant les électrolyseurs sont responsables de la diminution des coûts de production, principal frein à leur compétitivité.



Producteurs d'hydrogène



Ces acteurs exploitent les parcs d'électrolyseurs et contractualisent avec des consommateurs, lorsqu'ils n'autoconsomment pas leur production.



En l'absence de taxes CO₂ fortes, la production d'hydrogène par électrolyse n'est pas encore économiquement compétitive. A court terme, l'intérêt de l'électrolyse pourrait venir d'unités décentralisées, permettant d'éviter des investissements massifs dans les réseaux de distribution d'hydrogène, et de répondre à la demande diffuse des nouveaux usages (mobilité, services réseaux)



1. La production d'hydrogène face aux enjeux environnementaux

Les projets de déploiement d'hydrogène décarboné se multiplient à travers le monde

Les acteurs français et internationaux (industriels, centres de recherche) multiplient les projets de démonstration pour la production ou la valorisation d'hydrogène décarboné :

Projet E-CO₂MET 2019

Electrolyse de l'eau avec électricité renouvelable

Installation d'un **électrolyseur à haute température** alimenté en électricité renouvelable pour produire l'hydrogène nécessaire à la synthèse de méthanol sur la raffinerie de Leuna en Allemagne.



CRYOCAP™ 2015

Reformage du méthane contenu dans le gaz naturel, avec CCS/ CCU

Installation d'une technologie de captation, par **procédé cryogénique, d'une partie du CO₂ émis lors de la production d'hydrogène.**

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



R-HYNOCA 2021

Gazéification de la biomasse ou de déchets organiques

Projet de **production d'hydrogène vert à partir de biomasse** par le procédé Hynoca pour alimenter un réseau de bus hydrogène à Strasbourg.



MONOLITH 2020

Pyrolyse du méthane

Technologie de **transformation du gaz naturel en carbone et en hydrogène** par pyrolyse du méthane via un procédé plasma pour un site industriel de Nebraska.



REFHYNE 2022

Electrolyse de l'eau avec électricité renouvelable

Installation d'un **électrolyseur PEM de 10 MW** alimenté en électricité renouvelable et pouvant produire jusqu'à 1 300 tonnes d'hydrogène par an pour une unité de raffinage en Allemagne.



Freeport 2018

Valorisation d'hydrogène fatal

Production d'ammoniac à partir d'hydrogène obtenu comme **coproduit d'activités de pétrochimie** et transporté par canalisation sur le site industriel au Texas.



H21 North of England 2028

Reformage du méthane contenu dans le gaz naturel, avec CCS/ CCU

Projet de **conversion de 3,7 millions points de livraison de gaz**, à l'hydrogène issu de **reformage du méthane avec capture et séquestration du CO₂.**



Hydrogen Energy Supply Chain (HESC) 2030

Gazéification du charbon avec CCS/CCU

Projet de production d'hydrogène par **gazéification du charbon en Australie, pour exportation sous forme liquéfiée vers le Japon.** Capture et stockage souterrain de CO₂ issu de la gazéification.



Les annonces et déploiements de projets pilotes et expérimentaux de production d'hydrogène décarboné se sont multipliés en 2019. Ces projets permettront aux industriels de prouver la fiabilité de ces technologies à grande échelle et d'en améliorer la compétitivité économique.

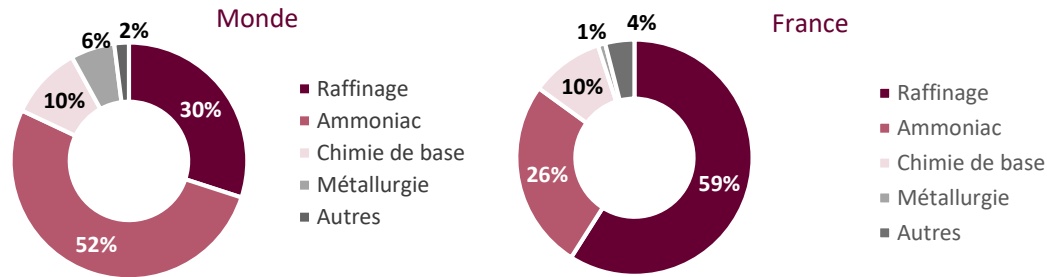
2

Les nouveaux usages de l'hydrogène aux perspectives prometteuses

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

Etat des lieux : une demande croissante en hydrogène, toujours dominée par les usages industriels historiques

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



Chiffres clés

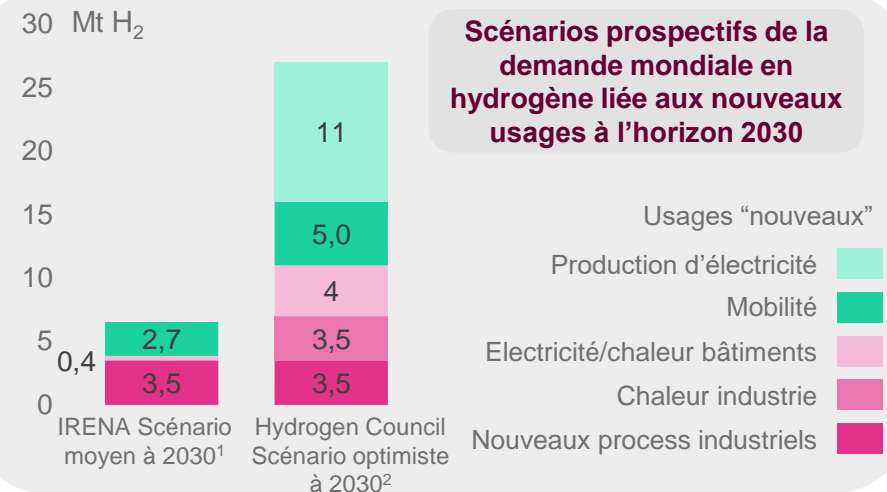
- 1,3 %** Part actuelle de l'H₂ dans la consommation mondiale d'énergie
- 18 %** Part possible de l'H₂ dans la consommation mondiale d'énergie en 2050¹
- < 1 Mt** Production mondiale d'H₂ utilisé aujourd'hui à des fins non industrielles
- > 500 Mt** Production mondiale possible d'H₂ en 2050 pour les nouvelles applications de l'hydrogène

...pourrait considérablement augmenter avec le développement des nouveaux usages de l'hydrogène...

Portée par les nouvelles applications de l'hydrogène-énergie, la **demande d'hydrogène pourrait croître de 50% d'ici 2030** et atteindre **près de 20% de la demande d'énergie finale en 2050**, selon les scénarios les plus optimistes¹.

Pour satisfaire les objectifs de réduction d'émissions de CO₂, cet hydrogène devra être **plus propre** que celui produit actuellement par vaporeformage de gaz naturel, ouvrant de **vastes perspectives aux marchés de production d'hydrogène bas carbone et renouvelable**.

En France, la demande en **hydrogène décarboné** pourrait atteindre **450 000 tonnes par an³**, dont près de la moitié pour répondre aux enjeux de **décarbonation dans l'industrie**.



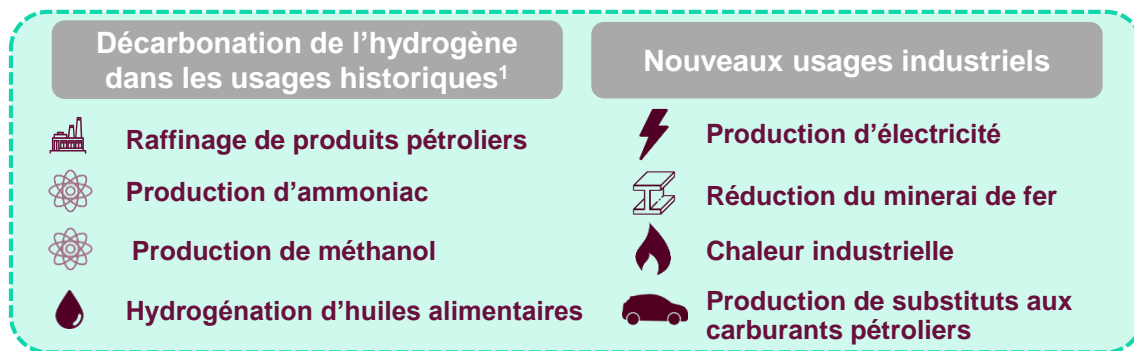
A horizon 2030, les usages industriels resteront largement la première source de consommation d'hydrogène. Les usages nouveaux (mobilité, nouveaux process industriels, injection dans les réseaux de gaz), pourraient représenter jusqu'à 30 Mt de demande en hydrogène, sous réserve de politiques publiques et d'investissements importants.



2. Les nouveaux usages de l'hydrogène : l'industrie

L'hydrogène décarboné, une des solutions pour réduire les émissions de CO₂ dans l'industrie ?

Les industriels fortement émetteurs de CO₂ se positionnent sur les nouveaux marchés de l'hydrogène : ils expérimentent de **nouvelles voies d'intégration d'hydrogène décarboné dans les chaînes de production existantes ou nouvelles** :



Ces projets s'intègrent généralement dans une **vision d'ensemble de l'évolution des systèmes énergétiques**, impliquant la construction de nouvelles chaînes de production-acheminement-consommation d'énergies.

Les projets d'expérimentation de nouvelles voies d'intégration d'hydrogène décarboné ou de valorisation d'hydrogène fatal dans les chaînes de production se sont ainsi multipliés ces dernières années². De nombreux acteurs français prennent part à ces projets innovants.

C2Fuel

Production d'acide formique et de diméthyléther avec de l'hydrogène renouvelable et du CO₂ issu de gaz de hauts-fourneaux (Dunkerque)

Démonstrateur - Lancement en 2019

Aciérie Thyssenkrupp

Remplacement partiel du charbon utilisé comme agent réducteur dans un haut fourneau par de l'H₂ (Dusseldorf)

Expérimentation
Financement du IN4climate.NRW en 2019

Carbon2Chem

Production de méthanol et d'ammoniac à partir d'H₂ produit par électrolyse de l'eau et de syngaz récupéré dans une aciérie

Pilote industriel lancé en 2018 - Subvention de 60m€ du gouvernement allemand

Si les projets de démonstration se multiplient, le décollage des nouvelles chaînes de valeur industrielles de l'hydrogène dépendra d'une part des politiques mises en œuvre pour soutenir cette filière (financement de projets de R&D, trajectoire du coût du CO₂), et d'autre part de la pertinence des modèles économiques associés aux usages d'hydrogène décarboné.



2. Les nouveaux usages de l'hydrogène : la mobilité

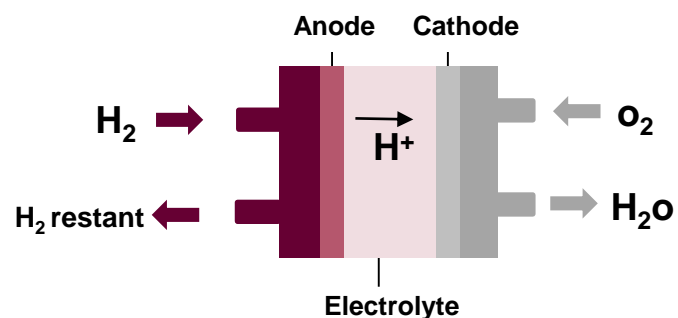
La mobilité hydrogène, un domaine à fort potentiel pour demain

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**.

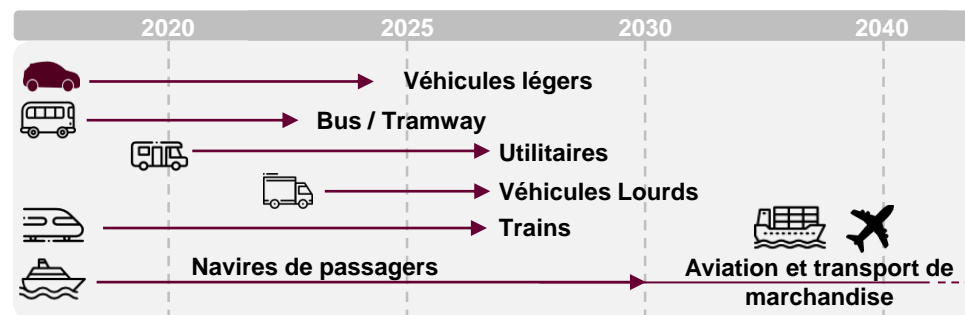


Un véhicule **alimenté par un hydrogène vert** (produit de manière décarbonée) a donc un **bilan carbone bien inférieur à un véhicule à combustion**.

...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 mondiales de CO_2 .

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 permettrait de **remplacer 20 millions de barils de pétrole par jour**, et de **diminuer de 3,2 Gt les émissions de CO_2 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_2 . Adapté à tout type de transport, l'hydrogène se présente comme un substitut intéressant au pétrole qui pourrait permettre d'accélérer la décarbonation des transports, à condition de devenir économiquement compétitif.



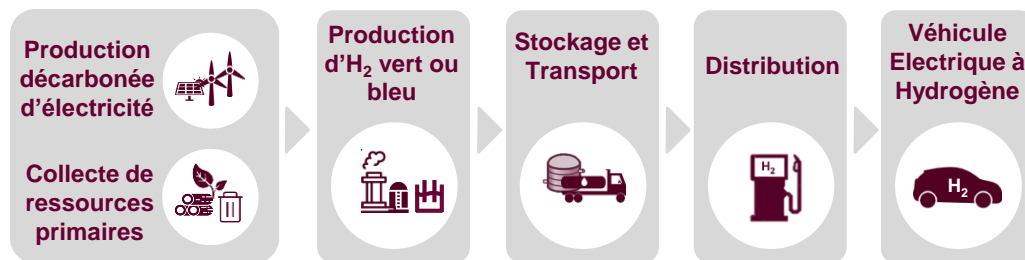
2. Les nouveaux usages de l'hydrogène : la mobilité

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

Chiffres clés*

- 11 200+** FCEV** aujourd'hui dans le monde
- 2,5 M** FCEV** objectif 2030 dans le monde
- 376+** Stations H₂ aujourd'hui dans le monde
- 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 et aucun polluant de l'air (SOx, NOx). 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 35 stations de ravitaillement.**

Les acteurs de la mobilité hydrogène

<p>Distributeurs</p>	<p>Les distributeurs de carburants et fabricants de stations hydrogène sont responsables, au même titre que les gaziers, de développer les infrastructures de distribution d'hydrogène, le principal défi pour la mobilité H₂ aujourd'hui.</p>	
<p>Constructeurs Equipementiers automobiles</p>	<p>Les constructeurs et équipementiers automobiles sont les moteurs des consortiums pour la mobilité hydrogène, et se mobilisent pour la mise en place des infrastructures pour alimenter les véhicules H₂.</p>	
<p>Equipementiers spécialisés</p>	<p>Des équipementiers spécialisés et producteurs de piles à combustibles (PAC) apportent des solutions technologiques pour la mise en place de cette mobilité.</p>	

La deuxième génération de véhicules électriques à hydrogène est déjà en commercialisation. Elle devrait permettre de lancer ce marché encore largement dépendant de l'action gouvernementale et de quelques industriels clés. Outre les conditions pour permettre la compétitivité économique et la baisse des coûts des véhicules, l'obstacle principal est l'établissement d'infrastructures qui doit s'accompagner de la mise en place d'une réglementation adaptée.

*Sources : Analyse Sia Partners d'après projections de l'IEA, mai 2019
 **FCEV : Fuel Cell Electric Vehicle – Véhicule à pile à combustible alimentée en hydrogène
 ***BEV : Battery Electric Vehicle – Véhicule électrique alimenté par batterie

2. Les nouveaux usages de l'hydrogène : la mobilité

Le FCEV¹, complément possible au BEV² sur les usages 'longue distance' et 'transport lourd' ?



Les caractéristiques techniques des piles à combustible permettent un déploiement de la mobilité H₂ sur des segments de marché spécifiques

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



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 utiles 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 les véhicules Renault Kangoo ZE Hydrogen.

Mais des défis de taille sont à relever

- L'essor de la technologie hydrogène nécessite le **déploiement d'un réseau de stations de recharge**, ce qui implique de **forts investissements**.
- L'**amélioration du rendement du puits à la roue** des technologies à hydrogène, associée à la **baisse des coûts de production** est l'autre véritable défi.



Le prix à l'achat d'un FCEV est aujourd'hui bien supérieur à celui d'un BEV : environ 70 000 € pour la berline de Toyota.

Les coûts élevés des stations 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 avantages techniques de la pile à combustible (autonomie, temps de ravitaillement) permettent d'envisager un déploiement de la mobilité H₂ pour les flottes captives et le transport lourd (camions, bus).

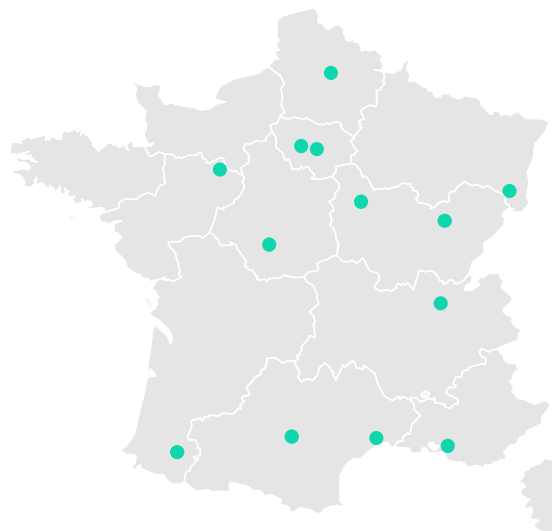


2. Les nouveaux usages de l'hydrogène : la mobilité

L'intérêt croissant de la filière hydrogène pour le transport public de voyageurs

L'année 2019 a été marquée par la **mise en service des premiers bus à hydrogène en France**. De nombreuses collectivités et syndicats de transport ont annoncé des **projets d'expérimentation, voire de mise en service entre 2020 et 2023**. Un grand nombre de ces initiatives est porté par des financements publics dans le cadre des appels à projet « Mobilité hydrogène » lancés par l'ADEME en 2018 et 2019 :

		Lens - Houdain		6	2019		
		Versailles		2	2019		
		Pau		8	2019		
		Grand Paris		2	2020		
		Le Mans		10		1	2019
		Marseille / Fos-su(Mer)		3	2020		
		Belfort Montbéliard		19		1	2020



2021		21	Dijon Métropole
2021		2	Lyon Métropole
2023		6 - 8	Toulouse
2023		21 - 51	Montpellier
2023		6	Châteauroux
-		5	Auxerre
-		3	Chaumont

2019 Date de 1er déploiement
 En circulation
 En test
 En projet
 Constructeur retenu
 Projet lauréat de l'AAP ADEME Mobilité H₂
























Mobilité Hydrogène France, consortium spécialisé dans la mobilité H₂ au sein de l'AFHYAC, envisage **le déploiement de 1000 bus d'ici 2024**. Pour faciliter l'atteinte de cet objectif, l'UGAP lancera en 2020 une **démarche d'achat groupé** pour agréger les demandes des collectivités intéressées. L'industriel français Safra se positionne sur ce marché et commercialise déjà le Businova H₂, équipé d'une pile à combustible développée par Symbio.

Pour répondre aux objectifs de verdissement des transports publics, les collectivités et les autorités publiques de transport s'intéressent aux bus à hydrogène et s'engagent dans des projets de déploiement. Un vingtaine de bus publics hydrogène pourrait circuler en 2020 en France, alors que près de 700 bus à hydrogène circulent déjà en Chine.

2. Les nouveaux usages de l'hydrogène : la mobilité

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



Classement constructeur*	Logo / Pays	Maturité	Faible	A confirmer	Forte	Commerciale
1er Volkswagen	 					
Malgré quelques brevets et un prototype de FCEV, le directeur de l'entreprise préfère aujourd'hui miser uniquement sur les véhicules à batterie. Aucun nouveau véhicule à hydrogène n'est prévu à court terme.						
2ème TOYOTA	 					
Avec 10 000 Mirai vendues depuis 2014, Toyota est aujourd'hui le constructeur le plus investi dans l'hydrogène. L'entreprise souhaite poursuivre dans cette voie avec le lancement de la Mirai II en 2020, pour servir le marché important du Japon mais également les autres pays ayant des plans de mobilité.						
3ème	  					
L'alliance s'appuie principalement sur les véhicules utilitaires de Renault avec extension de batterie (PAC fournie par Symbio) : les Kangoo Z.E. Hydrogen et Master Z.E. Hydrogen.						
4ème DAIMLER						
Le développement en 2018 de la GLC F-Cell place Mercedes dans la liste restreinte des entreprises ayant une voiture totalement hydrogène. Aucun autre modèle de FCEV n'est actuellement prévu.						
5ème	 					
Pas d'annonce particulière à ce jour.						
6ème	 					
Un des constructeur à la pointe au niveau technologique, avec un historique très fort dans l'hydrogène. Pas de véhicule développé pour le grand public actuellement mais des usages industriels et militaires.						
7ème HONDA						
Concurrent important de Toyota sur l'hydrogène. Suite au FCX Clarity de 2007, l'entreprise relance un nouveau véhicule haut de gamme Clarity Fuel Cell et prouve ainsi son intérêt fort dans l'hydrogène.						
8ème	 					
Le premier constructeur automobile Chinois propose déjà 3 modèles de véhicules hydrogène. Le positionnement de SAIC reflète les ambitions fortes du pays en matière d'hydrogène.						
9ème	 					
Pas d'annonce particulière à ce jour.						
10ème BMW GROUP	 					
Présentation récentes de prototypes fonctionnant à l'hydrogène, BMW prévoit de lancer une petite série de FCEV d'ici 2022 puis un vrai modèle pour 2025.						
12ème HYUNDAI KIA	  					
En collaboration avec Kia, Hyundai souhaite proposer à court terme des FCEV en grand nombre (700 000 par an en 2030). Fin 2019, Hyundai a annoncé que la Nexo s'était mieux vendue que la Mirai.						
13ème PSA GROUPE						
Suite au rachat d'Opel, PSA a développé un intérêt pour la technologie à hydrogène, notamment dans l'objectif de proposer des véhicules utilitaires. Les solutions seraient hybrides associées à des batteries. Un premier FCEV pourrait arriver en 2021.						



2. Les nouveaux usages de l'hydrogène : la mobilité

Les plans de déploiement de la mobilité hydrogène : analyse des principales politiques nationales

► Afin de promouvoir à l'échelle nationale le développement de l'hydrogène, de nombreux pays se sont dotés ces dernières années de « plans hydrogène ».

► Les motivations à l'origine des ces politiques de soutien à l'hydrogène sont diverses : la décarbonation de l'industrie ou des transports, la recherche d'indépendance énergétique, la gestion des surplus d'électricité, ou encore le développement d'une nouvelle industrie.

► Ces plans s'appuient notamment sur le déploiement d'une mobilité hydrogène, poussé conjointement par les pouvoirs publics et les industriels locaux.

Les objectifs français en matière de mobilité hydrogène pour 2023

5000 véhicules utilitaires légers

200 véhicules lourds

100 stations hydrogène



Californie

Dès 1999 le « California Fuel Cell Partnership » fixait des objectifs très ambitieux. La stratégie poursuivie est la création de clusters de stations autour des principales villes de l'état.

100 à 280 M€ par an sur les 10 dernières années



Allemagne

Le plan allemand lancé en 2006 est soutenu par des constructeurs fortement mobilisés. L'hydrogène en Allemagne se déploie principalement dans les Länder concernés par les ENR mais peu dans les autres.

250 M€ investis par l'état entre 2017 et 2023



Japon

Le Japon a créé en 2014 sa feuille de route pour l'H₂ et les piles à combustible. Le pays compte s'appuyer sur son industrie automobile en pointe sur l'H₂ et sur une forte visibilité durant les JO 2020.

1,5 Md\$ investis en R&D et subventions depuis 2014



Corée du Sud

La Corée du Sud a déployé un consortium liant gouvernement et entreprises privées afin de promouvoir la production de FCEV, de piles à combustibles, et de stations hydrogène uniformisées

2 Md€ publics et privés sur 5 ans



France

Le plan de déploiement de l'hydrogène en France créé en 2018 propose la création de stations et de véhicules (lourds et légers) en s'appuyant initialement sur des clusters pour assurer la couverture du territoire.

50 M€ par an pour financer des projets de mobilité et de production



Chine

Le développement des capacités H₂ du pays fait partie du plan « Made in China 2025 ». Le plan est fortement axé sur la production d'H₂ en parallèle de la mobilité pour lutter contre la pollution de l'air

17 Md\$ publics et privés d'ici 2023

Ces dernières années, plusieurs pays se sont lancés dans la mobilité hydrogène avec des plans ambitieux s'appuyant sur des consortiums d'industriels et constructeurs nationaux. Cette tendance reflète le potentiel de l'hydrogène dans la lutte contre les émissions de CO₂ et la pollution de l'air. Elle témoigne également de la prise de conscience des limites du véhicule à batterie.



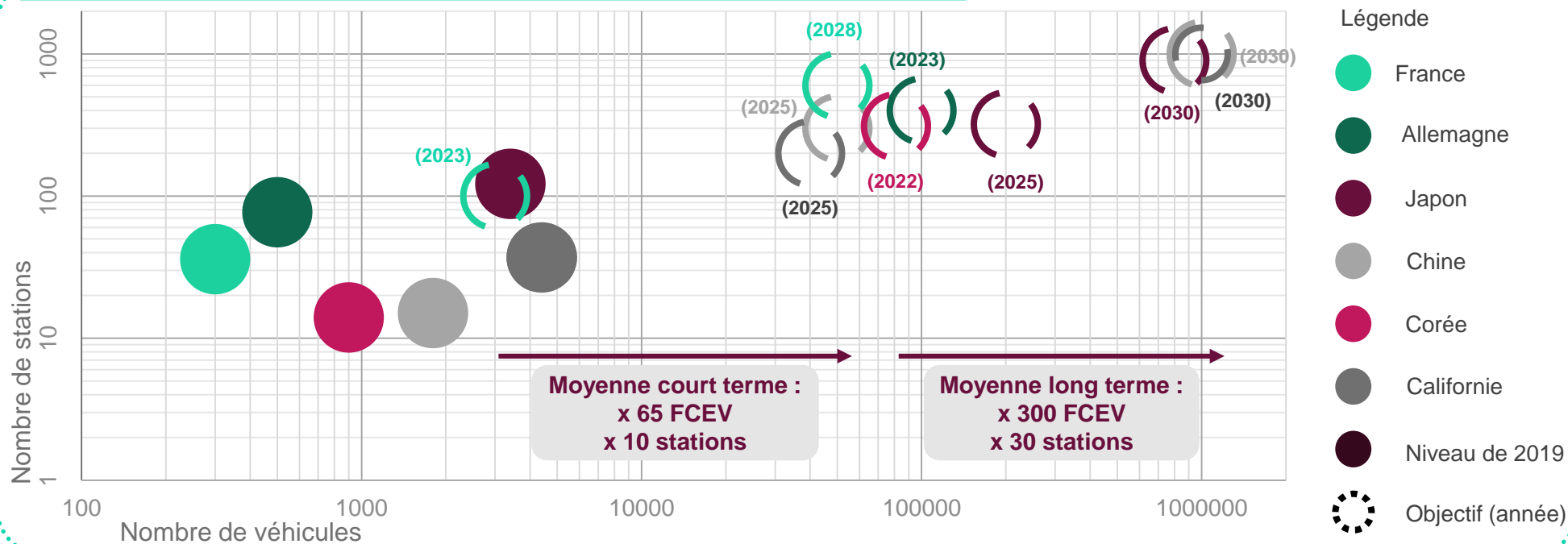
2. Les nouveaux usages de l'hydrogène : la mobilité

Les plans de déploiement de la mobilité hydrogène : analyse des objectifs à moyen et long terme

Malgré des ambitions fortes sur l'axe mobilité des plans de déploiement existants à ce jour, **les résultats fin 2019 paraissent encore trop modestes voire en retard pour atteindre les objectifs de court terme fixés** : en moyenne les plans nationaux ambitionnent à court terme de multiplier par 65 le nombre de véhicules en circulation et par 10 le nombre de stations.

En France, début 2020 :
330+ véhicules hydrogène en circulation
35 stations en opération

Comparatif des différents objectifs de déploiement de la mobilité routière hydrogène



La France dispose début 2020 d'un nombre de stations important en comparaison du nombre modeste de véhicules hydrogène en circulation. Les objectifs fixés marquent un faible niveau d'ambition comparativement à ceux retenus par d'autres pays : des objectifs 2023 en deçà du niveau de déploiement aujourd'hui atteint au Japon, et des objectifs 2028 de plusieurs ordres de grandeurs inférieurs aux ambitions japonaises, chinoises, californiennes.



2. Les nouveaux usages de l'hydrogène : la mobilité

Un engouement croissant pour l'hydrogène ferroviaire

Enjeux de l'hydrogène ferroviaire

- Différents types de trains cohabitent sur les réseaux : des locomotives diesel ou électriques, nécessitant des infrastructures spécifiques.
- Le train à hydrogène apparaît comme une **alternative aux trains électriques**. Son utilisation permet de **s'affranchir des coûts d'électrification des lignes** existantes.
- Plusieurs pays d'Europe travaillent sur la conversion de leur flotte de trains diesel vers des trains hydrogène pour 2025.

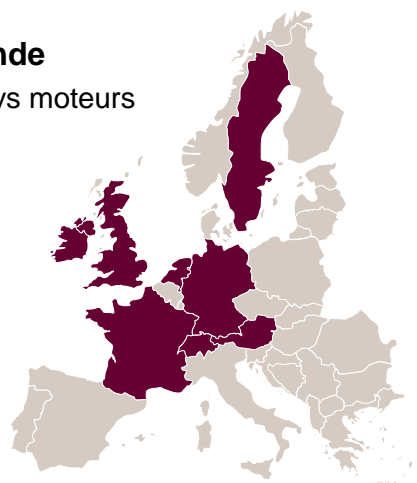
Tests | Déploiement

Chine	China Railway Rolling Corporation (CRRC) a mis son premier tram hydrogène en exploitation commerciale à Tangshan en 2017 (Autonomie de 40 kilomètres et vitesse max 70 km/h). 8 autres tramway d'une autonomie de 100 km ont été mis en circulation commerciale en 2018 à Foshan.
Allemagne	Le Coradia ILint d'Alstom est le premier train hydrogène à avoir atteint l'exploitation commerciale en 2018. Autonomie de 1000 km et vitesse de pointe de 140 km/h. 91 exemplaires commandés par 3 régions d'Allemagne seront mis en circulation d'ici 2025. En retard sur Alstom, Siemens travaille avec Ballard sur le prototype Mireo, qui devrait être testé en 2021. Sa vitesse maximale est de 160 km/h.
Pays-Bas	Les Pays-Bas vont tester le Coradia ILint au 1 ^{er} trimestre 2020, en vue de remplacer leur flotte de trains diesel sur les lignes non électrifiées.
Suède	La Suède a également annoncé son intention de tester le Coradia ILint en 2021.
France	Variante du ILint, le Régiolis Hydrogène peut être alimenté par caténaire sur les parties électrifiées du réseau français. Il embarquera moins d'hydrogène, plus de batteries, et pourra atteindre 160 km/h en pointe. 14 exemplaires commandés par la SNCF seront mis en circulation à partir de fin 2022.
UK	Pour pallier à la faible électrification de son réseau, le Royaume Uni travaille avec des constructeurs ferroviaires pour convertir 2500 trains diesel à l'hydrogène d'ici 2040. Les premiers trains Breeze d'Alstom devraient rentrer en service en 2022. Porterbrook travaille avec Ballard sur le train Hydroflex qui a été testé en 2019. Vivarail et Arcola Energy travaillent également sur un train qui sera testé en 2020.
Autriche	Pour éviter l'électrification de ses lignes, l'opérateur ZillertalBahn a commandé 5 trains hydrogène au constructeur suisse Stadler. Le prototype sera livré en 2020. Le constructeur suisse a également reçu une commande de la ville de San Bernardino (US) pour 2024.
Corée du Sud	Deux projets de trains hydrogène sont développés séparément en Corée du Sud. Hyundai Rotem devrait sortir en 2020 un prototype de tram de 200 km d'autonomie pouvant atteindre 70 km/h. Korea Railroad Research Institute travaille sur un train d'une autonomie de 600 km pouvant atteindre 110 km/h pour décembre 2022.
Japon	East Japan Railway Co. devrait sortir un prototype de train hydrogène pour 2021 et espère atteindre la commercialisation en 2024. Le train devrait avoir une autonomie de 100 km pour une vitesse maximale de 140 km/h.



Légende

■ Pays moteurs



Les essais concluants du train d'Alstom en Allemagne ont permis de placer l'hydrogène comme potentielle solution pour le remplacement des trains diesel. Alstom bénéficie d'un positionnement favorable qui lui ont déjà valu plusieurs commandes. Le constructeur est en concurrence avec d'autres entreprises européennes et asiatiques qui attendent des résultats dès 2020.



2. Les nouveaux usages de l'hydrogène : la mobilité

Transport maritime et aérien : de nouvelles pistes pour la mobilité hydrogène



Transport Maritime

Maturité

- Plusieurs prototypes opérationnels
- Multiplication des projets

Enjeux

- Le transport maritime est une **source de pollution importante**. Des contraintes environnementales fortes ont été instaurées ces dernières années pour **limiter ses émissions de soufre**.
- De plus en plus de navires fonctionnent au gaz naturel, moins polluant, mais l'hydrogène présentera une autre alternative face à ces enjeux.

Initiatives et acteurs



Mis à flot en 2017, l'Energy Observer est un catamaran propulsé par une pile à combustible de 20 kW. Il produit de l'hydrogène à partir d'eau de mer dessalée et d'énergie solaire et éolienne. A travers son tour du monde, il remplit une mission de sensibilisation sur la navigation hydrogène.



En avril 2018 Symbio et l'opérateur de transport nantais Semitan ont mis en service une navette fluviale à hydrogène « Navibus » capable de transporter 25 passagers grâce à 2 PAC de 5 kW.



Lancé en 2019, le projet européen H2SHIPS a pour but de démontrer la viabilité économique de l'avitaillement et de la propulsion hydrogène dans le transport maritime. Le projet prévoit la construction d'une station de recharge pilote et la mise au point d'un navire hydrogène. La seconde phase ambitieuse de faire naviguer des péniches hydrogène pour le transport de déchets sur la Seine en 2022.



Transport Aérien

- Plusieurs initiatives lancées

- Le transport aérien est responsable d'environ **3% des émissions mondiales de CO₂**, et présente une **croissance importante** (le trafic aérien devrait tripler d'ici 2050).
- Le **besoin en carburants décarbonés** est donc de plus en plus important et pourrait profiter aux technologies hydrogène.



HY4 est un prototype d'avion de tourisme propulsé par une pile à combustible fabriquée par Hydrogenics. Testé en 2016, il peut embarquer 4 passagers et est destiné à devenir un avion-taxi sur des vols court courrier.



Alaka'i travaille sur un prototype de drone-taxi 6 places à 6 rotors alimentés par des PAC. Le constructeur annonce une autonomie de 600 km et une vitesse maximale de 190 km/h.



HES Energy System a dévoilé en octobre 2018 son projet d'avion 4 places électrique à hydrogène pour 2025.



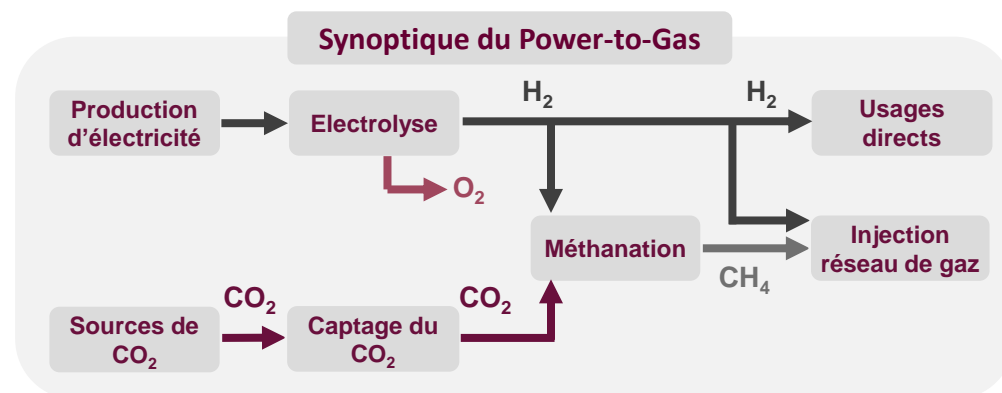
Le projet Hycarus vise à démontrer le potentiel de l'hydrogène et des piles à combustibles pour répondre aux besoins auxiliaires (hors propulsion) des avions de ligne afin de réduire leur consommation de carburant.

Moins avancé que pour le ferroviaire, le déploiement de l'hydrogène dans le transport maritime et fluvial se dessine, notamment grâce au soutien financier de l'Union Européenne qui permet à de nombreux acteurs français de se positionner sur ce marché. Dans l'aérien, l'hydrogène est envisagé de manière plus prospective comme carburant pour des vols très courts ou comme énergie auxiliaire.



2. Les nouveaux usages de l'hydrogène : les services réseaux

Les électrolyseurs au service de la stabilité des réseaux électriques



Chiffres clés

1 à 10 MW

Objectif de capacité d'électrolyse installée en 2023 fixé dans le projet de PPE 2019 - 2028

10 à 100 MW

Objectif de capacité d'électrolyse installée en 2028 fixé dans le projet de PPE 2019 - 2028

2030 - 2035

Horizon temporel au-delà duquel les électrolyseurs pourraient participer à l'équilibre du réseau électrique en France¹

Concept, Atouts & Obstacles

Concept

Le Power-to-Gas consiste à **produire de l'hydrogène par électrolyse** en utilisant de l'électricité souvent d'origine renouvelable. L'objectif est de produire en **période de faible demande** et de **surplus de production** pour profiter d'un prix faible de l'électricité et rendre service au réseau électrique en réduisant le **déséquilibre offre/demande**.

Atouts

L'hydrogène ainsi produit peut être **injecté dans les réseaux** de distribution et de transport de gaz naturel. L'injection directe d'hydrogène est tolérée dans des **proportions limitées** (en dessous de 6% en France) mais celui-ci peut également être transformé en **méthane de synthèse** (gaz naturel) par un procédé chimique appelé **méthanation**. L'hydrogène produit peut également être utilisé directement dans l'industrie ou comme carburant pour de la mobilité verte.

Obstacles

Au-delà du **coût** des électrolyseurs qui doit être baissé, notamment pour les petites unités raccordées au réseau de distribution, c'est la **réactivité** des électrolyseurs pour **répondre rapidement aux besoins du réseau électrique** qui doit être grandement améliorée. Par ailleurs, dans le cas d'un couplage au réseau de gaz, l'**injection** doit être maîtrisée (impacts sur les réseaux, impacts sur les usages aval....).

Éléments de contexte du Power-to-Gas

Intermittence de la production des EnR



Variabilité de la demande



Instabilité des réseaux électriques



Besoin en flexibilité



Solutions de stockage



Maîtrise de la demande d'énergie



Investissements évités dans les réseaux

L'intégration massive des énergies renouvelables et l'évolution des usages contraignent la gestion des réseaux d'électricité et génèrent un **besoin grandissant en solutions de stockage de courtes et de longues durées**.

L'intégration massive des énergies renouvelables intermittentes et l'évolution des usages contraignent la gestion des réseaux d'électricité et génèrent un besoin grandissant en solutions de stockage de courtes et de longues durées. Le Power-to-Gas apporte une solution pour la gestion des surplus de production de grandes quantités et sur de longues durées.



2. Les nouveaux usages de l'hydrogène : les services réseaux

Les électrolyseurs au service de la stabilité des réseaux électriques

Intérêts du Power-to-Gas



Stocker les excédents de production des énergies renouvelables intermittentes sur une longue durée



Apporter des solutions de flexibilité au réseau via de nouveaux services (agrégateurs)



Eviter les lourds investissements réseau en favorisant l'intégration des EnR

Acteurs du Power-to-Gas



Constructeurs d'électrolyseurs

Les producteurs d'électrolyseurs mettent en avant un service supplémentaire qui viendrait **baissé les coûts de production de l'hydrogène.**



GRT & GRD

Les gestionnaires des réseaux de transport et de distribution peuvent tirer profit de la flexibilité des électrolyseurs pour **délester et réguler leurs réseaux.** Le Power-to-Gas se présente également comme un moyen de **verdier le contenu des réseaux de gaz.**

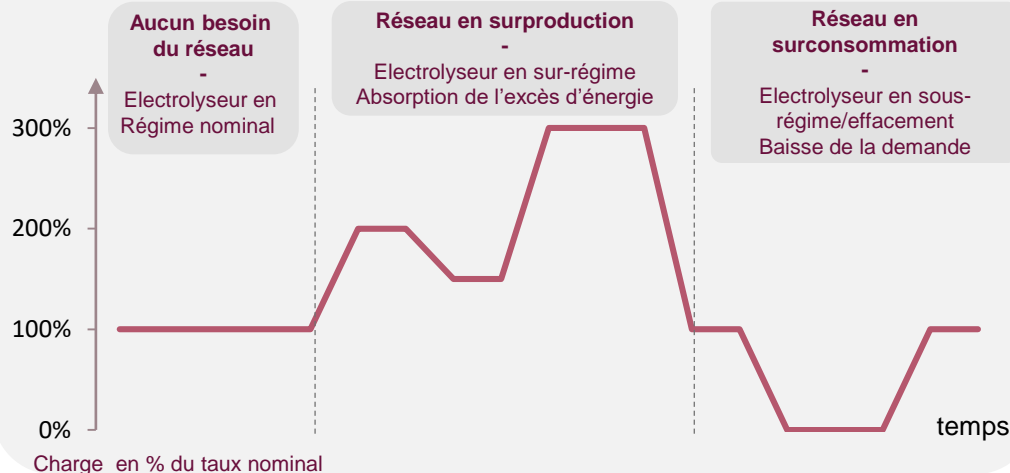


Agrégateurs

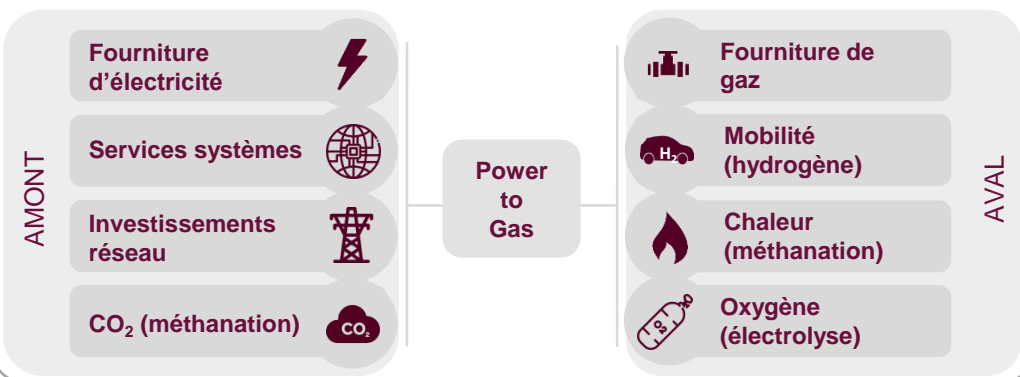
Le Power-to-Gas se présente comme une solution à destination de l'**agrégateur de flexibilité** pour piloter la production décentralisée des énergies renouvelables et ainsi coordonner au mieux les effacements de consommation.



Principe de fonctionnement d'un électrolyseur en soutien au réseau



Marchés potentiels pour la valorisation du Power-to-Gas



Le pilotage en soutirage des électrolyseurs est un outil de flexibilité de forte valeur pour le maintien de l'équilibre du réseau électrique, dans un contexte d'intégration massive des énergies renouvelables intermittentes. L'utilisation des électrolyseurs en soutien aux réseaux électriques pourrait à terme offrir à leurs exploitants un complément de rémunération et ainsi améliorer leurs modèles de rentabilité. Néanmoins, le déploiement français du Power-to-Gas n'est pas envisagé avant 2035.

2. Les nouveaux usages de l'hydrogène

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 et de chaleur**. 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%.
Coût 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. Coût 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%.
Coût compris entre 3 000 et 4 000 USD/kW.

AISIN



Le marché des piles à combustible pour des applications stationnaires est déjà établi dans plusieurs régions du 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 se confirme déjà en Allemagne et au Japon, pays affichant des objectifs ambitieux.



2. Les nouveaux usages de l'hydrogène

L'hydrogène au service des usages nomades et de la petite mobilité

Chiffres clés

1 semaine	Autonomie d'un smartphone équipé d'une micro PAC
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.



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



L'hydrogène est également utilisé dans les transports légers : Pragma Industries commercialise déjà un vélo hydrogène, Honda travaille sur une moto hydrogène et le fabricant de bornes Ataway propose des bornes de recharge pour ces solutions.



Les PAC mobiles gagnent progressivement en performance et avancent 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.

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

A retenir : des secteurs multiples, porteurs à des horizons différents mais tous dans une dynamique de croissance

Les applications industrielles expérimentent l'hydrogène comme levier de décarbonation

- Dans l'industrie, l'hydrogène est progressivement vu comme un **levier de décarbonation des procédés**.
- Les **projets d'expérimentation** de nouvelles voies d'intégration d'hydrogène décarboné ou de valorisation d'hydrogène fatal dans les chaînes de production se sont ainsi **multipliés ces dernières années**.

Les technologies hydrogène pour la mobilité sont de plus en plus matures et gagnent de nouveaux secteurs.

- **L'hydrogène progresse dans tous les secteurs de la mobilité** : dans le secteur routier, le nombre de modèles hydrogène commercialisés continue d'augmenter et les collectivités s'intéressent au déploiement de lignes de bus à hydrogène. Dans le ferroviaire, l'hydrogène se présente comme une solution pour le remplacement du parc de locomotives diesel européen, et le maritime/fluvial et l'aérien continuent de multiplier les projets de démonstration.
- Les défis majeurs restent la baisse des coûts des véhicules hydrogène et le **déploiement d'un réseau de distribution et de ravitaillement**.

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.

- 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**.
- La **régulation en fréquence** pourrait permettre de **rentabiliser la production de l'hydrogène** par la vente d'un service.

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 visent à concurrencer les batteries.

3

La structuration du marché et des acteurs en France

3. La structuration du marché et des acteurs

Un réseau dense de start-ups et PME* positionnées sur les nouveaux marchés de l'hydrogène

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.



La dynamique ne faiblit pas : en 2019, de nouvelles sociétés spécialisées en hydrogène ont vu le jour. Au total, plus de 50 entreprises spécialisées sont présentes sur la chaîne de valeur hydrogène en France.

Date de création	2002	2006	2010	2014	2018	2019
Production H ₂ Equipementiers technologiques		 Driving clean energy forward	 L'Hydrogène Vert	 AREVA H ₂ Gen (1)	 H ₂ V HAFFNER energy	 Premier Element
Applications stationnaires et mobiles	 AREVA Stockage d'Energie Helion (2) By AREVA		 Hydrogen Canister	 ANYTIME, ANYWHERE, ENERGY alcris	 POWER IN ALL MERIDIANS H ₂ SYS Hydrogen to system	 Prenez le pouvoir sur votre énergie
Mobilité hydrogène		 The fuel cell company	 A TALYSEA MICHELIN HYDROGEN COMPANY	 hype		
Power to Gas Services/opération réseau		 INNOVATIVE ENGINEERING	 HYDROGENE DE FRANCE		 Élaborer les énergies durables	

L'intérêt croissant pour l'hydrogène-énergie et ses applications, aussi bien en matière de mobilité que de production et stockage, se traduit par l'arrivée de nombreuses start-up innovantes. Cette dynamique s'est poursuivie en 2019 avec l'arrivée de nouvelles sociétés spécialisées notamment dans la production d'hydrogène décarboné.

Nota : Sociétés présentées en fonction de leur domaine principal d'expertise bien que leurs activités puissent être transverses. Les filiales intégrées et business units spécialisées des grands industriels et énergéticiens français ne sont pas représentées sur cette cartographie des start-ups et PME spécialisées.

1) CETH₂, créée en 1997, est devenue Areva H₂Gen suite à l'entrée au capital d'Areva et de l'ADEME en 2014
2) AREVA Stockage d'Energie commercialise ses produits et services sous la marque HELION

3. La structuration du marché et des acteurs

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

	Groupe	Description	Marchés
Industriels	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) et les PAC.	
	ALSTOM	Alstom se positionne sur le marché de la mobilité ferroviaire à hydrogène avec le développement de trains à hydrogène.	
	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.	
Énergétiques	TOTAL	Total s'implique dans la recherche sur l'hydrogène comme carburant, a investi dans le fabricant d'électrolyseurs Sunfire pour produire de l'H ₂ vert et met en place des stations service hydrogène.	
	EDF	EDF se positionne sur les marchés de l'hydrogène, via un partenariat et une participation de 16M€ dans le fabricant d'électrolyseurs McPhy, et via la création sa nouvelle filiale Hynamics en 2019.	
	ENGIE	ENGIE a lancé une filiale spécifique hydrogène en 2018. Le groupe dispose de compétences sur toute la chaîne de valeur H ₂ (génération d'hydrogène vert, mobilité, industrie, stockage d'énergie...).	
	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.	
	AREVA	La nouvelle structure issue d'Areva conserve les filiales spécialisées dans les technologies de stockage d'hydrogène et d'électrolyse : AREVA H ₂ Gen et AREVA Stockage d'Énergie (Helion).	
	RENAULT	Renault a annoncé la commercialisation de deux modèles d'utilitaires hydrogène conçus en partenariat avec Symbio pour l'année 2020.	
	faurecia	Faurecia développe des réservoirs à hydrogène en collaboration avec Stelia Aerospace et via sa participation dans ad-Venta, et commercialise des piles à combustible en collaboration avec le CEA.	
Equip. Auto et constructeurs	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.	
Légende	Stations de ravitaillement H ₂	Production d'H ₂ par électrolyse	Power-to-Gas
	Distribution d'H ₂ (camion, pipeline)	Stockage d'H ₂	Applications stationnaires

Les industriels historiques du secteur, mais aussi les énergétiques et industriels du transport multiplient les initiatives de développement du marché de l'hydrogène, en apportant des solutions innovantes dans les nouveaux usages de l'hydrogène (mobilité, services réseaux), le stockage et la production décarbonée d'hydrogène.

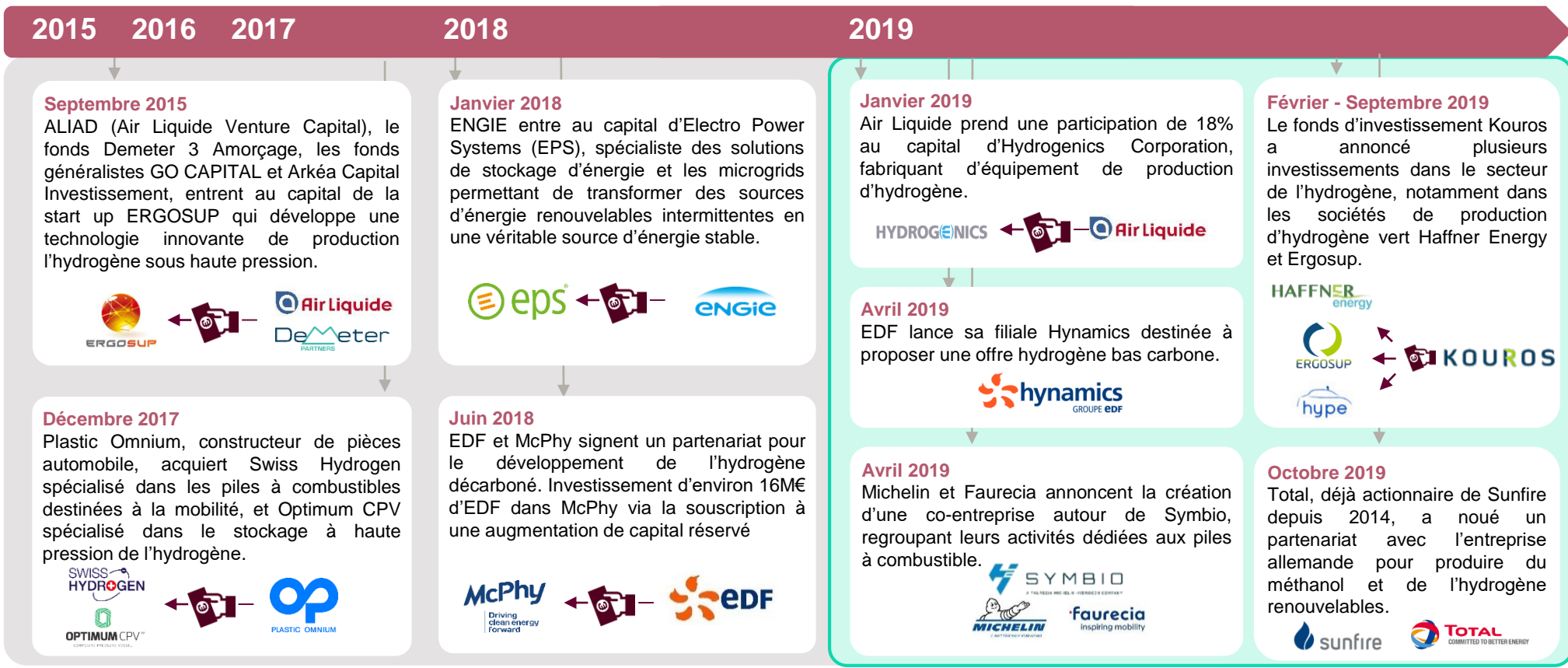
3. La structuration du marché et des acteurs

Filière « hydrogène-énergie » : un intérêt croissant de la part des industriels et des investisseurs

Les industriels et énergéticiens se positionnent depuis une dizaine d'années à travers des prises de participation dans les entreprises pionnières du secteur.



En 2019, l'intérêt pour l'hydrogène énergie s'est davantage affirmé : les investissements financiers se poursuivent et plusieurs grands groupes industriels français se sont dotés d'une filiale dédiée à l'hydrogène.



En 2019, les partenariats et rapprochements financiers entre les industriels et énergéticiens historiques français et les pure players de la filière hydrogène se sont poursuivis. Certains grands groupes intègrent désormais une filiale dédiée à l'hydrogène.

3. La structuration du marché et des acteurs

Les acteurs publics catalysent le développement de la nouvelle filière hydrogène

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.

ADEME



Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie



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 H₂, animent la filière industrielle et la représentent auprès des pouvoirs publics.
- Elles proposent des évolutions réglementaires, réalisent des études et accompagnent les projets.



Pôles de compétitivité

- Ils participent au développement des technologies hydrogène-énergie.
- Ils organisent des ateliers autour des technologies et projets H₂ 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 et est membre du cluster Tenerrdis

Le projet DINAMHySE du Pôle Véhicule du Futur vise à développer une filière industrielle hydrogène en région Grand Est en valorisant les projets R&D.

Des clusters de recherche impliquant PME, laboratoires publics, et grands 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 locales) fédèrent les acteurs et apportent leur expertise pour un soutien actif de la filière.

3. La structuration du marché et des acteurs

A retenir : de la filière industrielle historique à l'émergence des futurs marchés de l'hydrogène

La filière hydrogène, une industrie plus que centenaire

- La **filière historique de l'hydrogène** se développe à partir du début du XXème siècle.
- Elle se structure alors autour de la **production d'hydrogène industriel**, la **distribution** et enfin la **consommation à travers les industries chimiques et pétrolières**.
- La France dispose de compétences fortes au sein de la filière historique, grâce à la présence de grands groupes français : **Air Liquide** dynamise **l'ensemble de la filière industrielle historique** de par son expertise, sa capacité d'investissement en R&D et sa proximité forte avec le tissu industriel.

Les années 2000 marquent l'émergence de la nouvelle filière 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**.
- A partir du milieu des années 2000, un réseau de **PME innovantes** émerge pour développer les **nouvelles applications de l'hydrogène** : mobilité, 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** dans les PME spécialisées dans les nouvelles applications de l'hydrogène-énergie, plusieurs groupes ont même lancé ces dernières années une filiale dédiée à l'hydrogène, marquant ainsi une accélération de la dynamique.

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 lesquelles investissent les grands groupes industriels**.
- 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.

4

Stratégies et défis de la filière hydrogène-énergie

4. Stratégies et défis de la filière hydrogène-énergie

La structuration de la filière sur le plan international

Au niveau mondial, la filière se structure par l'intermédiaire d'organismes internationaux publics et privés. Ils rassemblent les principaux acteurs industriels et territoriaux afin de partager des connaissances, établir des standards et promouvoir l'hydrogène auprès des décideurs politiques.

Les organismes clés de la filière H2

Hydrogen Council



L'initiative lancée à Davos en **2017** regroupe une cinquantaine de CEO d'entreprises leaders dans l'Energie et les Transports. Elle agit pour favoriser les investissements et encourager les décideurs à soutenir le secteur de l'hydrogène.



En Europe, ce partenariat public privé est l'un des organismes les plus structurants pour la filière. Son objectif est d'encourager la R&D dans le domaine de l'hydrogène. Il veille également à la coordination des pratiques et des standards de la filière. **Son budget de 1,33 Md€ pour la phase 2014-2020 lui a permis d'encadrer plus de 200 projets.**



L'association européenne de l'Hydrogène et des piles à combustibles a pour mission d'aider au partage des connaissances et d'être le porte parole de la filière au niveau européen.

Plus de 200 membres (industriels, laboratoires et syndicats)



HyER est un réseau visant à informer, à aider et à représenter des régions et des villes européennes actives dans le domaine de l'hydrogène. Créé en **2006**, regroupe **20 régions d'Europe**.



Homologue américain d'Hydrogen Europe créé en 2010, sa mission principale est d'être le porte parole de la filière sur la régulation et la mise en place de standards aux Etats-Unis.

Plus de 30 membres (entreprises internationales)

Exemples de projets européens soutenus par le FCH-JU

3EMOTION

Projet de démonstration pour déployer une trentaine de bus à hydrogène ainsi que des infrastructures de ravitaillement dans 5 villes européennes.

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



Hydrogen Mobility Europe 1 & 2

Projet de démonstration pour déployer 1400 véhicules électriques à prolongateur d'autonomie H2 et près de 50 stations de ravitaillement dans 10 pays.

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



CertifHy

Projet de création d'un système de garanties d'origine européen pour le marché de l'hydrogène. En 2019, 4 producteurs ont émis 76 000 certificats. Près de 80 membres industriels et institutionnels.



HyLaw (2017-2018)

Projet visant à lever les barrières légales au déploiement des PAC et des applications de l'hydrogène. Implique 23 acteurs publics dans 18 pays de l'UE.



JIVE 1 JIVE 2 MEHRLIN

Projets de déploiement de flottes de bus hydrogène dans une vingtaine de villes européennes.

Co-Financé à hauteur de 63 M€ par le FCH-JU, 23 partenaires de 9 pays européens



La filière hydrogène se structure également sur le plan international grâce à des initiatives et des projets qui permettent aux principaux acteurs industriels, académiques et territoriaux de se coordonner. Au niveau mondial, des organismes et associations régionales jouent un rôle essentiel dans la construction, l'harmonisation et le développement de la filière auprès des décideurs.

4. Stratégies et défis de la filière hydrogène-énergie

La structuration de la filière en France est impulsée par les territoires



Hauts de France

- **Feuille de route hydrogène (janvier 2020) : l'hydrogène décarbonné est l'une des 10 priorités de la région.** Aucun budget communiqué.

- **Polénergie (ex Energie 2020) : le pôle de compétitivité de la région a mis en place un groupe de travail hydrogène.**



Ile de France

- **Enveloppe spécifique de 2,5 M€ proposée pour le budget 2020**

- **Délibération « Ile de France Territoire Hydrogène » voté en novembre 2019 : fait de l'hydrogène une priorité et lance un club francilien de l'hydrogène.**

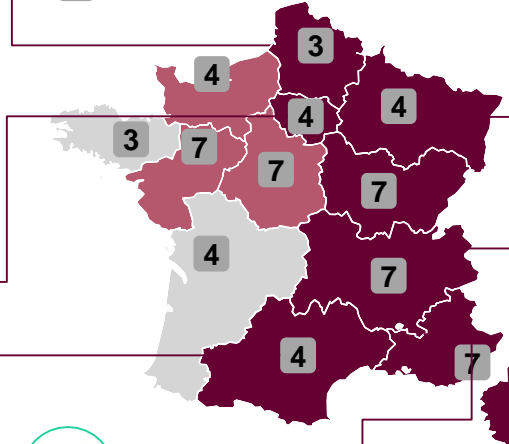


Occitanie

- **Plan hydrogène vert : 150 M€ pour 2019-2030, prévoyant la réalisation de 20 stations de production/distribution d'H2 vert, l'acquisition de 600 véhicules et la construction d'une usine de production d'hydrogène avant 2024.**

Légende

- Régions très investies
- Régions actives
- 2 Projets actifs identifiés



Grand Est & Bourgogne Franche Comté

- **Pôle véhicule du Futur : pôle de compétitivité des deux région**

- **Projet DYNAMHySE : vise à la création d'une filière industrielle d'hydrogène en région Grand Est (Budget inconnu)**

- **Lancement du club Hydrogène Grand Est en 2019**

- **Lancement du club Hydrogène Franche Comté en avril 2020**



Solutions pour véhicules & mobilité du futur



PACA

- **Enveloppe de 5 M€ débloquée en 2019 pour structurer la filière**

- **Pôle de compétitivité Capenergies : très actif sur les sujets hydrogène, a vu émerger une vingtaine de projets hydrogène entre 2016 et 2019**

- **Club Hydrogène PACA : lancé en 2018 par Capenergies, regroupe plus de 50 entreprises, laboratoires et institutions.**



Auvergne-Rhône-Alpes

- **Investissement de 8 M€ de la région dans le projet de déploiement du réseau de mobilité hydrogène Zero Emission Valley**

- **Pôle de compétitivité Tenerdis : compte 83 adhérents dans la filière H2, 64 projets H2 et annonce 210 M€ de budget global pour l'hydrogène**



De nombreuses régions accompagnent le développement de la filière hydrogène en lançant leurs « plans hydrogène » et en s'impliquant dans des projets industriels. En 2019, de nombreux clubs hydrogène ont émergé des pôles de compétitivité déjà existants pour proposer des réseaux de structuration de la filière à l'échelle régionale.

4. Stratégies et défis de la filière hydrogène-énergie

Les territoires se mobilisent sur des projets hydrogène pour développer la filière (1/2)

Hauts de France

Projet GRHYD (2014 – 2019)

Plateforme de démonstration Power-to-Gas et flotte de bus au gaz naturel dopé à l'hydrogène (Hythane®).
Budget de 15,4 M€ (dont 4,5 M€ de l'ADEME)



Projet H2V59 (2016-2023)

Projet de création d'une usine de production d'hydrogène vert (électrolyse de l'eau à partir d'électricité d'origine renouvelable). Annonce une production de 28 kt d'H2 par an.
Projet en attente de financement (investissement : 250 M€)



Normandie

Projet EAS-HYMOB (2016 – 2018)

Projet visant la mise en place d'un réseau de 15 stations de recharge hydrogène publiques associées à des flottes de véhicules— première station installée à Rouen en 2017
Co-financé à 70% par la Commission Européenne



Projet 3EMOTION (2015 – 2019)

Projet européen visant à déployer 21 bus propulsés par un système dihydrogène-pie à combustible, dont 5 pour la ville de Cherbourg.
Financé par le FCH-JU



Centre-Val de Loire

Projet Méthycentre (2018 – 2023)

Projet de démonstration de Power-to-Gas couplé à une unité de méthanisation afin de développer une offre technologique et commerciale portée par Storengy.
Budget de 10,5M€



Auvergne Rhône-Alpes

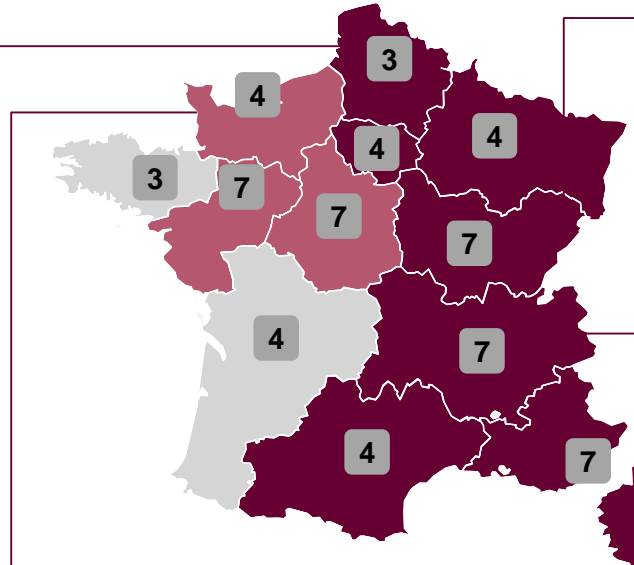
Projet HyWAY (2014 – 2019)

Développement d'une flotte de véhicule électrique avec prolongateur d'autonomie
Phase 1 (2014-17) : Mise en place d'une flotte de 50 véhicule et conception d'une station h2
Phase 2 (2016-19) : Développement des flottes et conception des stations dans les agglomérations lyonnaises et grenobloises



Projet Zero Emission Valley (2018 – 2028)

Déploiement de 1 000 voitures à PAC, 20 stations de recharge à hydrogène et 15 électrolyseurs pour produire de l'hydrogène sans émission de CO2 dans les métropoles d'Auvergne-Rhône-Alpes.
Budget de 70M€ dont 10M€ de fonds européens



Légende

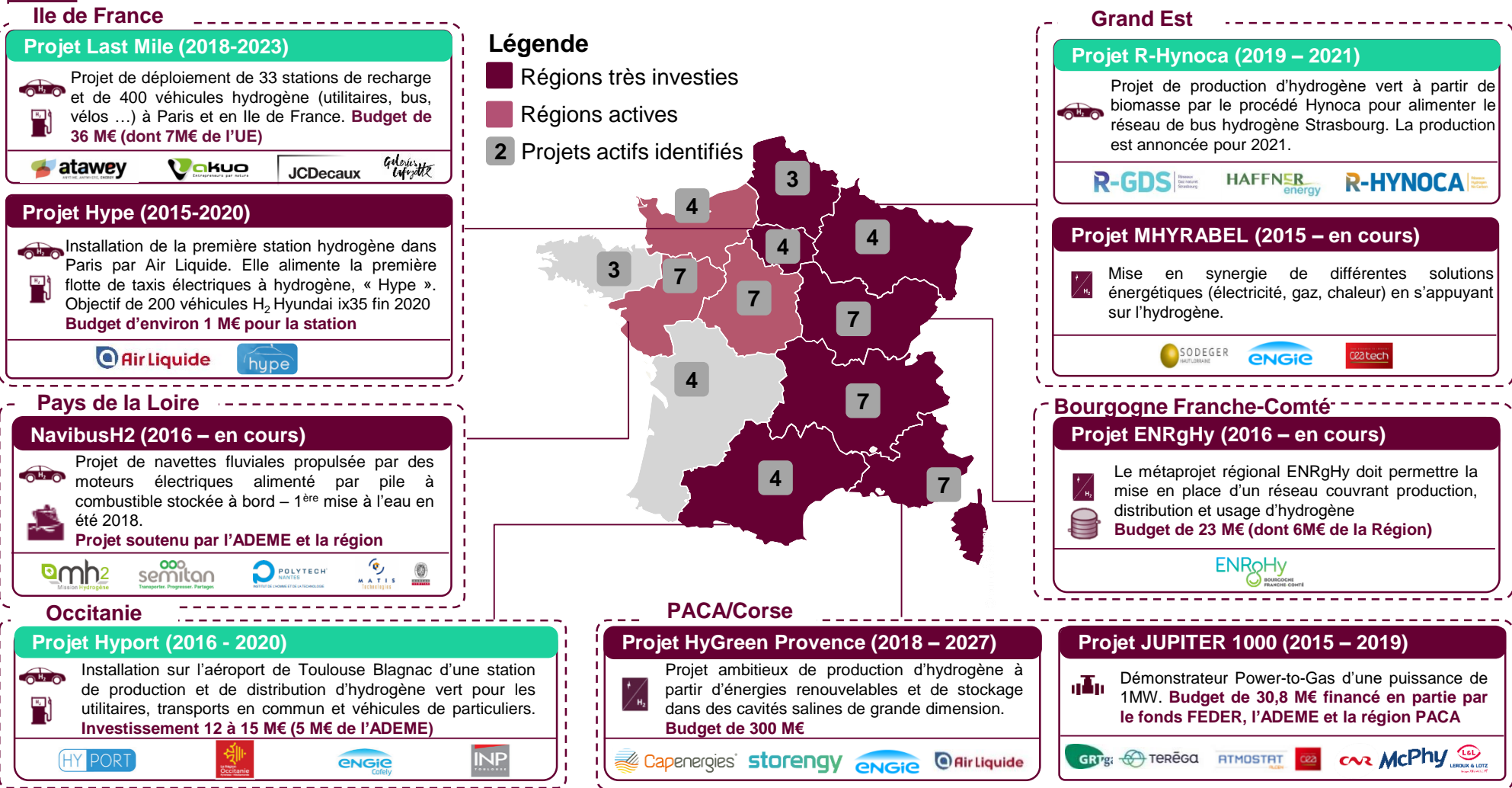
- Régions très investies
- Régions actives
- 2 Projets actifs identifiés



En 2019 plus d'une vingtaine de nouveaux projets ont été lancés ou annoncés, portés par les appels à projets du Plan Hydrogène. De nombreux projets sont également encouragés par l'émergence des plans hydrogènes des régions.

4. Stratégies et défis de la filière hydrogène-énergie

Les territoires se mobilisent sur des projets hydrogène pour développer la filière (2/2)

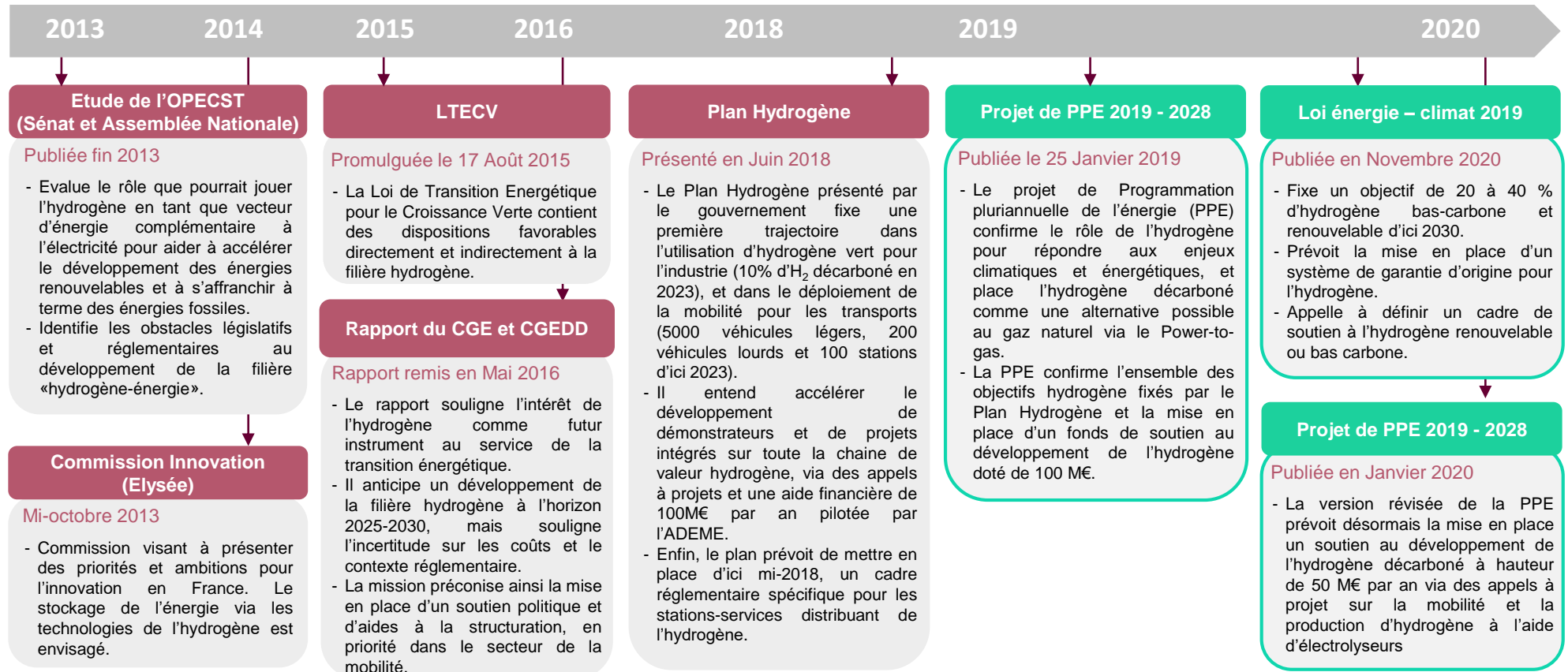


Les territoires contribuent au développement de projets de démonstration à travers des pôles de compétitivités et des plateformes de recherche. L'implication forte des territoires laisse espérer une implémentation fluide des stratégies hydrogène nationales.

4. 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 dépend de l'engagement des pouvoirs publics, et de la stratégie mise en œuvre pour soutenir son développement. Cette stratégie nationale, initiée en 2018 par le Plan Hydrogène, s'est précisée en 2019 à travers la PPE 2019-2028 et la loi Energie-Climat 2019 qui fixent les objectifs à horizon 2030 et les moyens financiers associés.






4. Stratégies et défis de la filière hydrogène-énergie

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

Le gouvernement 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
Stratégie d'amorçage	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 ₂ 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.
Principales mesures	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Objectif de production d'hydrogène décarboné pour l'industrie de 10% en 2023 puis 20 à 40% en 2028. ▪ Mise en place en 2020 d'un système de traçabilité sur l'origine de l'hydrogène. ▪ Aides à l'investissement pour l'acquisition d'électrolyseurs 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Mise en place d'ici mi-2018 d'un cadre spécifique pour les stations services distribuant de l'hydrogène. ▪ Aides à la mise en place de projets territoriaux en matière de mobilité : aides à l'acquisition de véhicules professionnels ou destinés au transport collectif. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Identification par RTE et ENEDIS de la valorisation des services rendus au réseau par les électrolyseurs. ▪ Identification par les transporteurs et distributeurs de gaz des conditions acceptables d'injection d'hydrogène pour les réseaux, les installations et les usages. ▪ Aides pour des projets hybrides, associant plusieurs usages de l'hydrogène, dans des ZNI.
<p>100 M€ de subventions annoncés pour l'année 2019, pour des projets sélectionnés sur la base de plusieurs appels à projets (cf page suivante)</p>			

Les mesures et objectifs du « Plan Hydrogène », annoncés en 2018, promettaient d'initier une stratégie nationale de développement de l'hydrogène-énergie. Un an et demi après son lancement, quel bilan peut-on tirer du Plan Hydrogène ?



4. Stratégies et défis de la filière hydrogène-énergie

Un an et demi après son lancement, quel bilan du Plan Hydrogène ? (1/2)

2 appels à projets plébiscités par les collectivités et industriels français

Ecosystèmes de mobilité hydrogène



1^{er} volet de l'AAP
clos en janvier 2019

2nd volet de l'AAP clos
en octobre 2019



- Déployer des écosystèmes territoriaux de mobilité hydrogène, sur la base du déploiement de flottes de véhicules professionnels.
- Accompagner le développement d'une gamme de véhicules lourds (routiers ou maritimes, ferroviaires, aéronautiques).



20 projets sélectionnés



80 M€ de financements

Production et fourniture d'H₂ décarboné pour des consommateurs industriels



AAP clos en
juin 2019



- Réduire les impacts d'usages industriels d'hydrogène carboné en s'inscrivant dans une trajectoire de transition écologique et énergétique.
- Accompagner une démarche de compétitivité de la filière industrielle.



5 projets sélectionnés



11,5 M€ de financements

Industriels



Acteurs territoriaux



2 projets de valorisation
d'hydrogène fatal



3 projets de production
d'H₂ par électrolyse



Sur les deux appels à projets, un positionnement fort des collectivités locales, syndicats territoriaux de transports et d'énergie et des industriels français : fabricants de véhicules, d'électrolyseurs, de piles à hydrogène, exploitants de services

Les appels à projets lancés et pilotés par l'ADEME en 2019 ont été plébiscités par les acteurs français de la filière, et permettent de maintenir la dynamique de projets initiée en 2016 par l'appel à projets « Territoires Hydrogène ». Néanmoins, les 100m€ de financements promis par le Plan Hydrogène n'ont pas été atteints.



4. Stratégies et défis de la filière hydrogène-énergie

Un an et demi après son lancement, quel bilan du Plan Hydrogène ? (2/2)

Un engagement politique renforcé via la mise en place de deux Engagements pour la Croissance Verte (ECV)



Les engagements pour la croissance verte (ECV) sont des groupes de travail réunissant l'Etat et les porteurs de projets privés visant à aboutir à des engagements réciproques. Complémentaires des aides financières de l'État, les ECV visent à lever les freins réglementaires identifiés par les acteurs économiques.

Deux ECV ont été créés en mai 2019 sur les sujets hydrogène, l'un portant sur les **usages industriels**, l'autre sur la **mobilité**. D'autres ECV devraient voir le jour, notamment sur les **systèmes et réseaux énergétiques** et sur l'hydrogène dans le **maritime et le fluvial**.

Engagements ECV « Industrie »

Industriels

- Décarboner les usages industriels d'H₂
- Produire du méthane de synthèse ou des e-fuels à partir d'H₂
- Se positionner sur les marchés diffus pour dynamiser la filière française d'électrolyse

Etat

- Valoriser l'H₂ décarboné
- Clarifier la réglementation pour la fabrication et le transport d'H₂ industriel



ECV « Hydrogène dans la mobilité routière »

Industriels

- Atteindre les objectifs fixés dans le Plan Hydrogène (nombre de véhicules et stations H₂) au travers d'écosystèmes territoriaux

Etat

- Mettre en place les actions législatives et réglementaires pour faciliter le déploiement des infrastructures et des véhicules hydrogène.



Des avancées vers le déploiement d'infrastructures compatibles avec les nouveaux usages de l'hydrogène



Stations hydrogène

- L'arrêté du 24 octobre 2018 fixe les prescriptions générales applicables aux installations de distribution d'hydrogène.
- Il permet aux acteurs de la filière (collectivités, gestionnaires de flottes et exploitants de stations), de disposer d'un cadre réglementaire précis.



Injection d'hydrogène dans les réseaux de gaz

- Dans le cadre du Plan Hydrogène de 2018, neuf opérateurs gaziers ont présenté en novembre 2019 leur rapport sur les conditions d'injection d'hydrogène dans les réseaux.
- Les réseaux de gaz pourraient intégrer à **court terme et à moindre coût 6% d'hydrogène**, puis **10% à horizon 2030** et **jusqu'à 20% après 2030**. Au-delà de 20%, les coûts d'adaptation des réseaux et équipements deviendraient trop importants.

Les mesures de court terme du Plan Hydrogène ont été pour la plupart mises en œuvre. L'atteinte des objectifs de long terme de décarbonation de l'hydrogène et de développement des nouveaux usages nécessitera cependant l'instauration de nouveaux mécanismes ambitieux de soutien public.



4. Stratégies et défis de la filière hydrogène-énergie

Les soutiens publics et les perspectives réglementaires attendus pour 2020

2 nouveaux appels à manifestation d'intérêt (AMI)

Afin de prolonger les actions menées dans le cadre du plan Hydrogène de 2018, le gouvernement a annoncé fin Janvier 2020 le lancement de deux nouveaux appels à projets, pilotés par l'ADEME :



Projets d'envergure sur la conception, la production et l'usage de systèmes à hydrogène

Lancement :
Janvier 2020



Cet AMI vise à identifier des projets permettant de développer les savoir-faire industriels et de passer la filière à l'échelle (projets de développement industriel, projets de production massive territoriaux pour les usages industrie et mobilité, projets de décarbonation massive d'usages industriel et projets structurants de mobilité...).



1^{ère} relève mi-mars 2020
2^{ème} relève fin mai 2020



Financement non défini



Aide à l'émergence de la mobilité hydrogène dans le secteur ferroviaire

Lancement :
Janvier 2020



Cet AMI s'adresse aux autorités organisatrices des transports ferroviaires régionaux et vise à soutenir l'émergence de la mobilité hydrogène dans le secteur ferroviaire via les trains bi-mode (électrique/hydrogène), permettant de réduire les impacts liés à la traction ferroviaire Diesel.



Dépôt des candidatures :
fin mars 2020



22 M€ de dotation

Des objectifs en matière d'hydrogène bas carbone mais des financements en baisse



Loi énergie-climat 2019

Publiée le 8 novembre 2019

Fixe l'objectif de **20 à 40 % d'hydrogène bas-carbone et renouvelable** dans la consommation totale d'hydrogène d'ici **2030**.

- Appelle par voie d'ordonnance pour 2020 :
 - à **définir la terminologie des différents types d'hydrogène** en fonction de la source d'énergie utilisée pour le produire,
 - à permettre **la traçabilité de l'hydrogène**,
 - à **définir un cadre de soutien à l'hydrogène** produit à partir d'énergie renouvelable ou par électrolyse de l'eau à l'aide d'électricité bas-carbone.
- Appelle par décret la mise en place d'un **dispositif de garanties d'origine** pour l'hydrogène renouvelable.



PPE 2019-2028

- Alors que le projet de PPE dévoilé en janvier 2019 prévoyait un soutien à la filière à hauteur de 100M€ par an, celui-ci est ramené à **50M€ par an** dans le projet de PPE révisé publié en janvier 2020.

Malgré un financement annuel ramené à 50M€, les mesures de soutien prévues au cours de l'année 2020 s'inscrivent dans la continuité du Plan Hydrogène : sont attendus un soutien via des appels à projets et une évolution du cadre réglementaire en matière d'hydrogène renouvelable et bas carbone.

3. Stratégies et défis de la filière hydrogène-énergie

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

Les secteurs de la mobilité, des services réseaux, de la production décarbonée d'hydrogène, 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 :



1. Réduire les coûts des technologies pile à combustible et électrolyseur et limiter l'utilisation de métaux rares

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 leviers principaux au développement de la filière hydrogène-énergie.



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

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 nouveaux usages 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 encore adaptées aux usages décentralisés des nouvelles applications de l'hydrogène et doivent être allégées.



4. Harmoniser les normes, établir des standards internationaux et mettre en place un système de traçabilité de l'hydrogène

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. Mettre en place des politiques de soutien aux investissements privés

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 : définir une fiscalité attractive pour le carburant hydrogène via des exemptions fiscales et favoriser l'achat de véhicules FCEV au travers de subventions efficaces.



6. Développer de nouveaux modèles économiques, monétiser les services réseau et les émissions de CO₂ 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 CO₂ évitées.

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

4. Stratégies et défis de la filière hydrogène-énergie

A retenir : la filière se structure à plusieurs échelles géographiques et devra lever des obstacles technologiques et réglementaires

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 H₂, le Power-to-Gas 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 international 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.
- A l'échelle internationale, la filière se structure autour de grandes instances représentatives qui fédèrent industriels et acteurs territoriaux.

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

- Des **travaux de recherche transverses**, 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 de la technologie par les usagers est nécessaire à la percée de l'hydrogène sur les marchés.

Annexes

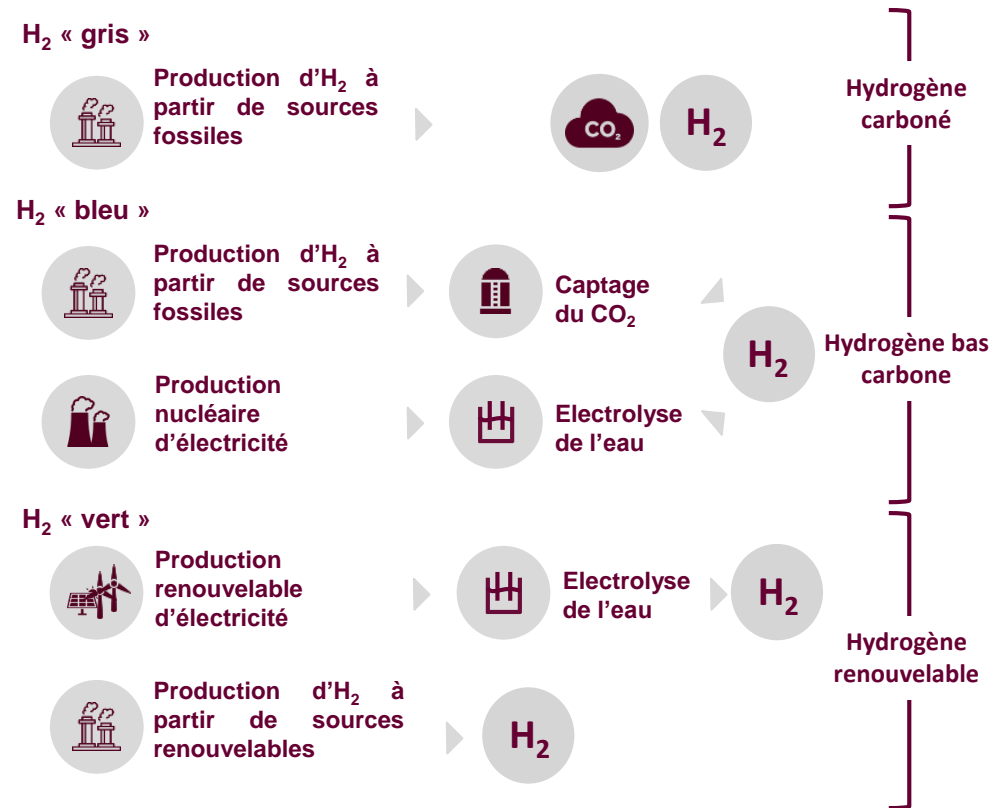
Terminologie des différents types d'hydrogène : vert, bleu, gris

L'hydrogène produit à partir de sources fossiles est appelé **hydrogène « gris »**.

Si l'hydrogène est produit à partir de **sources renouvelables** (vaporeformage de biogaz, pyrogazéification, électrolyse de l'eau avec électricité issue de l'éolien, du solaire ou de la biomasse), on parle alors d'**hydrogène « vert »**.

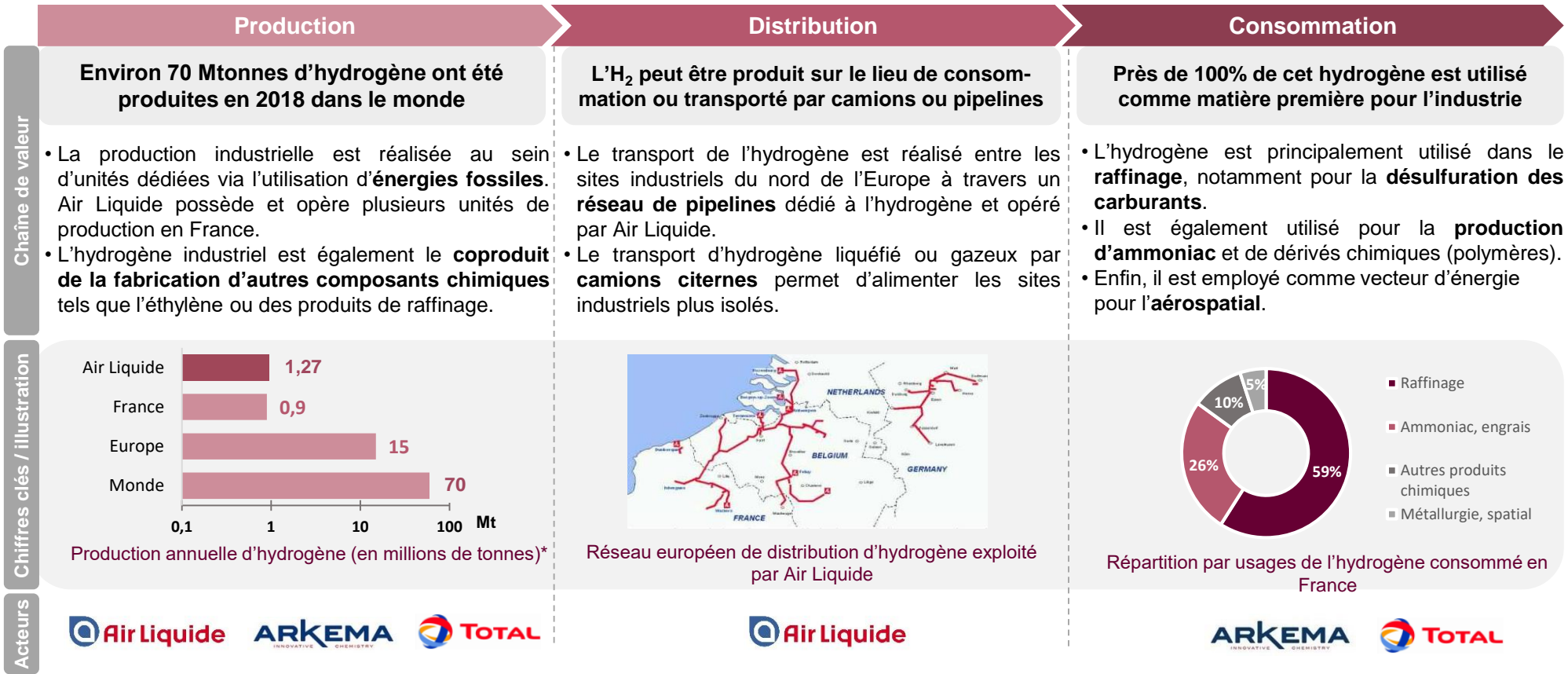
L'hydrogène produit de manière non carbonée peut également être « **bleu** ». Il est dans ce cas produit :

- soit par les méthodes de production conventionnelles d' H_2 auxquelles est adjoint un **process de stockage du CO_2 émis**,
- soit par électrolyse de l'eau en ayant recours à de l'électricité d'origine nucléaire.



Filière hydrogène industriel : la France est représentée par ses grands groupes industriels







L'hydrogène (H₂) 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.

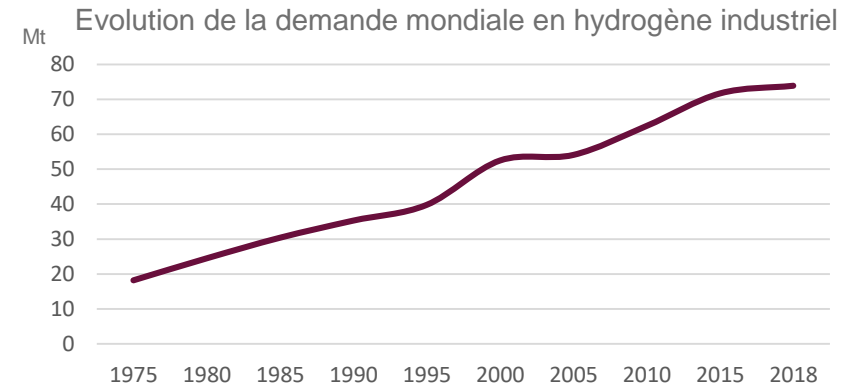


La France, portée par de grands industriels chimiques, est impliquée sur les 3 volets de la filière historique de l'hydrogène, que sont la production, la distribution, et la consommation industrielle. Le développement des nouvelles applications de l'hydrogène-énergie, faisant appel à l'hydrogène en tant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

Filière hydrogène industriel : leader mondial du marché des gaz industriels, la France a un rôle à jouer dans le développement de la filière H₂

La France, représentée par le groupe Air Liquide, figure parmi les **leaders mondiaux du marché des gaz industriels** dont fait partie la filière hydrogène industrielle historique :

Pays	Groupe	Description	CA 2018
	Linde PLC	L'allemand Linde et l'américain Praxair ont annoncé en 2016 leur fusion, créant ainsi le leader mondial du marché des gaz industriels	28 Md€
	Air Liquide	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.	21 Md€
	Air Products	Deuxième fournisseur de gaz industriel américain, Air Products est présent dans 50 pays.	8,9 Md\$
	Taiyo Nippon	Taiyo Nippon est principalement présent au Japon et aux Etats Unis.	5,9 Md\$
	Messer Group	Messer group est présent sur le secteur du gaz industriel dans près de 32 pays.	1,4 Md€
	CNH Energy	Le producteur de charbon et énergéticien chinois est également le premier producteur national d'hydrogène.	38 Md\$

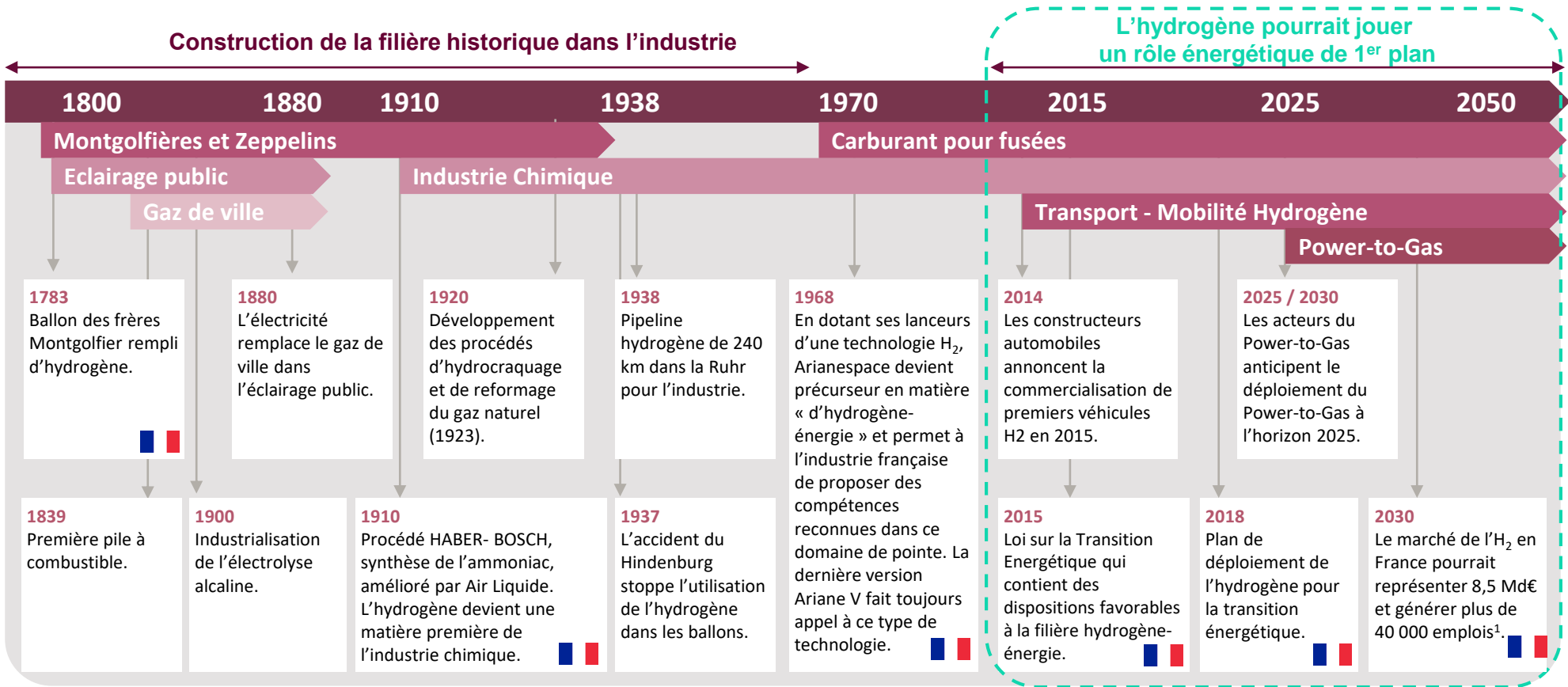


- Contraints par les enjeux environnementaux et la réduction des émissions de CO₂, les producteurs de gaz industriels s'engagent de plus en plus dans le **développement durable et l'innovation** et s'intéressent aux technologies de rupture telles que l'électrolyse de l'eau, la pile à combustible et la 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.

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 stagne depuis une dizaine d'années et pousse les acteurs à développer de nouveaux relais de croissance dans la production décarbonée d'hydrogène et dans les nouvelles applications de l'hydrogène-énergie.

Filière « hydrogène-énergie » : les étapes de construction de la filière, de l'industrie vers les nouveaux usages

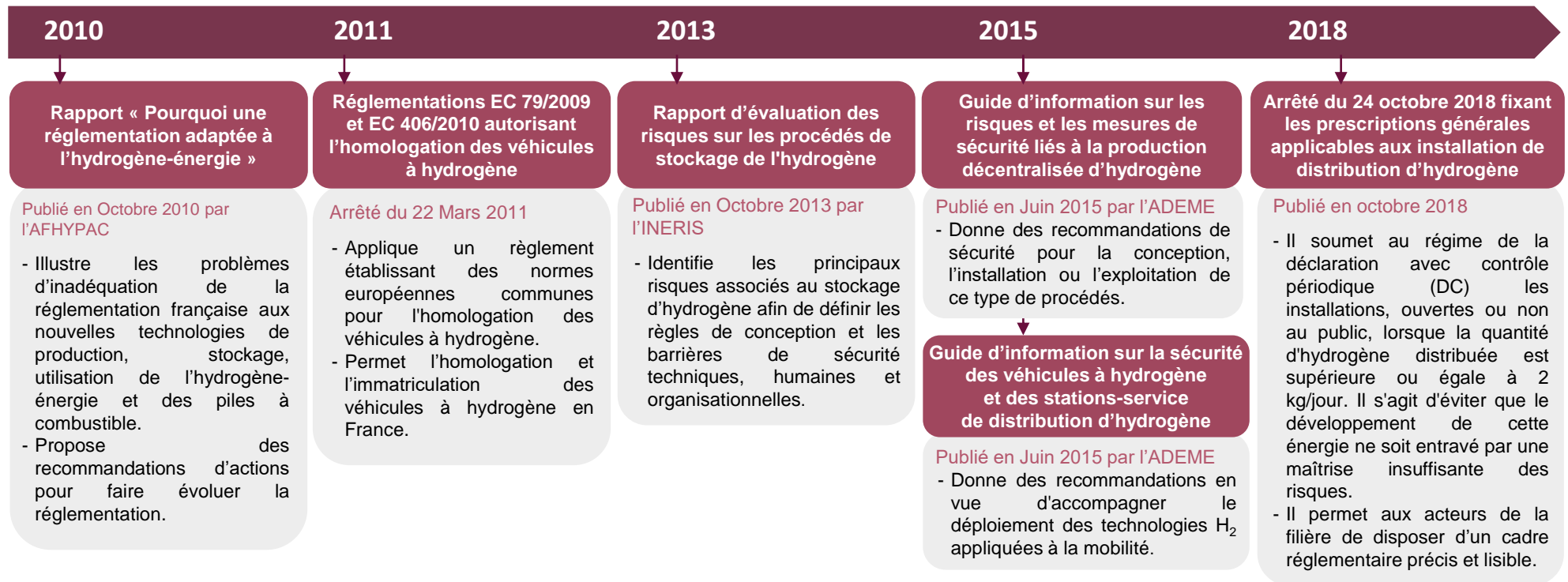
L'hydrogène-énergie : depuis les années 2000, l'hydrogène est considéré comme un **vecteur énergétique** d'avenir. De par ses facultés de **stockage** et sa **forte densité énergétique**, la molécule H₂ se présente comme un substitut possible aux hydrocarbures, en particulier dans le secteur des transports, 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.

Une évolution nécessaire mais progressive 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**.



Malgré une accélération des travaux réglementaire ces dernières années, de nombreuses évolutions réglementaires doivent encore 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 des retours d'expérience contribuera à l'évolution du cadre réglementaire.

Vos contacts



Charlotte de LORGERIL

Associate Partner

Mail : charlotte.delorgeril@sia-partners.com

 @cdelorgeril



Gautier LAVEISSIERE

Consultant Senior

Mail : gautier.laveissiere@sia-partners.com

 @glaveissiere



Théo FAYOLLE

Consultant

Mail : theo.fayolle@sia-partners.com



Site dédié aux études EnergyLab

www.energylab.sia-partners.com

 @SiaEnergie



Pioneer of Consulting 4.0

Sia Partners is a next generation consulting firm focused on delivering superior value and tangible results to its clients as they navigate the digital revolution. With over 1,400 consultants in 16 countries, we will generate an annual turnover of USD 280 million for the fiscal year 2019/20. Our global footprint and our expertise in more than 30 sectors and services allow us to accompany our clients worldwide. We guide their projects and initiatives in strategy, business transformation, IT & digital strategy, and Data Science. As the pioneer of Consulting 4.0, we develop consulting bots and we integrate the disruption of AI in our solutions.

Follow us on **LinkedIn** and **Twitter @SiaPartners**

For more information, visit:

www.sia-partners.com



- Abu Dhabi
- Amsterdam
- Brussels
- Casablanca
- Charlotte
- Denver
- Doha
- Dubai
- Frankfurt
- Hamburg
- Hong Kong
- Houston
- London
- Luxembourg
- Lyon
- Milan
- Montreal
- New York
- Paris
- Riyadh
- Rome
- Seattle
- Singapore
- Tokyo

