

# Panorama des solutions hydrogène



---

# Avant propos

---

Ce document propose une synthèse **des offres hydrogène disponibles en Europe**. Il intègre les technologies sur les différents segments de la chaîne de valeur de l'hydrogène : de la production à l'utilisation.

L'identification des acteurs a été réalisée en recensant les entreprises/entités **proposant une technologie**. Les développeurs de projets et systémiers ne figurent donc pas dans ce panorama. Les solutions présentées dans ce document sont issues d'une série d'entretiens avec les acteurs concernés et de sources bibliographiques. **L'ensemble des données regroupées est proposé à titre informatif et non exhaustif**. Les informations seront régulièrement mises à jour par l'intermédiaire d'enquêtes et de remontées spontanées des acteurs à l'adresse suivante : [\*solutionsH2@france-hydrogene.org\*](mailto:solutionsH2@france-hydrogene.org)

La filière hydrogène étant en phase d'industrialisation et de fort développement, les **dates de commercialisation ainsi que les engagements des constructeurs évoluent rapidement**. Les informations sont donc non contractuelles et ne se substituent pas à la prise de contact direct avec l'entreprise, seule détentrice d'informations les plus à jour. Le panorama des solutions hydrogène a vocation à mettre en lumière l'offre disponible et sa variété.

# Sommaire



## Panorama des solutions hydrogène

<b>Production</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>○ Electrolyse</li><li>○ A partir de biomasse</li><li>○ Reformage du méthane</li><li>○ Pyrolyse du Méthane</li><li>○ Hydrogène natif</li><li>○ Autres</li></ul>	<b>4</b>
<b>Stockage</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>○ Forme gazeuse</li><li>○ Forme liquide</li><li>○ Forme solide</li><li>○ Géologique</li></ul>	<b>53</b>
<b>Transport</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>○ Voie routière</li><li>○ Hydrogénoducs</li><li>○ Voie maritime</li></ul>	<b>79</b>
<b>Molécules de synthèse</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>○ Méthane</li><li>○ L(O)HC</li></ul>	<b>95</b>
<b>Distribution</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>○ Stations de recharge</li></ul>	<b>105</b>
<b>Usages</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>○ Mobilité VL &amp; PL</li><li>○ Applications portuaire</li><li>○ Aéronautique</li><li>○ Ferroviaire</li><li>○ Engins spéciaux</li><li>○ Usages stationnaires</li></ul>	<b>116</b>

# Production

H<sub>2</sub>





# Sommaire



## Production

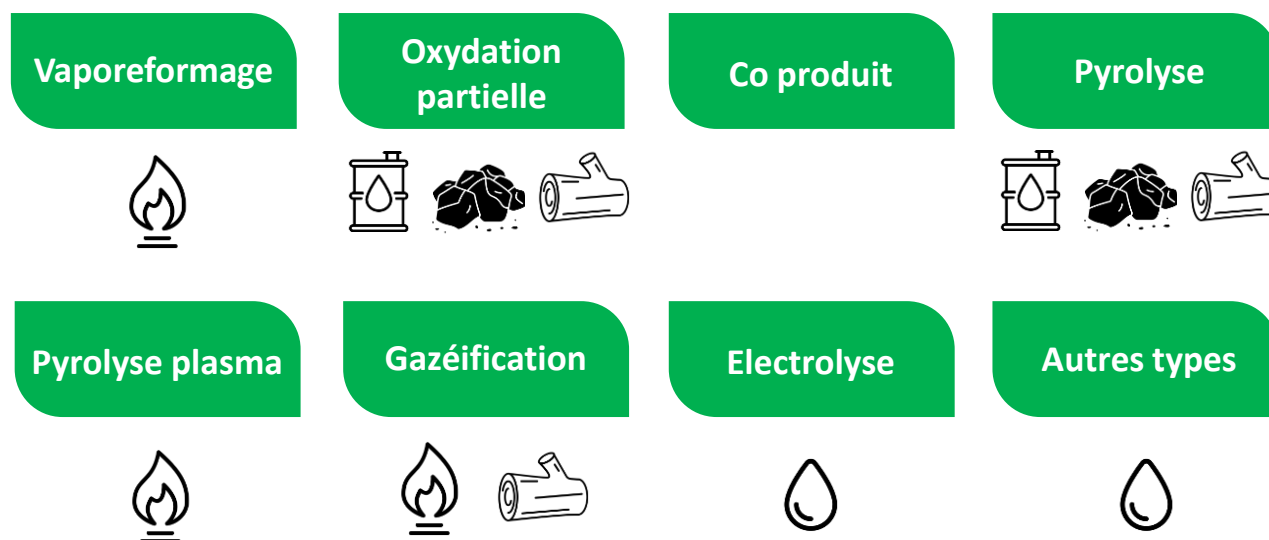
<b>Production : Principes généraux</b>	<b>6</b>
<b>Electrolyse</b>	<b>8</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>○ Principes généraux</li><li>○ PEM</li><li>○ Alcalin</li><li>○ AEM</li><li>○ HT</li><li>○ Autres types d'électrolyse</li></ul>	
<b>Hydrogène à partir de biomasse</b>	<b>26</b>
<b>Reformage du méthane</b>	<b>34</b>
<b>Pyrolyse du méthane</b>	<b>44</b>
<b>Hydrogène natif</b>	<b>46</b>
<b>Autres types de production</b>	<b>50</b>

# La production

## Principes généraux

L'hydrogène est un gaz connu et utilisé dans les processus industriels depuis plus de 40 ans pour ses propriétés chimiques (ex : raffinage, ...). Cependant, il n'existe quasiment pas à l'état naturel, c'est pourquoi il est nécessaire de l'extraire de matières premières (eau, gaz, biomasse, ...) en le dissociant des autres atomes avec lesquels il est combiné (carbone, oxygène, ...) grâce à de l'énergie (électricité, chaleur, ...). Cet hydrogène sera considéré comme fossile, renouvelable ou bas-carbone selon la matière première employée et la source d'énergie utilisée. Parmi les différents procédés de production, on retrouve :

### Procédés de production hydrogène



### Matières premières



# La production

## Principes généraux

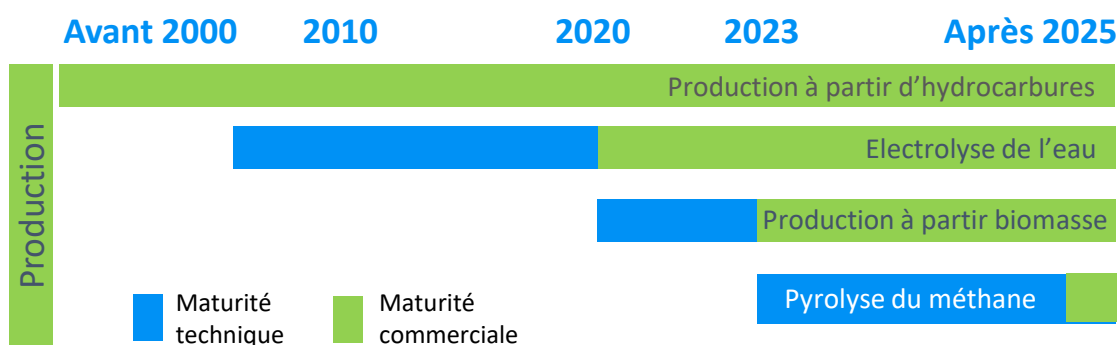
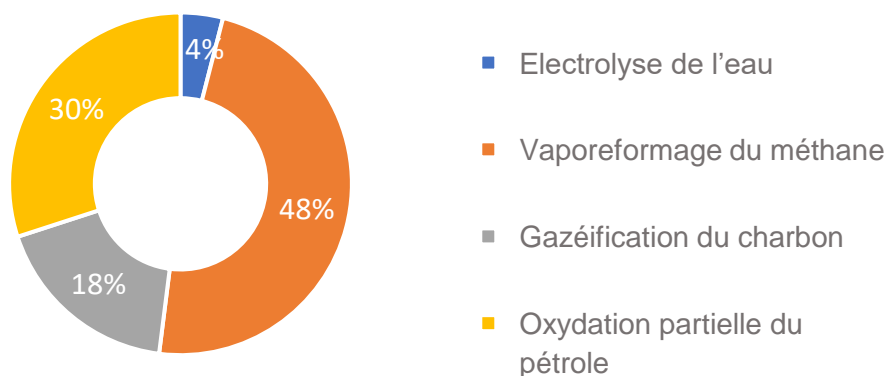
En 2018, la production mondiale d'hydrogène représentait environ **75 millions de tonnes** (Source : DOE 2019). Les procédés recourant à des ressources fossiles sont les plus répandus (reformage du méthane, gazéification du pétrole, etc.). Des procédés comme l'électrolyse de l'eau ou la pyrogazéification sont des solutions pour la production d'hydrogène bas carbone et renouvelable. L'enjeu est de faire baisser leurs coûts pour les rendre compétitifs.

Exemple de coûts en sortie de production (Source : IRENA Green hydrogen cost 2020)

- 3 € à 14 €/kgH<sub>2</sub> par électrolyse de l'eau
- 1,5 €/kgH<sub>2</sub> à 4 €/kgH<sub>2</sub> pour celui produit par reformage des hydrocarbures

Dans les années à venir, ces technologies devront être déployées de manière importante (en nombre d'installations et en taille) afin de réduire leurs coûts et de rendre la **production d'hydrogène bas carbone compétitive**.

### Répartition des modes de production hydrogène





---

# Electrolyse de l'eau

---



# Electrolyse de l'eau

## Aspects techniques

L'électrolyse de l'eau est une méthode qui vise à **séparer la molécule d'eau en hydrogène et en oxygène** par application d'un courant électrique. Cette réaction peut se faire de manière différente selon les **technologies utilisées**. Le procédé lui-même ne rejette pas de CO<sub>2</sub> contrairement au vaporeformage mais le bilan carbone de l'hydrogène produit dépend essentiellement de la source d'électricité utilisée et de la manière dont celle-ci est produite. Par exemple, l'hydrogène sera considéré comme renouvelable (resp. bas-carbone) si l'électricité provient d'une source renouvelable (resp. bas-carbone).

### Types de projets en fonction des capacités de production en jeu

200-250kW 50 kgH <sub>2</sub> /jour	1MW 400 kgH <sub>2</sub> /jour	4-5MW 1500-2000 kgH <sub>2</sub> /jour	10MW et plus 4-10 tH <sub>2</sub> /jour
Laboratoire	Mobilité légère	Mobilité lourde	Industrie

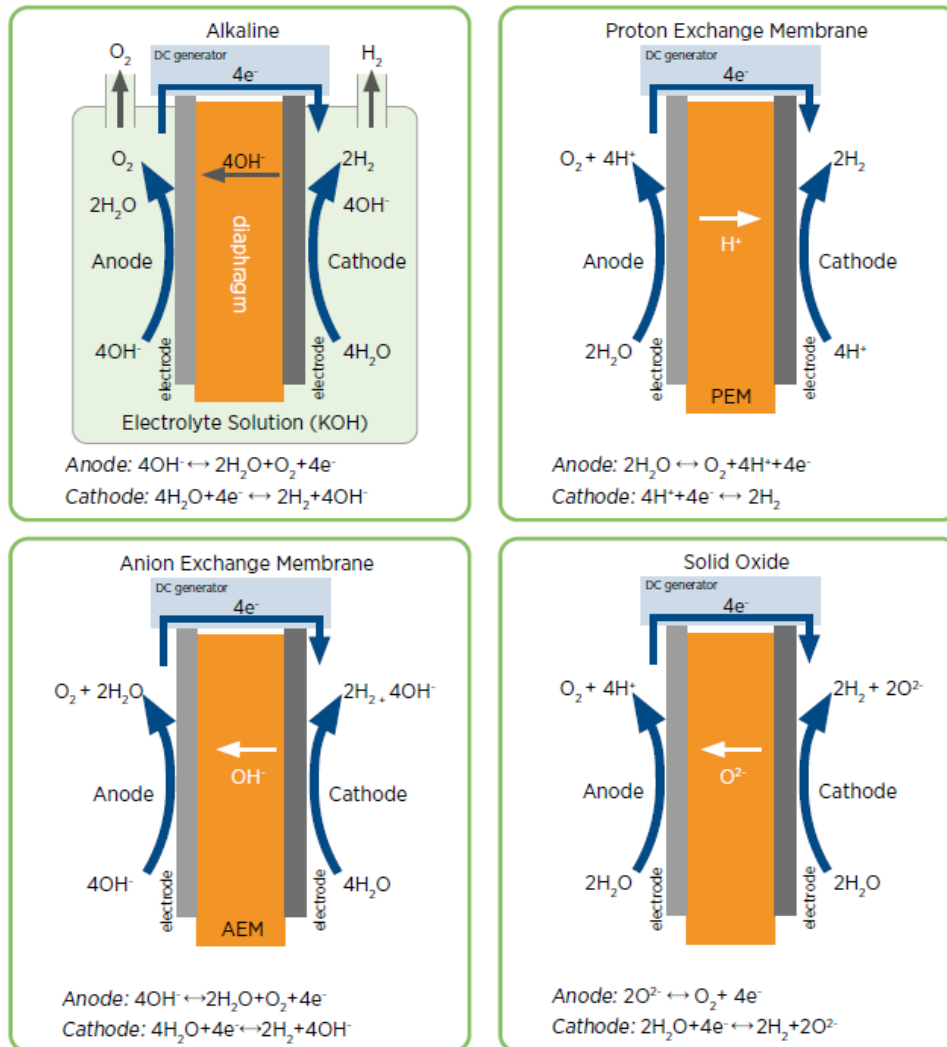
- Les électrolyseurs sont souvent installés dans des conteneurs de 20 et 40 pieds.
- Les plus grands modules produits aujourd'hui ont une capacité de 5 MW (les capacités de production au-delà de cette valeur résultent d'un assemblage de modules)
- Pertes de performances de 1,3% / an avec renouvellement du cœur du système au bout de 7-8 ans

Données en 2020	Technologies	Efficacité stack KWh/KgH <sub>2</sub>	Durée de vie du stack (heures)	Durée de vie du système
	Alcalin	50-56	75 000	0,11 – 0,23 %/1000h
	PEM	52-59	65 000	0,16 – 0,30 %/1000h
	SOEC – Haute température	39-41	10 000	0,5 – 4 %/1000h
	AEM	51.5-66	>5k	NC

Source : France Hydrogène



## Les 4 technologies disponibles commercialement



## Electrolyse de l'eau

### Aspects économiques

#### Capacité de production :

Les projets sur les **gammes de puissance les plus importantes permettent**, par effet d'échelle, d'avoir des coûts en €/kWh plus compétitifs. Le plus grand marché adressé par les électrolyseurs est le marché des fortes puissances (au dessus de 1MW). **Augmenter la capacité de 1 à 20 MW permet de réduire les coûts à l'investissement (CAPEX) par 3.**

### Le prix d'achat de l'électricité :

Les coûts relatifs à la consommation électrique représentent 50% ou plus du coût de revient de l'hydrogène.

### Le facteur de charge :

Afin d'amortir les coûts à l'investissement (CAPEX) d'une unité de production, un électrolyseur doit fonctionner le plus possible dans l'année (facteur de charge cible : 8000 heures/an).

(Source : EnerKa Conseil)

Le coût de revient actuel en sortie de production varie ainsi de 6 à 14 €/kgH<sub>2</sub> selon les cas d'usage. Il est estimé qu'un hydrogène est compétitif lorsqu'il est vendu à un prix ≤ 6-7 €/kg en sortie de production et 9 €/kg à la pompe. (Source : Recommandations Ademe 2021).

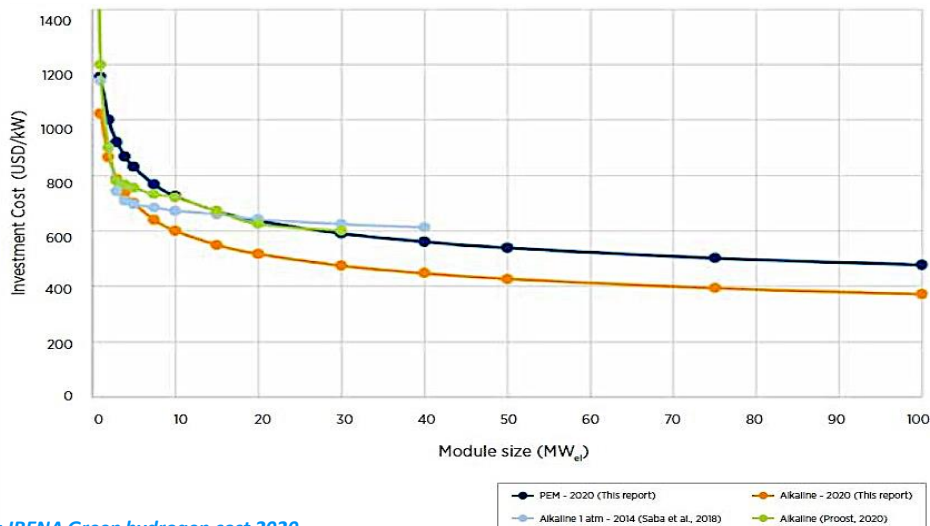
### Coût à l'investissement (CAPEX) d'un électrolyseur de 1MW (retours fournisseurs)

Marché adressé	Coûts (€/kW)		Electrolyseur	Systeme complet (clé en main)*
	Moyenne	Fourchette		
Electrolyseur ALK	1500	700-1300	1000	2500
Electrolyseur PEM	1500	1100-1900	1500	4000
Electrolyseur SOE	1900	1600-2200	1900	NC
Electrolyseur AEM	1900	1600-2200	1900	NC

Données en 2021

\*comprend les unités de compressions, de stockage, de distribution et la mise en service (prix dépend de la gamme de puissance, de la capacité de production et de la quantité d'H<sub>2</sub> distribuée et stockée sur site)

### Réduction des coûts par effet de volume en puissance installée



Source : IRENA Green hydrogen cost 2020

# Electrolyse de l'eau

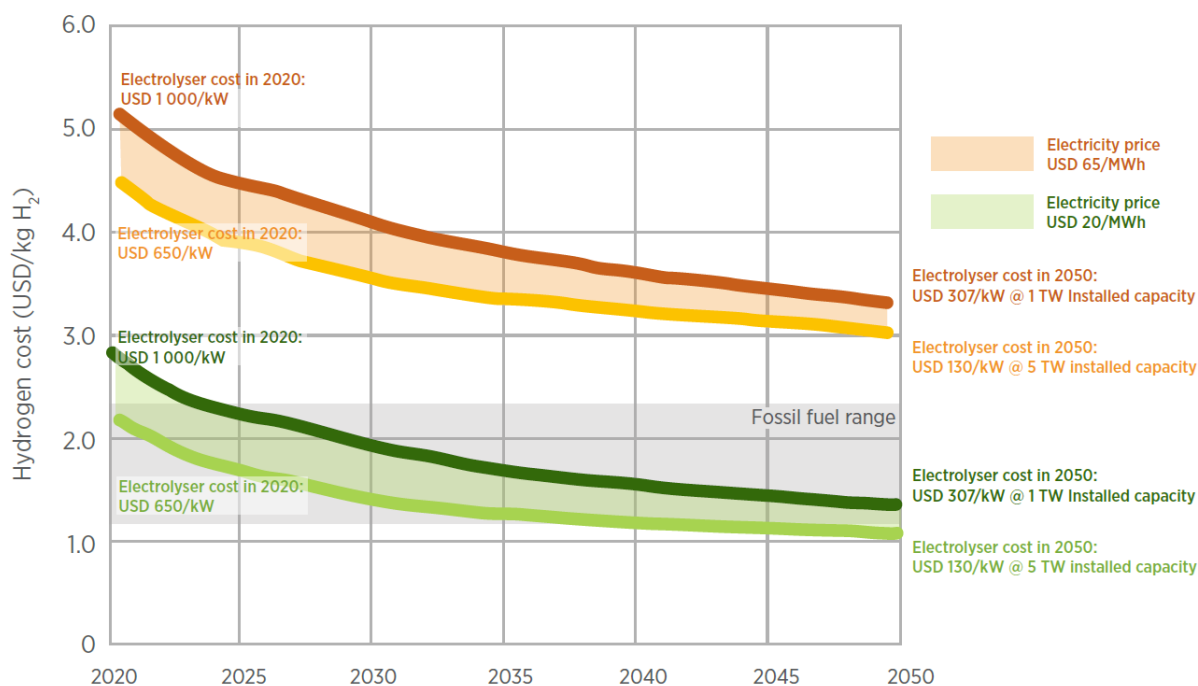
## Prévisions de réduction de coût

Le principal facteur de réduction de coûts des électrolyseurs dans les prochaines années est le **changement d'échelle**

La figure ci-après illustre la réduction potentielle du coût de l'hydrogène vert entre 2020 et 2050 pour une série de niveaux de coûts et de déploiement d'électrolyseurs. Dans le meilleur des cas, en utilisant de l'électricité renouvelable à faible coût (20 USD/MWh) et une trajectoire de déploiement agressive (5 TW de capacité installée d'ici 2050), l'hydrogène vert peut devenir plus compétitif que toute autre solution carbonée d'ici 2040.

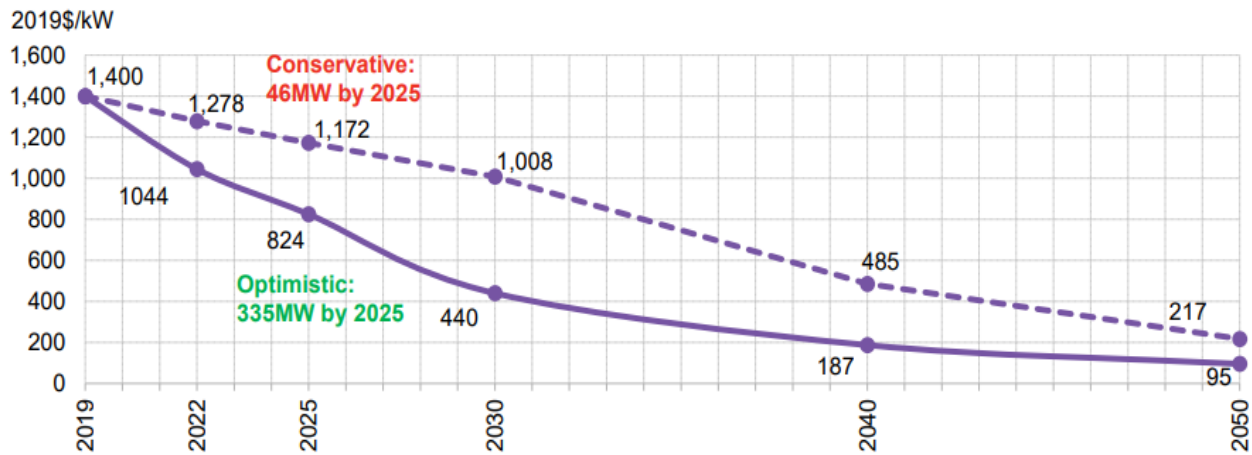
Rajouté aux prix spécifiques, les coûts de maintenance (usure des pièces, utilities, etc.), les contrats d'eau et d'électricité sont également très élevés et doivent être pris en compte lors de l'élaboration des projets.

### IRENA Green hydrogen cost 2020



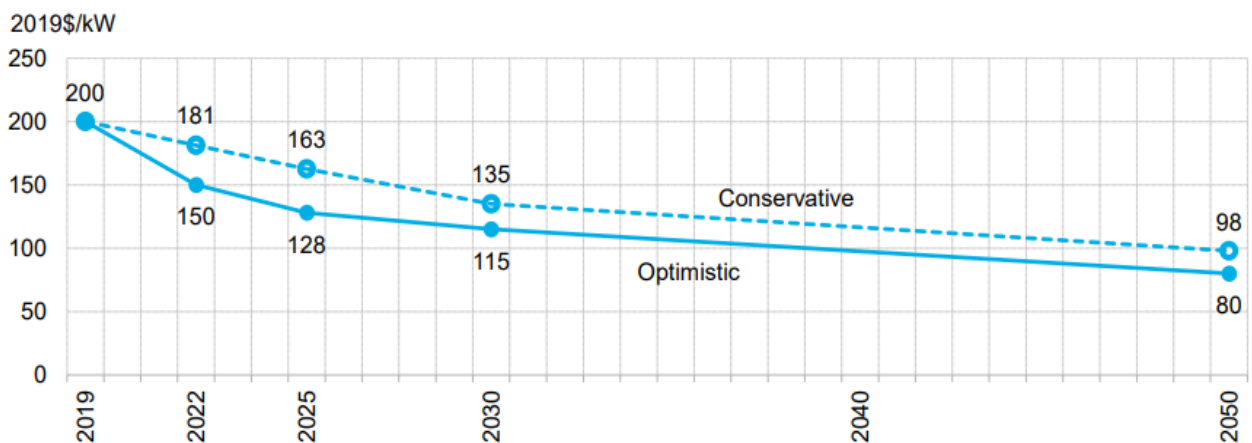
## Prévisions de réduction de coût des électrolyseurs PEM et alcalins à horizon 2050

System capex forecast of 4MW-scale PEM electrolysis projects



Source: BloombergNEF. Conservative: 46MW of PEM systems commissioned by 2025. Optimistic: 335MW of PEM systems commissioned by 2025.

System capex forecast of Chinese-made alkaline electrolysis projects (large-scale projects)



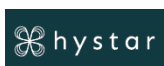
Source: BloombergNEF. Note: Assumes large-scale system sizes of 3MW in 2019, 10MW in 2022, 30MW in 2025, 100MW in 2030 and 400MW in 2050.

# Electrolyse de l'eau

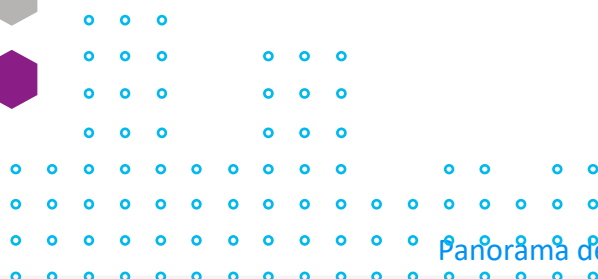
## Acteurs de la filière

### PEM

### Alcalin



### Autres technologies d'électrolyse



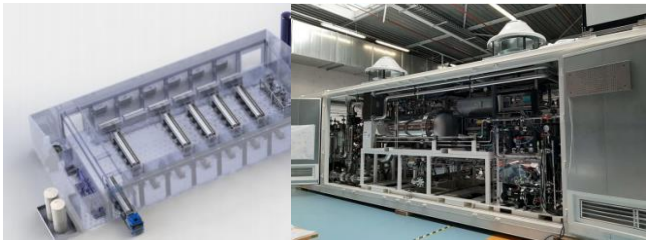


# Electrolyse de l'eau PEM

**elogen**



**Puissance :** de 150 kW jusqu'à plus de 10 MW  
**Production hydrogène :**  
 10 à 2 000 Nm<sup>3</sup> /h soit 0,91 à 181,8 kg/h



Source : Elogen

**hystar**



**Puissance :** De 1 à 5,5 MW  
**Production hydrogène :**  
 226 - 1 255 Nm<sup>3</sup>/h soit 20,3 - 112,9 kg/h



Source : Hystar

**Cummins**

**Anciennement  
Hydrogenics**

**Puissance:** De 1 à 20 MW  
**Production hydrogène :**  
 200 - 4 000 Nm<sup>3</sup>/h soit 18 - 360 kg/h



Source : Cummins

Hydrogen is now.  
**H-TEC SYSTEMS**



**H-TEC PEM ME450**  
**Puissance:** 1 MW  
**Production hydrogène :** 210 Nm<sup>3</sup>/h soit 19 kg/h

**H-TEC PEM HCS**  
**Puissance:** Module jusqu'à 2 MW pour les plateformes multi-MW (10 MW et plus)  
**Production hydrogène :** de 375 Nm<sup>3</sup>/h soit 33 kg/h jusqu'à > 2100 Nm<sup>3</sup>/h soit 188 kg/h



Source : H-Tec Systems

# Electrolyse de l'eau PEM



**Puissance:** de 25 kW à 1.3 MW  
**Production hydrogène :**  
 5 - 205 Nm<sup>3</sup>/h soit 0,5 – 18 kg/h



Source : iGas Energy



**Puissance :** 2 MW jusqu'à 100 MW (à venir)  
**Production hydrogène :**  
 Jusqu'à 40 t/j (soit 1650 kg/h) pour plusieurs stacks



Source : ITM



**Puissance :** Jusqu'à 1,25 MW  
**Production hydrogène :**  
 0,27-4920 Nm<sup>3</sup>/h soit 0,0245-447 kg/h



Source : NEL



**Puissance:** De 1 MW à 1 GW  
**Production hydrogène :**  
 200 Nm<sup>3</sup>/ h soit 18 kg/h pour 1 MW



Source : Plug



Entreprise française



Entreprise Européenne



Usine en France



Membre de France Hydrogène

# Electrolyse de l'eau PEM

## SIEMENS ENERGY



**Puissance :** Jusqu'à environ 120 MW<sup>1</sup>  
**Production hydrogène :**  
 Jusqu'à 22 kNm<sup>3</sup>/h soit 2000 kg/h



Source : iGas Siemens

## H2B2

Electrolysis Technologies

**Puissance :** de 3 kW jusqu'à 4,1 MW  
**Production hydrogène :**  
 0,5 à 800 Nm<sup>3</sup> /h soit 0,0045 à 72 kg/h



Source : H2B2

## RR

ErreDue<sub>s.p.a.</sub>



**Puissance :** jusqu'à 900 kW<sup>1</sup>  
**Production hydrogène :**  
 0,66 – 170,6 Nm<sup>3</sup>/h soit 0,06 – 15,2 kg/h

## Mercury



## SOLENCO POWER



**Solyzer**  
**Puissance :** de 25 kW à 500 kW  
**Production hydrogène :** 115 Nm<sup>3</sup>/h  
 soit 10 kg/h

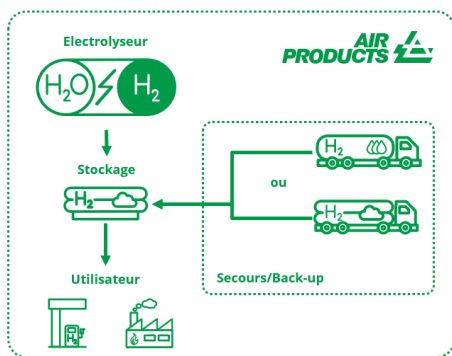


Source : Solenco Power

# Electrolyse de l'eau PEM



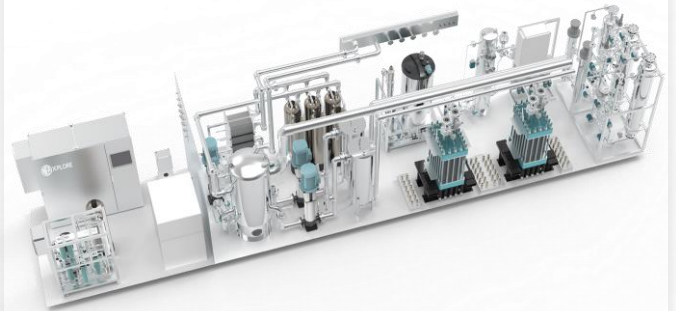
**Puissance stack** : de 0,5 MW à 5MW  
**Production hydrogène** : de 45 à 933 Nm<sup>3</sup>/h  
 soit de 4 à 84 kg/h  
**Commercialisation** : Disponible



Source : Air Products



**HyPEM NEA HYTRON**  
**Puissance stack** : 1 MW  
**Puissance d'unité d'électrolyse** : de 1 à 5 MW  
**Production hydrogène** : Jusqu'à 1000 Nm<sup>3</sup>/h soit  
 2000 kg/j  
**Commercialisation** : Disponible

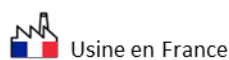


## Caldera

**Puissance électrolyseur** : 200 kW  
**Production hydrogène** : 30 Nm<sup>3</sup>/h soit 2,67 kg/h  
**Commercialisation** : En développement



Source : H2U Technologies



# Electrolyse de l'eau Alcalin

**McPhy**

Driving  
clean energy  
forward



**Puissance max stack :**

De 3 kW à 1 MW

**Production hydrogène**

**Gamme Piel & MCLyzer :** de 0,4 à 800 Nm<sup>3</sup>/h  
soit de 0,04 kg/h à 71 kg/h

**Gamme Augmented MCLyzer :** modules jusqu'à  
4 MW pour les plateformes multi-MW, GW



Source : McPhy

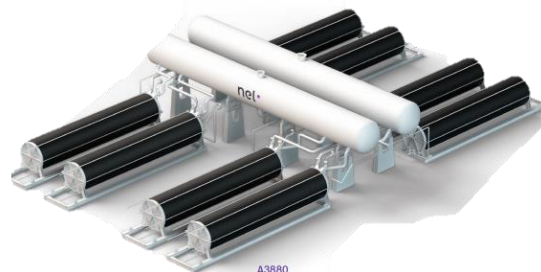
**nel**



**Puissance:** Jusqu'à 100 MW

**Production hydrogène :**

50 – 19 400 Nm<sup>3</sup>/h soit 4,5 – 1760 kg/h



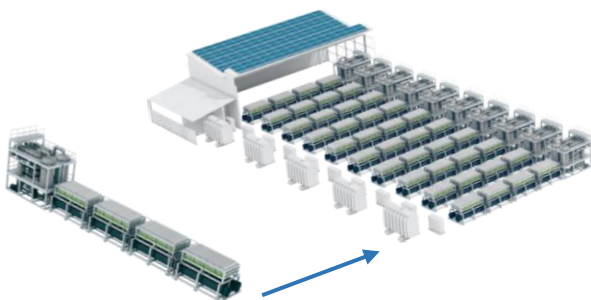
Source : Nel



**Puissance d'un stack :** 5 MW

**Puissance d'une unité d'électrolyse :** 20 MW

**Production hydrogène :** 4000 Nm<sup>3</sup>/h soit  
360 kg/h



Source : thyssenkrupp nucera

**sunfire**



**Puissance :** Jusqu'à 10 MW

**Production hydrogène :**

2 230 Nm<sup>3</sup> /h soit 200 kgH<sub>2</sub>/h



Source : Sunfire



Entreprise française



Entreprise Européenne



Usine en France



Membre de France Hydrogène



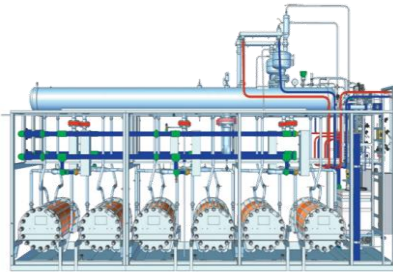
# Electrolyse de l'eau Alcalin



Anciennement  
Hydrogenics

**Puissance :**  
0,1 à 0,8 MW pour un module

**Production hydrogène :**  
10 à 100 Nm<sup>3</sup>/h soit 0,9 – 9 kg/h



Source : Cummins

## Hydrogen pro



**Puissance max :** 5,5 MW (à HP 15 bar)

**Production hydrogène :** 1100 Nm<sup>3</sup>/h soit  
99 kg/h



Source : Hydrogen Pro



GREEN  
HYDROGEN  
SYSTEMS



### HyProvide A-Series

**Puissance :** jusqu'à 0,9 MW par module  
Pour des conceptions de 1 à 5 MW

**Production hydrogène :**  
jusqu'à 180 Nm<sup>3</sup>/h soit 16 kg/h par module

### HyProvide X-Series

**Puissance :** jusqu'à 6 MW par module  
Pour des conceptions de 6 à ≥ 100 MW

**Production hydrogène :**  
jusqu'à 1200 Nm<sup>3</sup>/h soit 107 kg/h par module



Source : Green Hydrogen Systems



John  
Cockerill



**Puissance :** 5 MW

**Production hydrogène :**  
936 Nm<sup>3</sup>/h soit 83,3 kg/h



Source : John Cockerill

# Electrolyse de l'eau Alcalin



**Puissance** : de 50 kW à 1,4 MW<sup>1</sup>  
**Production hydrogène** :  
 10 – 250 Nm<sup>3</sup>/h soit 0,9 – 23 kg/h



Source : Hygear



**Puissance** : de 600 kW à 2,5 MW  
**Production hydrogène** :  
 17 – 500 Nm<sup>3</sup>/h soit 1,5 – 45 kg/h<sup>1</sup>



Source : NextHydrogen



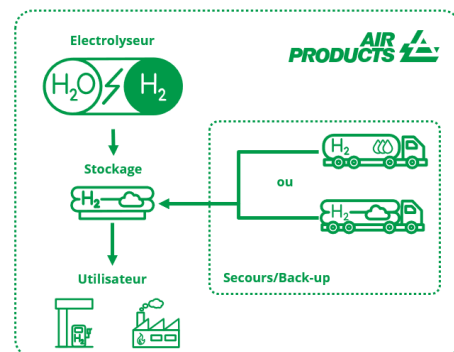
**Solyzer**  
**Puissance** : de 25 kW à 500 kW  
**Production hydrogène** : 115 Nm<sup>3</sup>/h soit  
 10 kg/h



Source : Solenco Power



**Puissance stack** : de 0,5 MW à 5MW  
**Production hydrogène** : de 45 à 933 Nm<sup>3</sup>/h  
 soit de 4 à 84 kg/h  
**Commercialisation** : Disponible



Source : Air Products

# Electrolyse de l'eau Alcalin

**sagim**  
Hydrogen Generators - GIP™



## Générateur BP-MP

**Solution électrolytique non corrosive (Pas de KOH)**

**Puissance absorbée :** à partir de 5 kW

**Production hydrogène :**

À partir de 0,25 Nm<sup>3</sup>/h soit 0,5 kg/j  
jusqu'à 5 Nm<sup>3</sup>/h soit 10 kg/j

**Commercialisation:** Disponible

Produit dédié à des  
applications de météorologie  
et à l'aéroportuaire



Source : SAGIM

# Electrolyse de l'eau

## AEM



### EL 4.0

**Puissance :** jusqu'à 2,4 kW

**Production hydrogène :** 0,52 Nm<sup>3</sup>/h soit 1,1 kg/j

### AEM Multicore

**Puissance :** 1 MW

**Production hydrogène :** 210 Nm<sup>3</sup>/h soit 19 kg/h



Source : Enapter



### Puissance max stack :

100 kW et offre prévue à 250 kW en 2022

### Production hydrogène :

2,1 Nm<sup>3</sup>/h soit 0,2 kg/h



Source : Enstack



### Gamme Hy-Cube 40 pieds

**Puissance max stack :** : 50 kW

**Puissance:** Jusqu'à 2 MW

**Production hydrogène :** de 23 Nm<sup>3</sup>/h soit 50 kg/j jusqu'à 375 Nm<sup>3</sup>/h soit 800 kg/j

**Unité Hy-Cube 40 pieds:** Plateforme de Multi-MW, jusqu'à 20 MW par unité

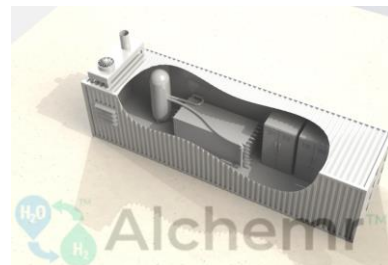
**Commercialisation:** En développement



Source : Gen-Hy



**Puissance max stack :** 500 kW



Source : Alchemr



Entreprise française



Entreprise Européenne



Usine en France



Membre de France Hydrogène

# Electrolyse de l'eau

## Autres types d'électrolyse



Production d'hydrogène à haute pression par électrolyse fractionnée (sans compresseur)  
**Production hydrogène** : 1,13 Nm<sup>3</sup>/j soit 100 gr/h  
**Capacité** : 0,1-2 kg /j  
**Pression** : 100-350 bars



Source : Ergosup



Principes d'électrolyse à haute température  
Fonctionnement à 850°C  
**Puissance max** : 2.68 MW  
**Production hydrogène** :  
750 Nm<sup>3</sup>/h soit 67 kg/h  
Démonstrateur à échelle industrielle en 2022



Source : Sunfire



**Electrolyseur SOE**  
**Stack** : 1.7 Nm<sup>3</sup>/h pour 25 cellules stack



Source : Genvia



**Produit SP**  
**Production d'hydrogène**: jusqu'à 0,8 kg/h soit 9 Nm<sup>3</sup>/h par module (jusqu'à 6 modules par configuration)  
**Produit MP**  
**Production d'hydrogène**: jusqu'à 8 kg/h soit 90 Nm<sup>3</sup>/h par module  
**Rendement** : > 70%  
**Système réversible** : production d'électricité et de la chaleur à partir d'hydrogène



Source : Sylfen



Entreprise française



Entreprise Européenne



Usine en France



Membre de France Hydrogène



# Electrolyse de l'eau

## Autres types d'électrolyse



**Electrolyseur sans membrane**

**Puissance :** 1 à 2 MW

**Production hydrogène :**  
de 209 à 3300 Nm<sup>3</sup>/h soit 19 à 300 kg/h



Source : CPH2

## Bloomenergy®

Electrolyseur à oxyde solide (SOE)

**Puissance :** de 2,6 MW à 2 GW

**Production hydrogène :** de 478 Nm<sup>3</sup>/h  
à 266 000 Nm<sup>3</sup>/h soit de 43 kg/h à 24 000 kg/h

**Commercialisation :** disponible



Source : Bloomenergy



---

# Production d'hydrogène à partir de biomasse

---



# Production à partir de biomasse

## Prévisions de réduction des coûts

Il existe deux grands types de procédés utilisés afin de produire de l'hydrogène à partir de biomasse : la **pyrolyse et la gazéification**. Ces procédés thermochimiques permettent d'obtenir un **gaz de synthèse (syngaz)** à partir de **biomasse** (plaquette forestière, déchets verts, etc.) ou de déchets préparés (**CSR**). Ce gaz est en partie constitué de monoxyde de carbone et d'hydrogène. Il peut être ensuite traité par Water Gas Shift (**WGS**) consistant à injecter de l'eau afin d'obtenir une part plus importante en hydrogène ( $\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2$ ). L'obtention d'un hydrogène purifié à partir du syngaz est possible en installant un système d'adsorption à pression (**PSA**).

Si la matière première est du bois non traité, alors la quantité de  $\text{CO}_2$  absorbée lors de la croissance de l'arbre est identique à celle relâchée lors de sa combustion. Le **carbone est alors capté** lors des différentes étapes et une partie pourra être valorisée sous forme de biochar en agriculture. Grâce à ce principe, l'hydrogène ainsi produit est considéré comme **neutre voire négatif en carbone**, suivant la nature et l'origine de la matière première utilisée.

### Pyrolyse :

- Température entre 350 et 650 °C
- Production de biochar valorisable en tant qu'amendement

### Gazéification :

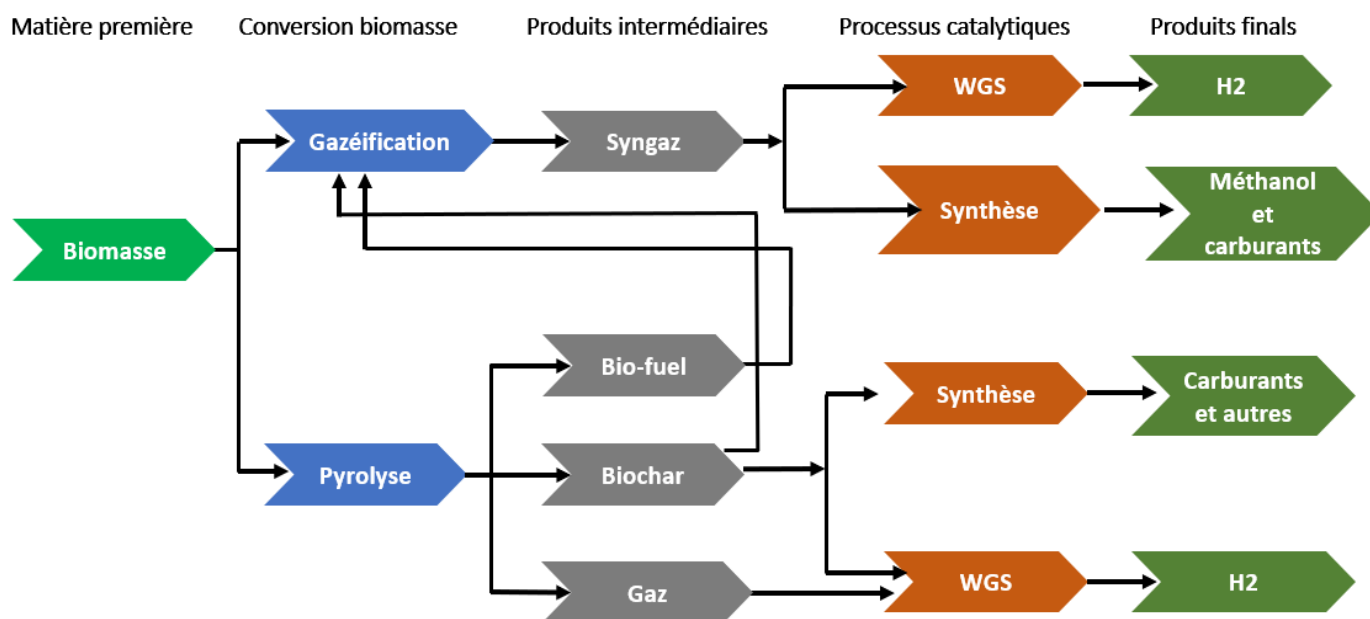
- Température entre 900 et 1 200 °C
- Marché mature jusqu'à la production du syngaz, des projets se développent pour viser le marché de l'hydrogène

### Biomasse utilisée

- **Bois propre (type A)** : Plaquette forestière, buches, déchets verts, déchets agricoles
- **Bois traités (type B)** : Palettes traitées, bois en fin de vie
- **CSR** : Combustibles Solides de Récupération (déchets de chantiers, refus municipaux, etc.)

# Production à partir de biomasse

## Prévisions de réduction de coût



Source : Rapport IEA, *Hydrogen from biomass gasification*, 2018

Un point d'attention concernant les déchets types CSR et biomasse traitée, contenant des taux plus élevés en métaux lourds et autres polluants (cadmium, soufre, NOx, etc.) devant être captés avant d'être relâchés dans l'atmosphère.

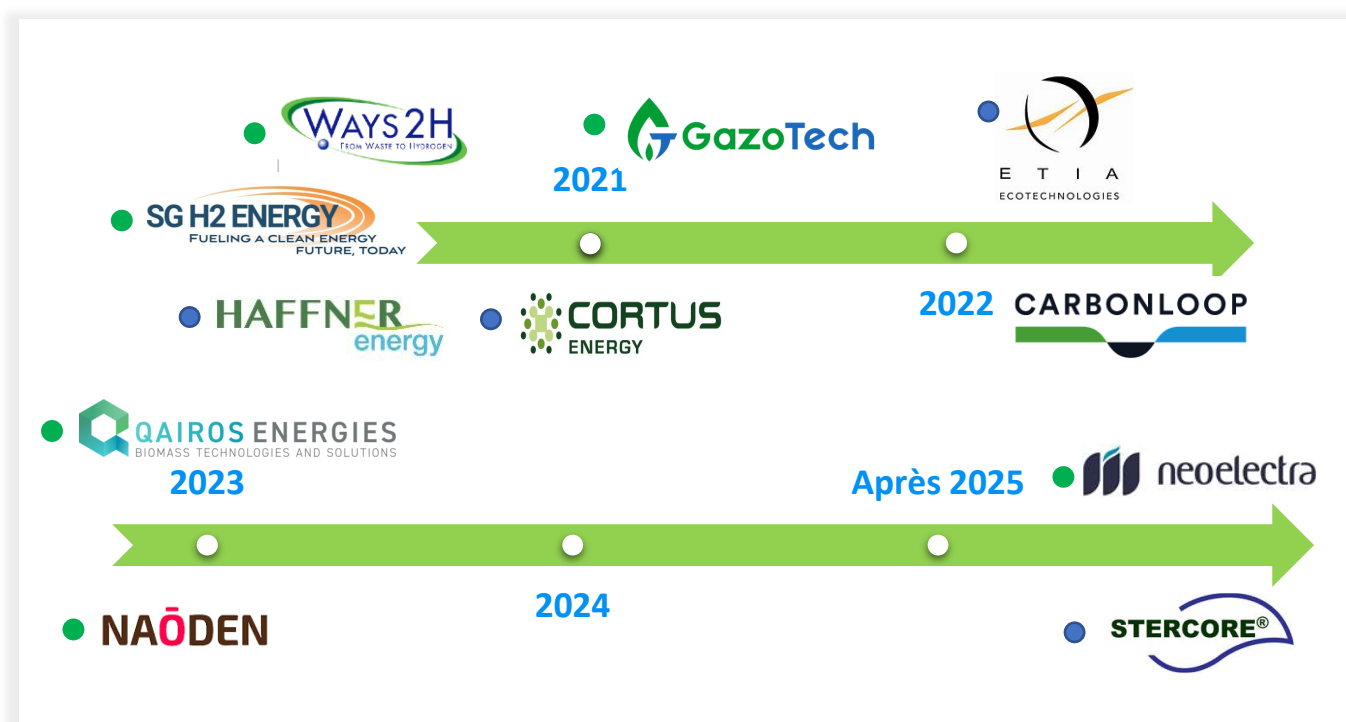
# Production à partir de biomasse

## Marché & aspects économiques

En raison des **CAPEX plus élevés** que la technologie d'électrolyse, les projets actuels ont démontré la nécessité d'avoir une taille minimale de fonctionnement afin d'atteindre un équilibre économique (environ 800 kg biomasse / jour **d'après les différents entretiens menés**). Le coût en **sortie de production de l'hydrogène est annoncé comme inférieur à 5 €/kg H<sub>2</sub>** (rapport IEA 2019) ce qui permettrait d'atteindre l'objectif de 9 €/kg H<sub>2</sub> à la pompe.

Les procédés intermédiaires entre la consommation de biomasse et la production d'hydrogène sont particulièrement nécessaires afin d'obtenir un produit se rapprochant des standards commercialisés (99,999% H<sub>2</sub>).

### Echelle de temps avant commercialisation annoncées des technologies de production d'hydrogène



#### Bibliographie:

Hydrogen from biomass gasification (rapport IEA 2019)

# Production à partir de biomasse

## Acteurs de la filière



### Entreprises Européennes



### Entreprises Hors Europe



# Production à partir de biomasse



**Typologie :** Thermolyse  
**Production hydrogène :**  
 360 kgH<sub>2</sub>/jour par modules standard (4000 Nm<sup>3</sup>/j)  
**Nature de la biomasse :**  
 Bois non traité, bois traité, biomasse agricole



Source : Haffner Energy



**Typologie :** Gazéification  
**Production hydrogène :**  
 Consommation (jusqu'à 30 kt/an)  
 En développement pour l'hydrogène  
**Nature de la biomasse :** CSR, bois type A et B  
 Démonstrateur en 2021



Source : Etia



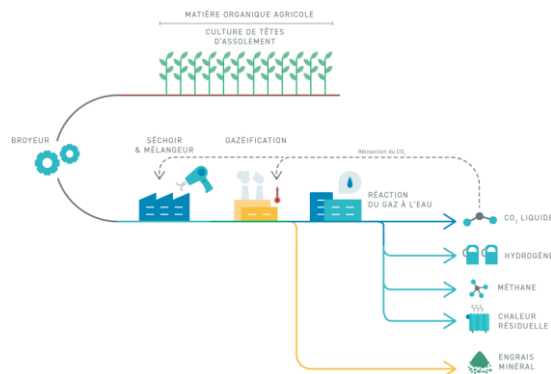
**Typologie :** Pyrolyse  
**Production hydrogène :** 1000 Nm<sup>3</sup>/jour  
**Nature de la biomasse :** Bois non traité



Source : Cortus



**Typologie :** Gazéification  
**Production d'hydrogène :** 3,5 tonnes/jour par unité pour l'industrie et la mobilité  
**Nature de la biomasse :** Résidus de chanvre



Source : Qairos Energies



# Production à partir de biomasse



**Gazotech (Groupe Ankur)**

**Typologie :** Gazéification

**Nature de la biomasse :**

CSR, bois type A et B

*En cours de commercialisation pour la production hydrogène*



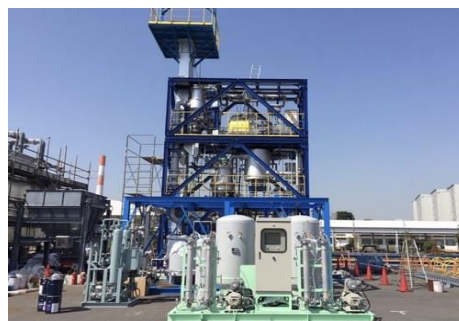
Source : Groupe Ankur



**Typologie :** Gazéification

**Production hydrogène :** 50kg H<sub>2</sub> par type d'intrants

**Nature de la biomasse :** Biomasse déchets



Source : Groupe Ways2H



**SGH2 (porté par Eco'R)**

**Typologie :** Gazéification

**Production hydrogène :** 4 000 t d'H<sub>2</sub>/an

**Nature de la biomasse :** CSR, bois type A et type B



Source : SGH2



**Typologie :** Thermolyse

**Production hydrogène :** > 800 kg H<sub>2</sub>/jour

**Nature de la biomasse :** Bois non traité

**Commercialisation :** 2022

*Service de décarbonation à destination de l'industrie et de la mobilité lourde*



Source : Carbonloop



Entreprise française



Entreprise Européenne



Usine en France



Membre de France Hydrogène

# Production à partir de biomasse

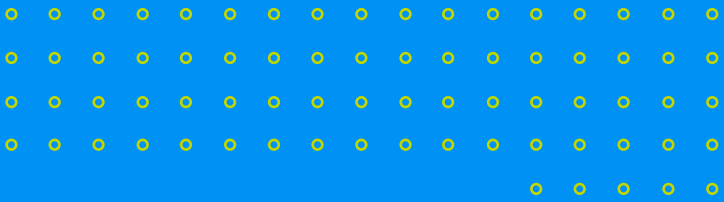


## **Solution en développement:**

Accompagnement de gestionnaires de territoire dans la mise en place de circuits courts d'approvisionnement biohydrogène :

- identification des ressources agricoles forestières, eaux usées, déchets, masses d'eau continentales (étangs,lacs) ou côtières
- mise en place de pilotes de production et accompagnement lors de leur montée en charge
- valorisation des potentialités conjointes de développement de puits de carbone long terme (biochar par exemple)

Source : Eosys

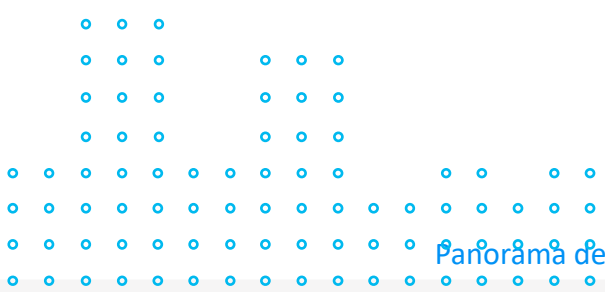
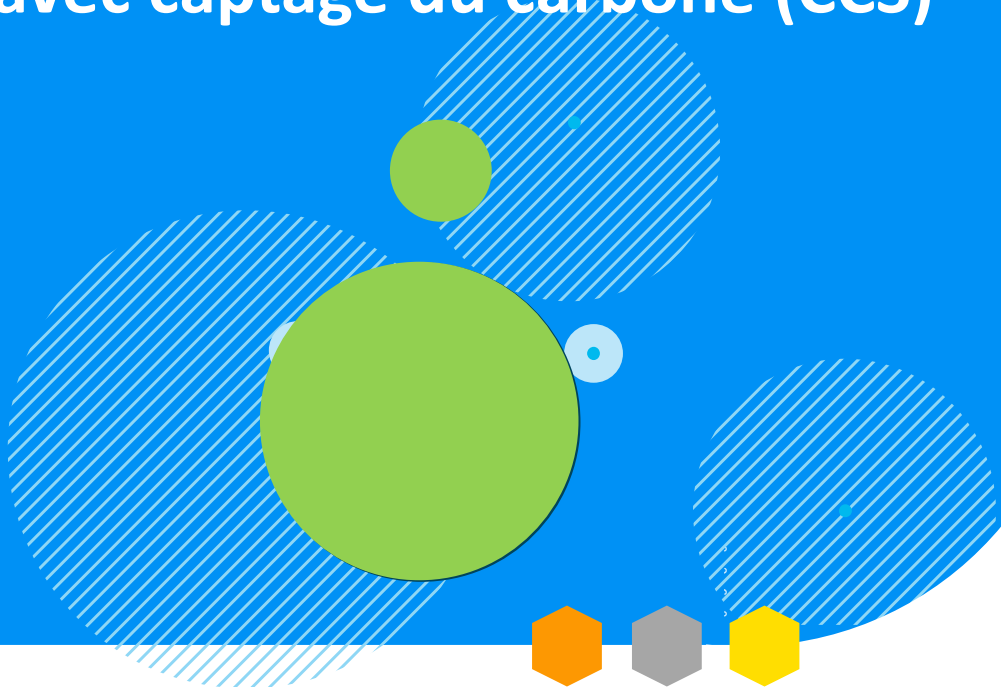


---

# Reformage du Méthane (SMR)

---

avec captage du carbone (CCS)



# Reformage du méthane avec captage du carbone

## Principes généraux

Le procédé de production d'hydrogène le plus utilisé dans le monde est le vaporeformage du méthane (SMR). Ce dernier se compose généralement de 3 étapes :

Reformage catalytique :  $\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO} + 3\text{H}_2$

Conversion Water Gas Shift (WGS) :  $\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2$

Epuration (PSA) : Le mélange  $\text{CO}_2 + \text{H}_2$  est ensuite épuré pour produire un  $\text{H}_2$  à pureté élevée.

L'hydrogène résultant est qualifié de carboné (ou d'hydrogène gris) car sa production émet une grande quantité de  $\text{CO}_2$  et est issue d'énergies fossiles. Aujourd'hui, **94% de l'hydrogène produit dans le monde est gris.**

Au-delà de l'optimisation continue des procédés sur les aspects consommations énergétiques et coûts, plusieurs tendances sont intéressantes à noter :

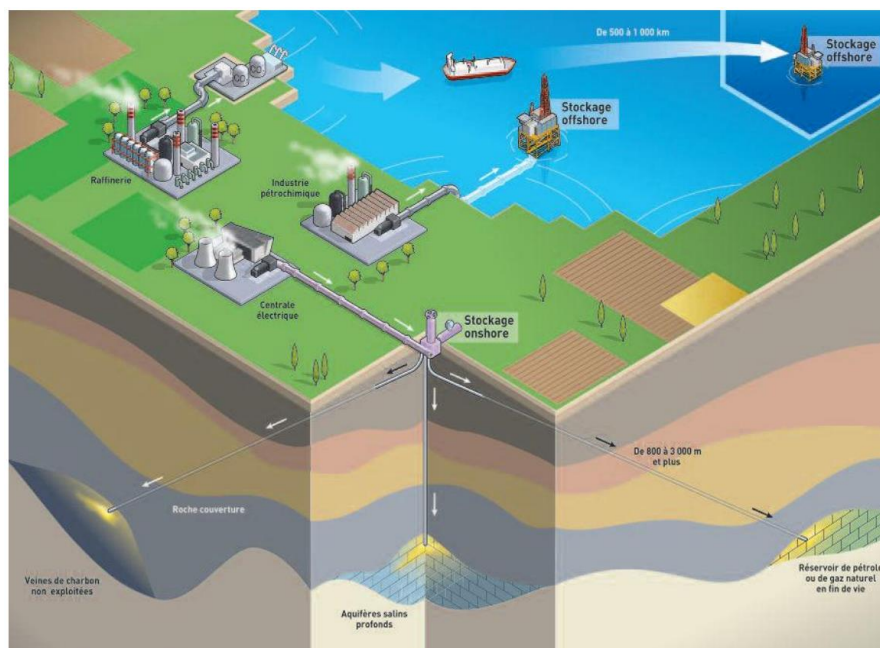
Le captage de  $\text{CO}_2$  émis sur les unités de SMR, pour pouvoir produire un hydrogène bas carbone (ou hydrogène bleu).

Ce  $\text{CO}_2$  capté est ensuite soit :

Stocké :  
CCS - « Carbon Capture and Storage »

Valorisé :  
CCU - « Carbon Capture and Utilization »

## Principe du CCS – « Carbon Capture and Storage »



# Reformage du méthane avec captage du carbone

## Marché & aspects économiques

### La technologie de CCS

#### « Carbon Capture and Storage »

La technologie du captage-stockage du CO<sub>2</sub> (CCS-Carbon Capture and Storage) consiste à capter le CO<sub>2</sub> dès sa source de production et à le stocker dans le sous-sol. Elle intéresse les industriels car elle leur permettrait de réduire massivement leurs émissions de CO<sub>2</sub>. Mais cette solution prometteuse doit encore démontrer qu'elle peut être industrialisée à un coût acceptable.

Un déploiement à grande échelle suppose donc :

- une réduction des coûts du captage, l'étape la plus coûteuse de la filière CCS (65-70% du prix total),
- la démonstration des capacités de stockage massif de CO<sub>2</sub> dans les aquifères salins profonds, la maîtrise du confinement du CO<sub>2</sub> et de la sécurité du stockage sur de longues périodes (plusieurs centaines d'années) dans des structures géologiques

Les principaux paramètres déterminant le coût d'une chaîne CCS sont :

- Le coût du captage de CO<sub>2</sub> qui dépend majoritairement de la source CO<sub>2</sub>, de la pureté de CO<sub>2</sub> souhaité et de la technologie de captage mise en œuvre ; les estimations varient entre **15 et 65 €/t CO<sub>2</sub>**.
- Le coût du transport qui varie en fonction du volume, de la distance et du type de transport ; les estimations varient entre **10 et 25 €/t CO<sub>2</sub>**.
- Le coût du stockage qui dépend de la localisation et de la nature de la formation géologique; les estimations varient entre **1 et 20 €/t CO<sub>2</sub>** en fonction de la typologie [onshore ou offshore].

## Coût de revient

Le coût de revient de l'hydrogène en sortie de ce procédé (sans le transport) est estimé entre **1,5 et 2,5 €/kg**.

## La technologie de CCUS

### « Carbon Capture Utilization and Storage »

Le CO<sub>2</sub> pourrait être valorisé comme matière première pour différentes industries (chimie, agroalimentaire, etc.) ou bien pour la récupération assistée des hydrocarbures. Les voies chimiques et biologiques de valorisation sont à l'heure actuelle encore **au stade laboratoire ou pilote**. Il reste à valider la rentabilité et le bilan environnemental de ce procédé.

#### Les utilisations actuelles du CO<sub>2</sub> à un stade commercial :

- La récupération assistée des hydrocarbures (*EOR pour Enhanced Oil Recovery*)
- Dans diverses industries (pour la production de boissons gazeuses, comme CO<sub>2</sub> supercritique ou fluide frigorigène, etc.), pour des applications qui nécessitent généralement un gaz quasiment pur
- La culture de microalgues, dont la production de molécules à haute valeur ajoutée à destination des industries cosmétique et pharmaceutique
- La production d'urée ou d'acide salicylique
- La production de méthane de synthèse par la réaction de méthanation (conversion du dioxyde de carbone en présence d'hydrogène), dont le méthane de synthèse peut être injecté dans les réseaux de gaz naturel existants

N.B. : Les industries intéressées par le CCU sont les industries lourdes, qui ne disposent pas à ce jour de technologies de substitution pour réduire massivement leurs émissions de CO<sub>2</sub> : sidérurgie, cimenterie, raffinage, chimie, pétrochimie.

*Source : Green hydrogen cost 2020 - IEA & IRENA*

# Reformage du méthane avec captage du carbone

## Acteurs de la filière

Cette section comporte deux catégories d'acteurs : les acteurs proposant des solutions de production d'hydrogène par reformage du méthane intégrant une unité de captage du carbone, et les acteurs proposant des solutions de captage de carbone (sans production d'hydrogène).

### Unités de production (avec captage)



### Unités de captage (production non incluse)





# Reformage du méthane avec captage du carbone

## Unités de production (avec captage du carbone)



### Cryocap

**Capacité (H<sub>2</sub>)** : Jusqu'à 200 000 Nm<sup>3</sup>/h soit 430 tonnes H<sub>2</sub>/jour

**Capacité (CO<sub>2</sub>)** : 500-2000 tonnes CO<sub>2</sub>/jour

**Produits** : CO<sub>2</sub> et H<sub>2</sub> (co-produit), augmente la production d'H<sub>2</sub> de 13-20%

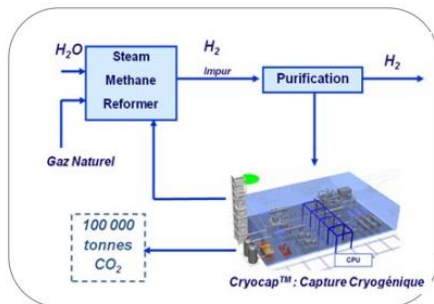


Schéma de principe du projet

Source : Ademe



### Technologies SMR/ATR et CCS

- Technologies Steam Méthane Reforming (SMR) et Auto Thermal Reforming (ATR)
- Technologies de Capture et Séquestration du CO<sub>2</sub> (CCS)
- L'usine de Port Arthur (USA) produit de l'hydrogène bleu depuis 2014 et capte un million de tonnes de CO<sub>2</sub> par an

**Capacité (H<sub>2</sub>)** : 600 tonnes /jour

**Taux de capture** : jusque 95% du CO<sub>2</sub>



Source : Air Products



### Fournisseur de services

Développe et fournit des technologies contribuant à la réalisation de projets pilotes et des plus grands projets CCUS du monde.

- Consultation « pre-FEED & FEED » et conception de projet
- Captage et purification
- Technologie de compression du CO<sub>2</sub> adaptée aux besoins
- Conception et construction de puits pour le stockage
- Maintenance, surveillance et gestion du site

### Nouvelle technologie :

#### « Compact Carbon Capture »

La technologie « Compact Carbon Capture » diffère des solutions traditionnelles de captage du carbone à base de solvants en utilisant des lits rotatifs au lieu de colonnes statiques, distribuant efficacement les solvants dans un format compact et modulaire.

Source : Baker Hughes



### H<sub>2</sub> - 1000

**Capacité (H<sub>2</sub>)** : Jusqu'à 470 Nm<sup>3</sup>/h soit 1000 kg/j

**Capacité (CO<sub>2</sub>)** : environ 10 tonnes CO<sub>2</sub>/jour

**Taux de capture** : 98 % du CO<sub>2</sub>

**Commercialisation**: Disponible

L'unité de production d'H<sub>2</sub> combiné au captage de CO<sub>2</sub> est prévue pour S3 2023 avec la technologie Carbon Clean

### Unité H<sub>2</sub> - Grande échelle

**Capacité (H<sub>2</sub>)** : Jusqu'à 4700 Nm<sup>3</sup>/h soit 10 000 kg/j

**Capacité (CO<sub>2</sub>)** : environ 50 tonnes CO<sub>2</sub>/jour

**Taux de capture** : 98 % du CO<sub>2</sub>

**Commercialisation**: En développement



Source : BayoTech

# Reformage du méthane avec captage du carbone

## Unités de production (avec captage)

# Honeywell

**UOP SELEXOL™ ; SeparALL™**

**Taux de capture :** > 95% du CO<sub>2</sub> du syngas

**Usine à Coffeyville (USA)**

**Capacité (H<sub>2</sub>) :** 200 tonnes H<sub>2</sub>/jour



Source : Honeywell UOP

# gti®

**Pre-combustion carbon capture**

GTI a développé un processus de production d'hydrogène avec une capacité inhérente de séparation du dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>).

**Capacité (H<sub>2</sub>) :**

12-241 kg H<sub>2</sub>/jour

**Produits :** H<sub>2</sub> et CO<sub>2</sub>

(co-produit),

augmente la production

d'H<sub>2</sub> de 10-20%



Source : GTI

# Reformage du méthane avec captage du carbone

## Unités de captage (production non incluse)



### PCC « Post-Combustion Capture »

#### Capacité standard (H<sub>2</sub>) :

50 000 Nm<sup>3</sup>/h soit 107t H<sub>2</sub>/jour

#### Capacité (CO<sub>2</sub>) :

- Usage dans la chimie : 200-2000 t (CO<sub>2</sub>)/jour
- Usage dans l'agroalimentaire : < 500 t (CO<sub>2</sub>)/jour
- Usage pour EOR (Enhanced Oil Recovery) : > 1000 t (CO<sub>2</sub>)/jour

Produits : CO<sub>2</sub> et H<sub>2</sub> (co-produit)



Source : Linde



### Shell Canslov® « CO<sub>2</sub> Capture system »

Shell Catalysts & Technologies a mis au point une technologie brevetée de capture du CO<sub>2</sub> utilisant un solvant à base d'une amine régénérable.

### Usine à Alberta (Canada) – Projet Quest

Capacité (H<sub>2</sub>) : 900 tonnes H<sub>2</sub>/jour

Capacité (CO<sub>2</sub>) : 1,128 million de tonnes CO<sub>2</sub>/an

Taux de capture : récupère 80% du CO<sub>2</sub> du syngaz

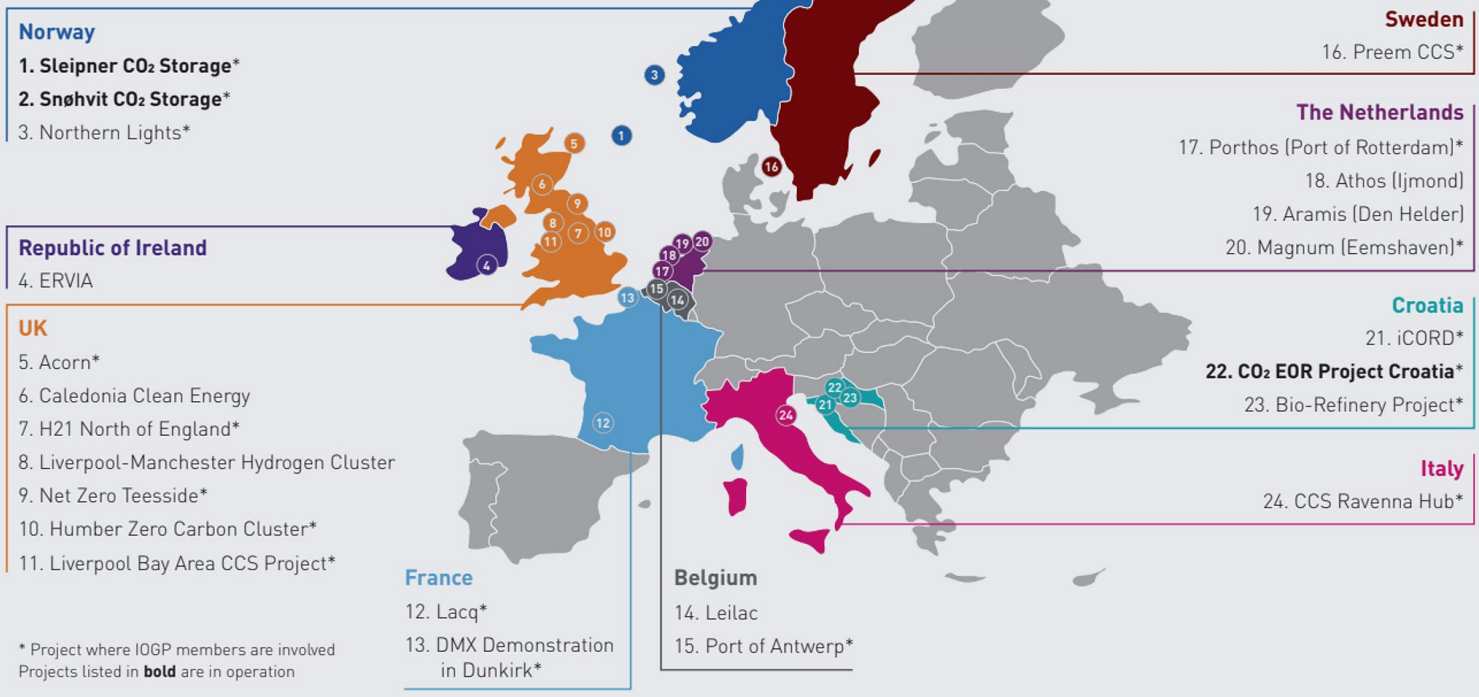


Source : Shell

# Reformage du méthane avec captage du carbone

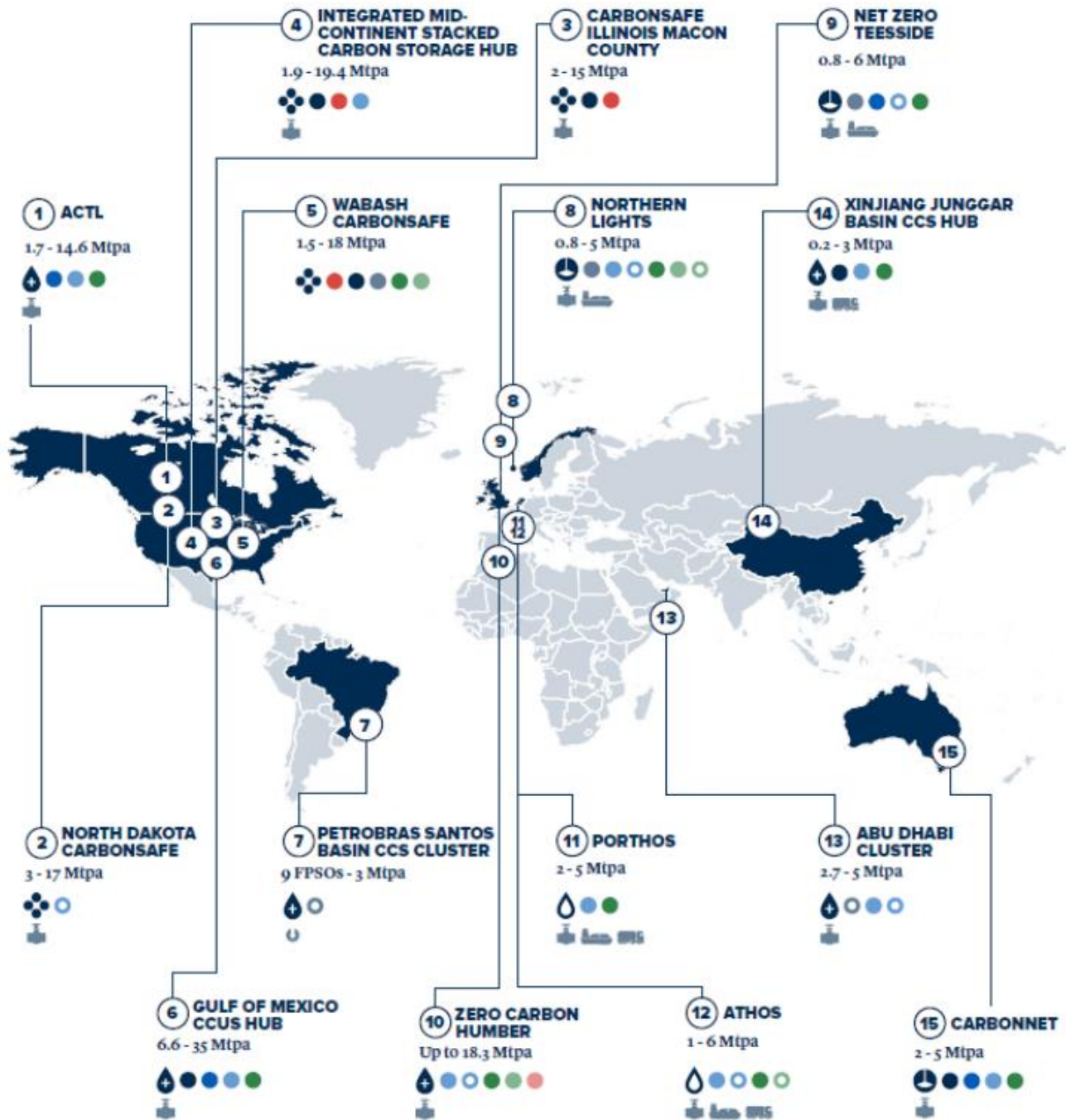
## Projets de CCUS en cours et à venir en Europe

Overview of existing and planned CCUS facilities



Source : <https://gasnaturally.eu/about-gas/clean-hydrogen-and-ccs-for-europe/>

# Hubs & clusters de CCS en 2019



## INDUSTRY SECTOR

- COAL FIRED POWER
- NATURAL GAS POWER
- NATURAL GAS PROCESSING
- FERTILISER PRODUCTION
- HYDROGEN PRODUCTION
- IRON AND STEEL PRODUCTION

- CHEMICAL & PETROCHEMICAL PRODUCTION
- CEMENT PRODUCTION
- WASTE INCINERATION
- ETHANOL PRODUCTION
- BIOMASS POWER

## STORAGE TYPE

- DEEP SALINE FORMATIONS
- ENHANCED OIL RECOVERY
- DEPLETED OIL AND GAS RESERVOIRS
- VARIOUS OPTIONS CONSIDERED

## DELIVERY

- PIPELINE
- SHIP
- ROAD
- DIRECT INJECTION

Source : <https://gasnaturally.eu/about-gas/clean-hydrogen-and-ccs-for-europe/>

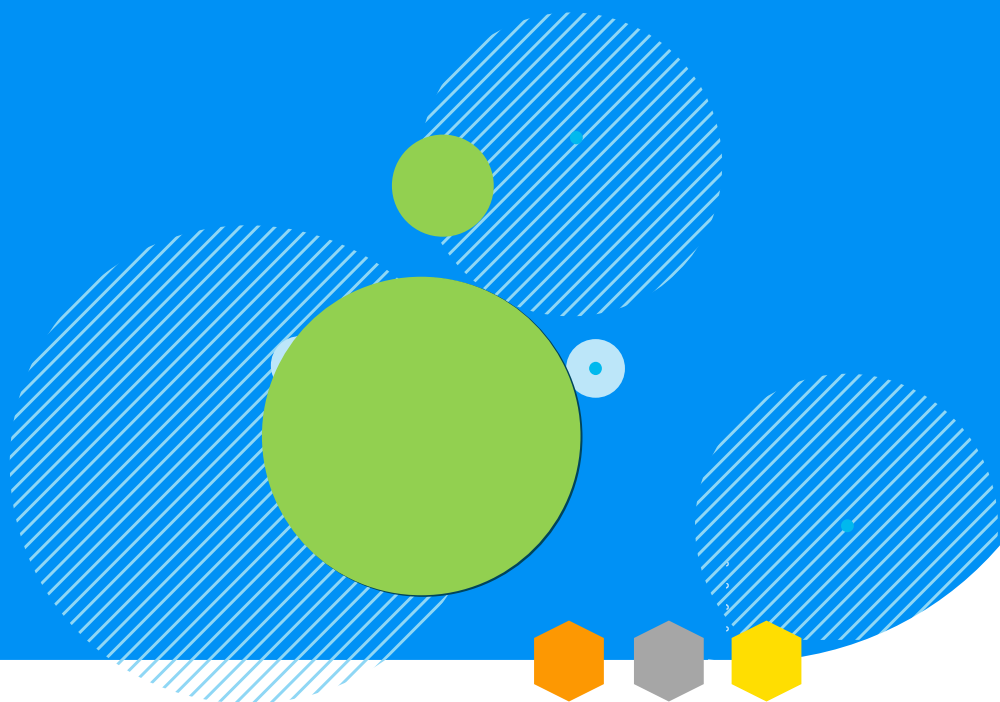




---

# Pyrolyse du méthane

---





# Pyrolyse du méthane

## Principes généraux

La pyrolyse du méthane est un **procédé de décomposition thermique du méthane**. Pour obtenir des taux de réaction et de conversion du méthane techniquement pertinents, **la température de fonctionnement doit être considérablement élevée** et diffère selon les voies existantes : nous notons des températures supérieures à 800 °C pour les procédés catalytiques, supérieures à **1000 °C** pour les procédés thermiques sans catalyseur et jusqu'à **2000 °C** pour les torches à plasma.

La réaction principale de la pyrolyse du méthane est endothermique et produit du carbone solide et de l'hydrogène gazeux :



Le principal avantage de cette méthode est qu'elle est **thermodynamiquement beaucoup moins énergivore que la dissociation de l'eau**, car elle nécessite environ six fois moins d'énergie par kilo d'hydrogène produit (10-20 kWh<sub>el</sub>/kgH<sub>2</sub> contre 55-60 kWh<sub>el</sub>/kgH<sub>2</sub> **d'après le retour des acteurs de la pyrolyse du méthane**). Un autre avantage est **qu'elle permet la coproduction de deux produits valorisables**, respectivement le carbone solide et l'hydrogène.

**Il existe plusieurs procédés de pyrolyse du méthane envisagés à ce jour pouvant être classés en 4 grandes familles :**



- Il n'existe pas encore d'offre finalisée à échelle industrielle (TRL 9) de cette technologie sur le marché,
- La maturité des solutions identifiées varie de l'échelle laboratoire (TRL 4) jusqu'au pilote industriel (TRL 6-8)



---

# Hydrogène natif

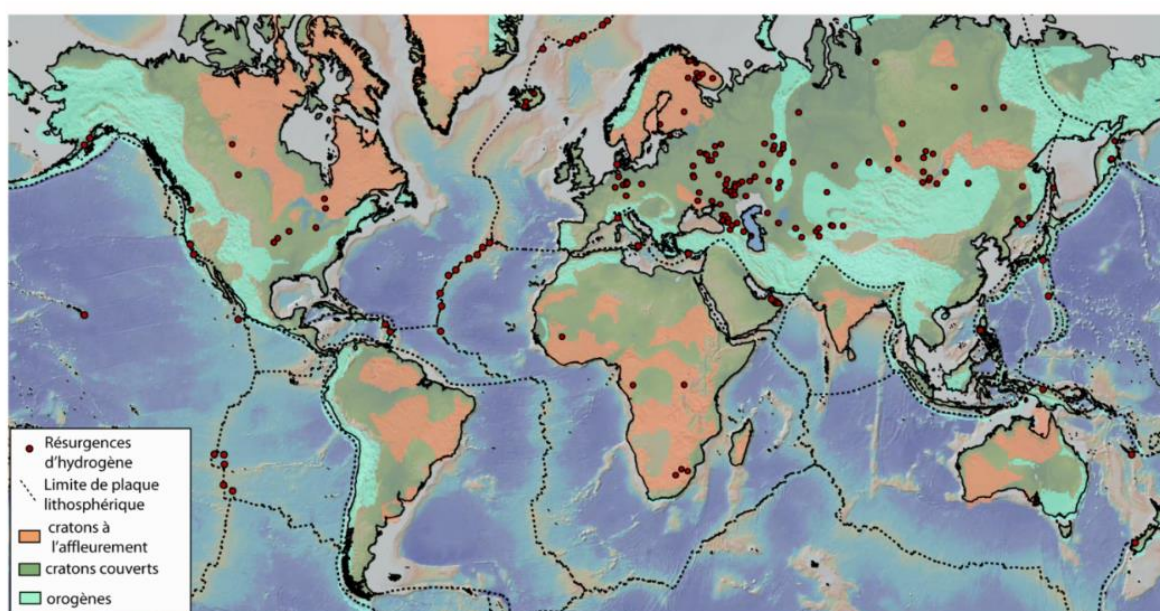
---



# Hydrogène natif

Les premières découvertes de gisements d'hydrogène naturels ont été détectées dans les années 1970 sur les systèmes hydrothermaux océaniques, suivi par la suite de découvertes à terre. Jusqu'à il y a peu, les gisements d'hydrogène naturels ont constitué une curiosité géologique mais des découvertes récentes laissent entrevoir un potentiel d'exploitation d'hydrogène naturel.

Selon les études scientifiques en cours, il ne s'agit pas d'hydrogène fossile, mais d'une production continue, renouvelable et native. Un gisement a été découvert en 2021 en France à partir d'olivine.



*Cartographie des émanations d'hydrogène naturel, Source : IFP énergies nouvelles*

## Caractéristiques

L'hydrogène naturel se caractérise par :

- Plusieurs gisements à la surface du globe
- Des productions estimées variant de quelques tonnes à plusieurs milliers, voire dizaines de milliers de tonnes par an
- Des coûts de production visés sont proches de ceux des gaz fossiles (0,1 à 1 USD/kgH<sub>2</sub>) (d'après le retour des acteurs de l'hydrogène natif)
- Un grand intérêt et de forts potentiels, mais encore de nombreuses inconnues typiques des projets de sous-sols

## Statut / tendance

- L'hydrogène naturel connaît un engouement récent auprès des acteurs du sous-sol. Les projets nécessitent néanmoins un temps important pour être développés (5 à 10 ans) passant par différentes étapes (études, obtention de permis, forages exploratoires, forages de production) visant à réduire les risques.
- 1<sup>ère</sup> conférence mondiale « **H<sub>2</sub>nat summit** » en Juin 2021 (<https://www.hnatsummit.com/>)
- Le TRL de cette technologie est de 4-5, mais pourrait progresser fortement dans les prochaines années.



*Production d'électricité par Hydrogène Naturel au Mali sur le site pilote de Bourakébougou (1<sup>ère</sup> mondiale) , source Hydroma inc*

# Hydrogène natif

## EOSYS

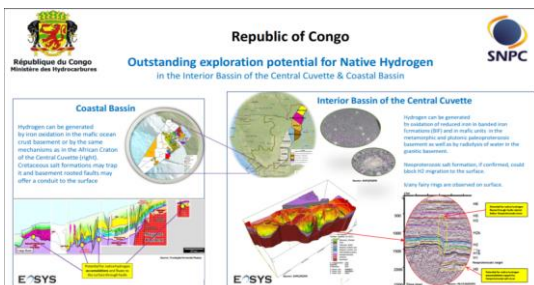


### Solution :

- Prospection en vue de l'acquisition de permis miniers
- Mise en évidence de ressources H<sub>2</sub> naturel, exploration géologique de la ressource H<sub>2</sub> naturel + évaluation ressources/réserves via de la géophysique et des forages exploratoires

### Projets :

- France et export, Confidentiel



Source : Eosys

## 45-8 energy



### Solution :

- Opérateur de projet H<sub>2</sub> naturel
- Services pour l'exploration géologique de la ressource H<sub>2</sub> naturel (géophysique, prélèvement)
- Capteur IoT pour détecter les flux de H<sub>2</sub> (technologie HEMT)



### Solution :

Services pour l'exploration géologique de la ressource H<sub>2</sub> naturel + évaluation ressources/réserves via de la géophysique et des forages exploratoires

### Projets :

- H<sub>2</sub>NA labellisé Pole Avenia (avec Engie, BRGM, UPPA, 45-8Energy)
- [DjiboutHy](#) (avec 45-8Energy, Infogeo, UPPA, IFPEN)

## HYDROMA

### Bloc 25

### Solution :

Campagne de forage débouchant à l'identification de 5 grands réservoirs d'hydrogène naturel.

### Projets :

Compression de l'hydrogène à 300 bars pour transport par voie maritime.  
Production d'ammoniaque envisagée.



Entreprise française



Entreprise Européenne



Usine en France



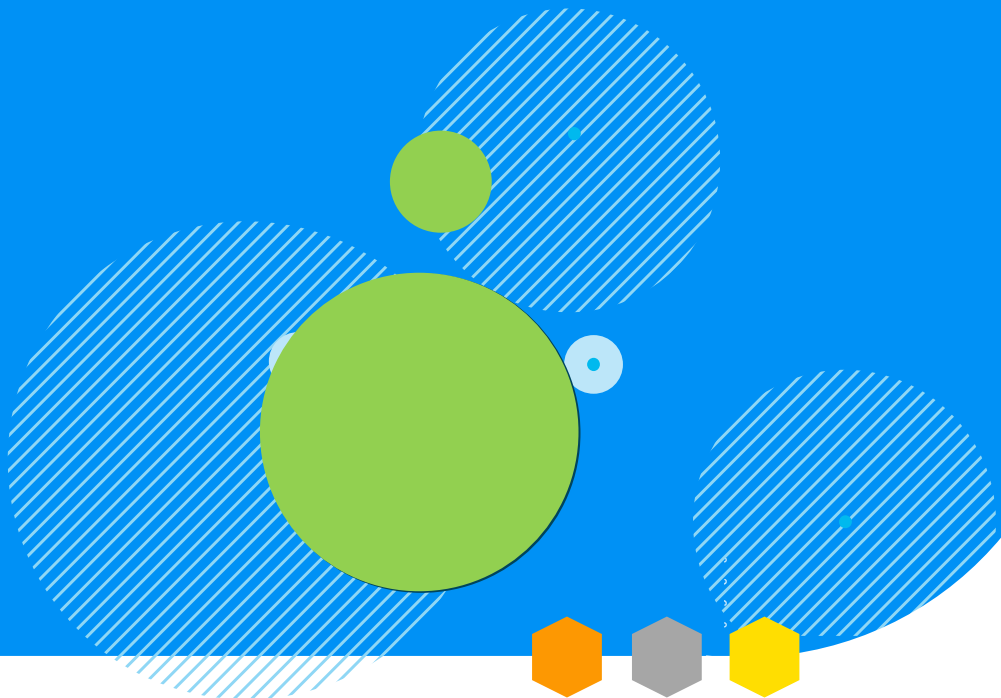
Membre de France Hydrogène



---

# Autres types de production

---





# Autres types de production

D'autres procédés de production d'hydrogène à fort potentiel sont en cours de développement pour des stades moins matures sur leurs offres commerciales que les autres technologies présentées précédemment.



## Gazéification hydrothermale

- Procédé permettant de transformer de la matière carbonée humide en gaz de synthèse ( $\text{CH}_4$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{CO}_2$ )
- Production d'hydrogène à partir du traitement d'effluents liquides organiques (boues de stations d'épuration, effluents d'activités industrielles et effluents d'élevage)
- Des pilotes et démonstrateurs sont en fonctionnement en Europe pour atteindre l'échelle industrielle à l'horizon 2023/2025



## Photocatalyse

- Production d'hydrogène par reformage photocatalytique
- Technologie d'oxydation avancée, qui repose sur l'activation d'un semi-conducteur par la lumière.
- Le procédé consiste au traitement de molécules organiques par l'utilisation de textiles luminescents photocatalytiques

Source : Brochier technologies



## Photoélectrochimie

- Procédé utilisant des cellules qui, exposé à la lumière décompose l'eau en oxygène et hydrogène
- Relative instabilité thermique et chimique de ses constituants et rendement de 15%
- Co-produits (Chlore-alcalin)



## Gazéification par plasma

- Production d'hydrogène à partir de tout types de déchets : résidus de broyage, pales d'éoliennes, pneus de voiture, déchets industriels...
- Les déchets sont décomposés au niveau atomique dans un réacteur à plasma > 3000 °C
- Co-produits (dioxyde de carbone liquide)

Source : Plagazi

# Autres types de production



## Générateur mobile chimique GIP3

**Production d'H<sub>2</sub> par un procédé chimique basé sur l'attaque sous pression et à haute T° du Silicium pur par la soude caustique en solution aqueuse**

**Production hydrogène : Jusqu'à 3 m<sup>3</sup> en moins de 10 min**

**Commercialisation:** Disponible



Source : SAGIM

# Stockage

H<sub>2</sub>



# Sommaire



## Stockage

Stockage : Principes généraux	55
Stockage sous forme gazeuse	56
Stockage sous forme liquide	67
Stockage sous forme solide	73
Stockage géologique	76



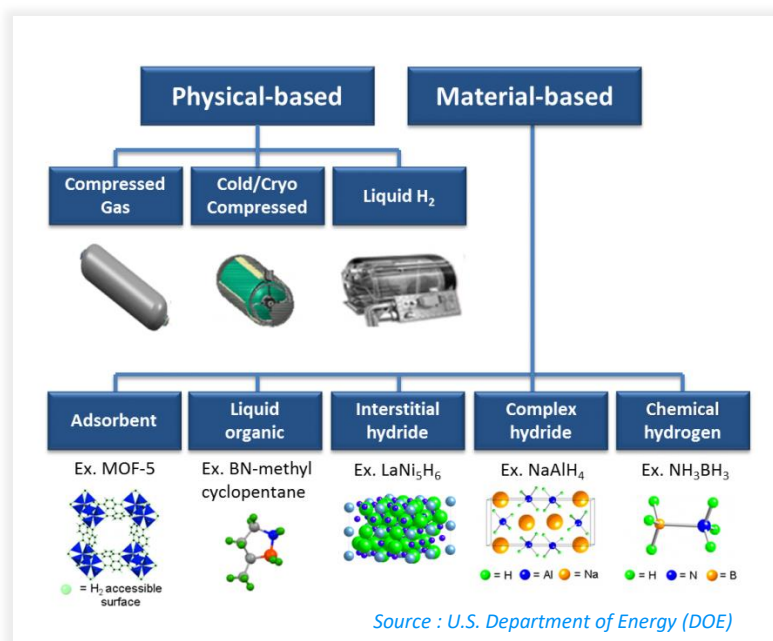
# Le stockage de l'hydrogène

## Principes généraux

L'hydrogène est un gaz ayant une faible densité volumique et occupant donc un volume important à pression atmosphérique. A titre d'exemple, il faut environ 11 m<sup>3</sup>, c'est-à-dire le volume du coffre d'un grand utilitaire, pour stocker seulement 1 kg d'hydrogène, soit la quantité nécessaire pour parcourir 100 km. Afin de faciliter son transport, il est nécessaire de fortement réduire ce volume en comprimant l'hydrogène dans des réservoirs adaptés.

Type de stockage	Caractéristiques
Stockage gazeux	<p><b>Avantages</b> : Technologie mature, prix accessibles</p> <p><b>Inconvénients</b> : Besoin de comprimer à fortes pressions et stockage volumineux</p> <p><b>Applications</b> : Pour mobilité et industrie</p>
Stockage solide	<p><b>Avantages</b> : Pression faible et densité de stockage plus importante qu'en gazeux</p> <p><b>Inconvénients</b>: Apport de chaleur nécessaire au fonctionnement et maturité technologique faible, poids</p> <p><b>Applications</b> : Transports de grandes quantités d'hydrogène et/ou mobilité avec un besoin fort d'autonomie</p>
Stockage liquide	<p><b>Avantages</b> : Transport de grandes quantités d'hydrogène</p> <p><b>Inconvénients</b> : Boil off (évaporation due au réchauffement de l'hydrogène = pertes), coûts élevés de l'équipement, rendement énergétique</p> <p><b>Applications</b> : Usage avec besoins fort d'autonomie et petite consommation et/ou contrainte d'intégration (réservoir cubique par exemple)</p>

### Vue d'ensemble des réservoirs



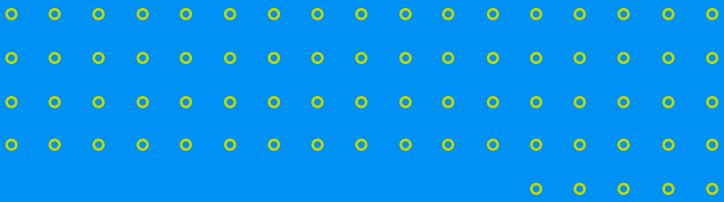
### Densité de l'hydrogène

#### Gazeux :

- CNTP : **0,0898 kg/m<sup>3</sup>**
- 220 bar : **14,885 kg/m<sup>3</sup>**
- 700 bar : **39,6 kg/m<sup>3</sup>**

#### Liquide :


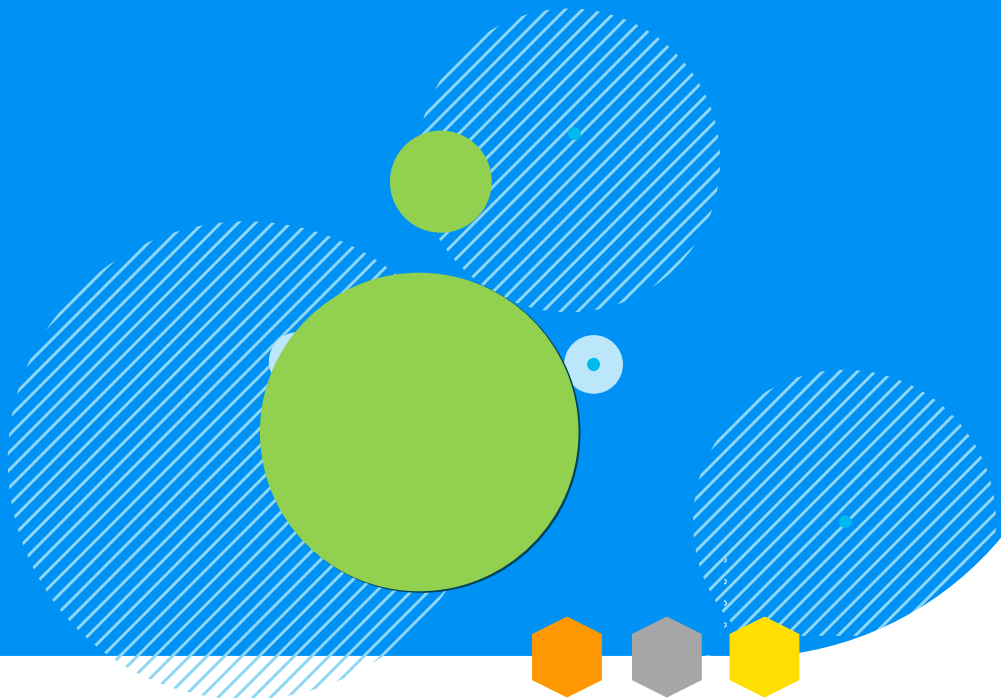
- A pression atmosphérique : **70,9 kg/m<sup>3</sup>**
- Cryo compressé à 350 bar : **80 kg/m<sup>3</sup>**



---

# Stockage sous forme gazeuse (réservoirs)

---



# Le stockage de l'hydrogène

## Principes généraux

La solution aujourd'hui la plus répandue pour stocker et transporter est la compression, généralement à 200 bar, 350 bar et 700 bar.

Il existe 4 catégories de réservoirs classés selon la composition de leurs enveloppes :

### Typologie des réservoirs (Source : EnerKa Conseil)

	Maturité	Coûts	Poids	Quantité d'H <sub>2</sub> associée	Applications recommandées
<b>Type I</b>	Mature	++	-	14,7 kg/m <sup>3</sup> à 200 bar	Transport et livraison d'H <sub>2</sub> , stationnaire
<b>Type II</b>	Mature	+	0	14,7 kg/m <sup>3</sup> à 200 bar	Transport et livraison d'H <sub>2</sub> , stationnaire
<b>Type III</b>	Mature pour P < 450 bar	-	+		Applications mobiles (stockage embarqué)
<b>Type IV</b>	Premières séries de commercialisations pour 700 bar	-	++	42 kg/m <sup>3</sup> à 700 bar	Applications mobiles (stockage embarqué)

### Types de réservoirs :

- Tubes trailers : Tubes, généralement de type I, allant de 6 à 16m pour des stockages stationnaires ou pour le transport d'H<sub>2</sub>
- Bouteilles de stockage 200 bar : Bouteilles, généralement de type I, regroupées dans des cadres
- Bouteilles embarquées : Bouteilles, généralement de type IV, utilisées dans les véhicules hydrogène et qui stockent entre 5 à 12 kg d'hydrogène chacune

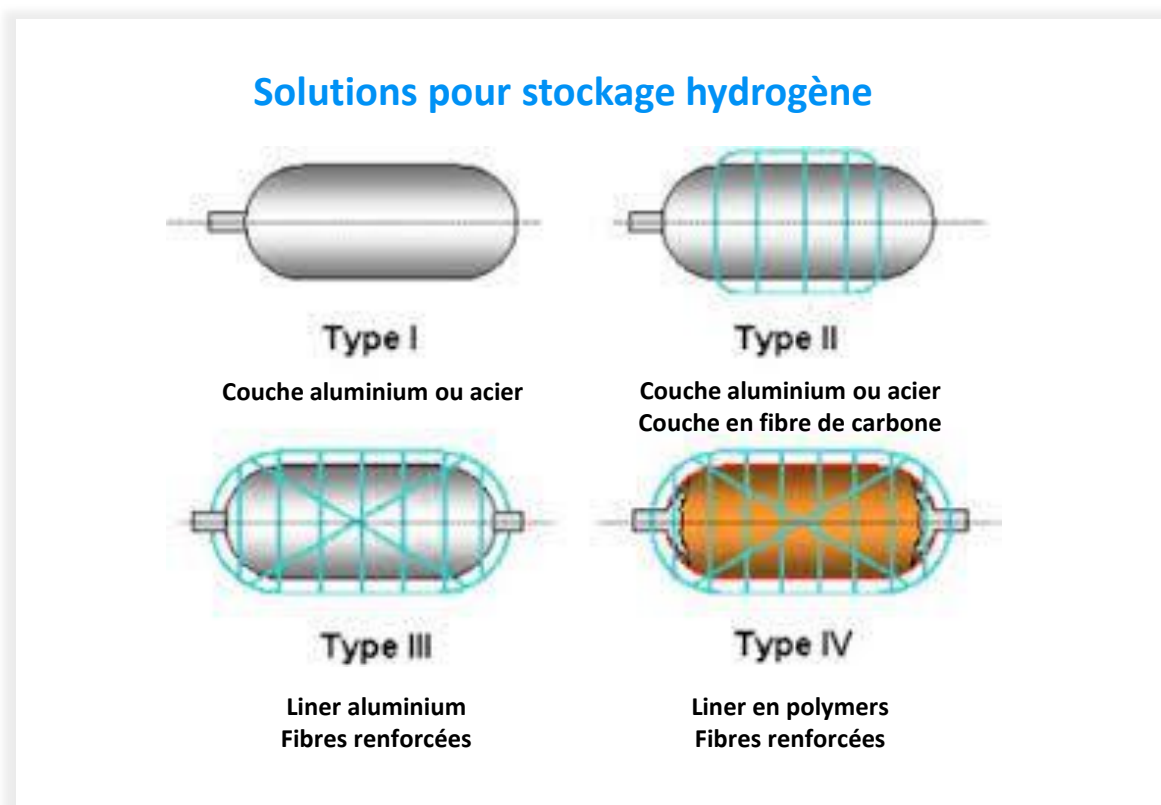
### Durée de vie

La durée de vie dépend de la résine utilisée pour les composites. Il est prévu une durée de vie entre 10 et 20 ans (5 000 à 100 000 pleins selon les réservoirs) selon le type de réservoirs avec une inspection à mi-vie (Données fournisseurs).



## Maintenance

Le stockage ne nécessite que peu de maintenance, la plupart des contrats annoncent 1 à 2 passages par an. Dans ce cadre, des contrôles réguliers sont prévus par des organismes habilités pour les équipements sous pression (inspections régulières visuelles et si besoins tests approfondis).



### **Bibliographie utile :**

- 2019 DOE Hydrogen Storage Cost Analysis ([energy.gov](https://www.energy.gov))

# Stockage gazeux

## Marché & Aspects économiques

**Aspects économiques** (Données EnerKa Conseil)

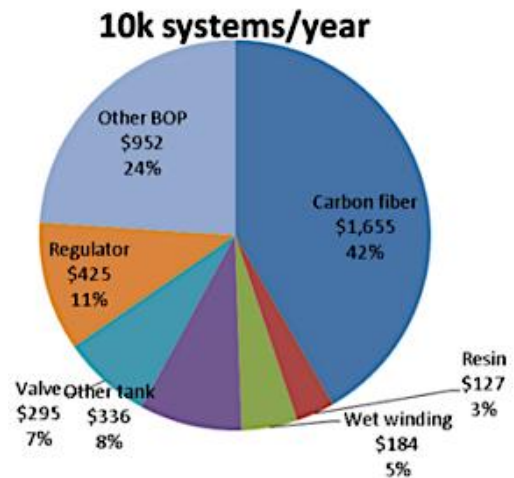
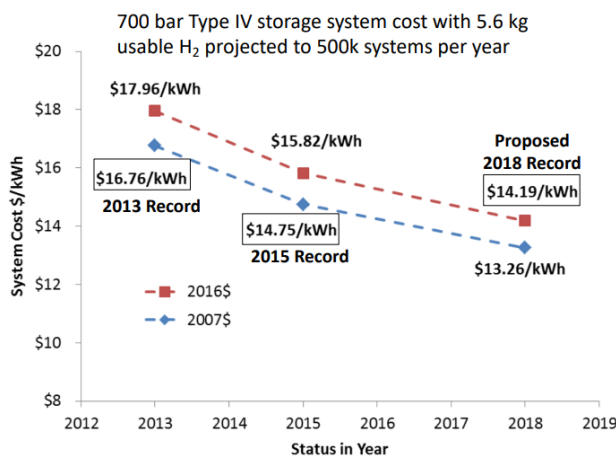
**Type I** : 200 bar : 380-450 €/kg

**Type I** : 300 bar : 400-500 €/kg (type I surtout utilisé pour du stockage stationnaire)

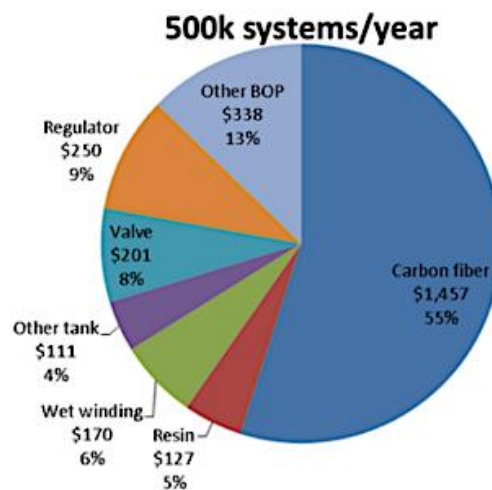
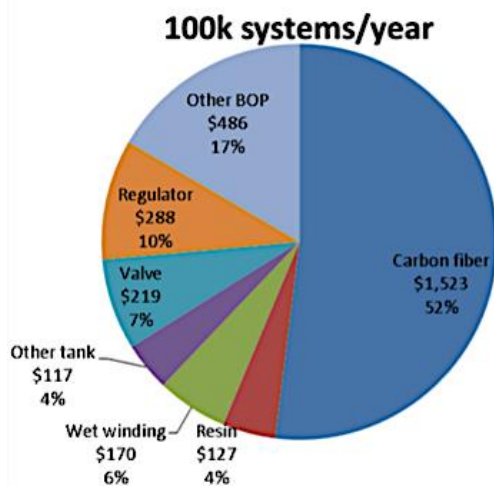
**Type II ou III** : 300-500 bar : Environ 500-700 €/kg

**Type IV** : 700 bar : 600-1000 €/kg

La part de marché pour les réservoirs en matériaux composites est encore relativement faible mais reste très sensible aux effets de volumes. Le passage à l'échelle de la filière et la massification des équipements va permettre une forte baisse des coûts pour les type IV à 700 bar. Entre 2012 et 2018, une baisse de 20% des coûts (\$/kWh) sur les fibres de carbone a été constatée par le Department Of Energy (DOE). Ces fibres représentent environ 50% du coût des réservoirs.



Répartition des coûts sur un système de réservoir (Source : DOE 2019)



# Stockage gaz (réservoirs et containers)

## Acteurs de la filière



### Entreprises Européennes



### Entreprises Hors Europe



沈阳斯林达安科新技术有限公司  
SHENYANG GAS CYLINDER SAFETY TECHNOLOGY CO.,LTD.



# Stockage gazeux (réservoirs)

## Les acteurs du secteur

**FORVIA**  
faurecia



**Applications** : Système de stockage embarqué - Stockage stationnaire et mobile (solution container) pour transport d'hydrogène  
**Typologie** : Type IV  
**Pression maximale** : 350 bar - 700 bar  
**Poids vide** : NC  
**Poids H<sub>2</sub> embarqué** : dépend du besoin  
**Commercialisation** : Disponible



Source : FORVIA Faurecia

**MAHYTEC**  
A Hensoldt Company.



**Applications** : Mobilité maritime, ferroviaire (réservoir carburant) / Tampon pour stations H<sub>2</sub> / transport  
**Typologie** : type IV  
**Pression** : 60 bar à 500 bar  
**Volume en eau** : 150 L à 850 L  
**Poids vide** : 215 kg à 260 kg  
**Poids H<sub>2</sub> embarqué** : max 9,5 kg



Source : Mahytec

**ILJIN**  
Composites

**Applications** : Applications embarquées  
**Typologie** : Type IV  
**Pression maximale** : 700 bar  
**Poids vide** : NC  
**Poids H<sub>2</sub> embarqué** : NC



Source : Iljin

**HEXAGON**  
PURUS



**Applications** : Mobilité terrestre et maritime, aviation, aérospatial, stationnaire  
**Typologie** : Type IV  
**Pression** : de 250 à 950 bar  
**Volume en eau** : de 193 à 1745 L  
**Poids vide** : de 67 à 365 kg  
**Poids H<sub>2</sub>** : de 4,7 à 32 kg  
**Commercialisation** : Disponible



Source : Hexagon Purus



Entreprise française



Entreprise Européenne



Usine en France



Membre de France Hydrogène

# Stockage gazeux (réservoirs)

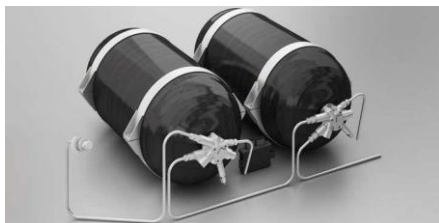
## Les acteurs du secteur



PLASTIC OMNIUM



**Application :** Embarquée  
**Typologie :** Type IV  
**Pression maximale :** 350 et 700 bar  
**Poids vide :** NC  
**Poids H<sub>2</sub> embarqué :** NC



Source : Plastic Omnium



**Applications :** Haute pression  
**Typologie :** Type I  
**Pression maximale :** 450 bar  
**Poids vide :** NC  
**Poids H<sub>2</sub> :** NC



Source Europe : Chesterfield special cylinders



### Fiba Technologies

**Applications :** Stockage stationnaire  
**Typologie :** Type I et type II  
**Pression maximale :** 1034 bar  
**Poids :** 2 à 5,5 tonnes / tube  
**Poids H<sub>2</sub> embarqué :** 16 à 76 kg H<sub>2</sub> /tube



Source : Fiba Technologies



**Applications :** Stockage stationnaire  
**Typologie :** Type I, type II et type III  
**Pression maximale :** 35 - 150 bar  
**Poids vide :** 45 000 kg  
**Poids H<sub>2</sub> embarqué :** max 425 kg H<sub>2</sub>



Source : Reuther



Entreprise française



Entreprise Européenne



Usine en France



Membre de France Hydrogène



# Stockage gazeux (réservoirs)

## Les acteurs du secteur



**Applications :** Stockage embarqué  
**Typologie :** Type IV  
**Pression maximale :** 350 bar et 700 bar  
**Poids vide** max 245 kg  
**Poids H<sub>2</sub> embarqué :** max 24 kgH<sub>2</sub>

Source : Quantum



**Applications :** Stationnaire  
**Typologie :** Type II  
**Pression :** 500 bar - 1000 bar  
**Volume en eau :**  

- 57 L (pour un réservoirs @ 500 bar)
- 50 L (pour un réservoirs @ 1000 bar)

**Poids vide :**  

- 150 kg (pour un réservoirs @ 500 bar)
- 180 kg (pour un réservoirs @ 1000 bar)

**Poids H<sub>2</sub> :**  

- 1,8 kg (pour un réservoirs @ 500 bar)
- 2,5 kg (pour un réservoirs @ 1000 bar)

**Commercialisation:** Disponible (sauf pour le réservoir à 1000 qui est en développement)



Source : ROTH2



**Applications :** Embarqué  
**Typologie :** Type IV  
**Pression maximale :** 350 bar  
**Poids vide :** NC  
**Poids H<sub>2</sub> :** NC



Source Raigi



**Applications :** Drone  
**Typologie :** Type IV  
**Pression maximale :** 350 bar  
**Poids vide :** NC  
**Poids H<sub>2</sub> :** NC



Source : Doosan



# Stockage gazeux (réservoirs)

## Les acteurs du secteur



### H2X T700

**Applications :** Stationnaire, mobilité

**Typologie :** NC

**Pression maximale :** 350 bars

**Volume en eau :** 30 L

**Poids vide :** 25 kg

**Poids H<sub>2</sub> :** 0,7 kg

**Commercialisation :** disponible



Source H2X Ecosystems



**Applications :** Stockage stationnaire  
Réservoirs adaptés aux solutions  
d'alimentation en énergie

**Typologie :** Type I

**Pression maximale :** 300 bar

**Poids vide :** 1600 kg

**Poids H<sub>2</sub> embarqué :** 17,8 kgH<sub>2</sub>



Source : Solenco Power

# STELIA



### Aerospace Composites

**Applications :** Aéronautique,  
automobile, camions, et vélo

**Typologie :** Type IV

**Pression maximale :** 700 bar

**Poids vide :** NC

**Poids H<sub>2</sub> :** NC



Source : STELIA



**Applications :** Applications embarquées

**Typologie :** Type III

**Pression maximale :** 350 -700 bar

**Poids vide :** > 138 kg

**Poids H<sub>2</sub> embarqué :** > 7,8 kgH<sub>2</sub>



Source : Luxfer Gas Cylinders



Entreprise française



Entreprise Européenne



Usine en France



Membre de France Hydrogène

# Stockage gazeux (containers)

## Les acteurs du secteur



### Applications :

Stockage stationnaire, mobile

Marché à la demande, fabrication sur mesure

**Typologie :** Type I à 4

**Pression maximale :** 200 – 500 bar

**Poids vide :** 19 758 pour un container de 20 ft



Source Calvera



### MC 500

**Applications :** Conteneur de multiples réservoirs, stockage et distribution mobile

**Typologie :** Type IV

**Pression maximale :** 500 bar

**Poids vide :** 13 000 kg pour un container de 20 ft

**Poids H<sub>2</sub> :** 450 kg H<sub>2</sub>

**Commercialisation :** Mai/Juin 2022



Source Europe Technologies



**Applications :** Stockage stationnaire ou mobile

**Typologie :** Type IV

**Pression maximale :** 500 bar

**Poids à vide :** jusqu'à 32 000 kg

**Poids H<sub>2</sub> :** jusqu'à 1270 kg

**Commercialisation:** Disponible



Source : Wystrach & Hexagon Purus



**Applications :** Transport

**Typologie :** Type IV

**Pression maximale :** 350 bar

**Poids vide :** NC

**Poids H<sub>2</sub> :** max 46 kg pour type IV

et max 1000 kgH<sub>2</sub> pour le module de transport

**Délais de livraison :** Dépend des options demandées



Source : Umoe

# Stockage gazeux (containers)

## Les acteurs du secteur

### ROTH<sub>2</sub>



**Applications :** Rack de multiples réservoirs stockage stationnaire

**Typologie :** Type I et II

**Pression :** 500 bar - 1000 bar

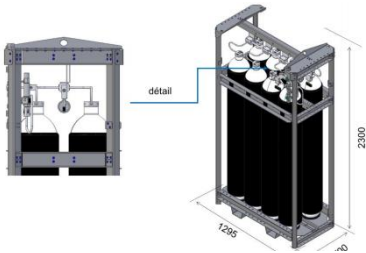
**Poids vide :**

- 5400 kg (pour 36 réservoirs @ 500 bar)
- 1650 kg (pour 8 réservoirs @ 1000 bar)

**Poids H<sub>2</sub> :**

- 62 kg (pour 36 réservoirs @ 500 bar)
- 20,2 kg (pour 8 réservoirs @ 1000 bar)

**Commercialisation :** Disponible (Sauf pur les réservoirs à 1000 bar qui sont en développement)



Source : ROTH2

### BayoTech™

**Applications :** Stockage stationnaire et mobile pour l'industrie, les stations de production et distribution d'H<sub>2</sub>

**Typologie :** type III

**Pression :** 250 bar & 350 bar

**Poids vide :**

- 9 976 kg (pour 60 réservoirs @ 250 bar)
- 13 407 kg (pour 60 réservoirs @ 350 bar)

**Poids H<sub>2</sub> embarqué :**

- 293 kg (pour 60 réservoirs @ 250 bar)
- 390 kg (pour 60 réservoirs @ 350 bar)

**Commercialisation:** Disponible



Source : BayoTech



---

# Stockage sous forme liquide

---

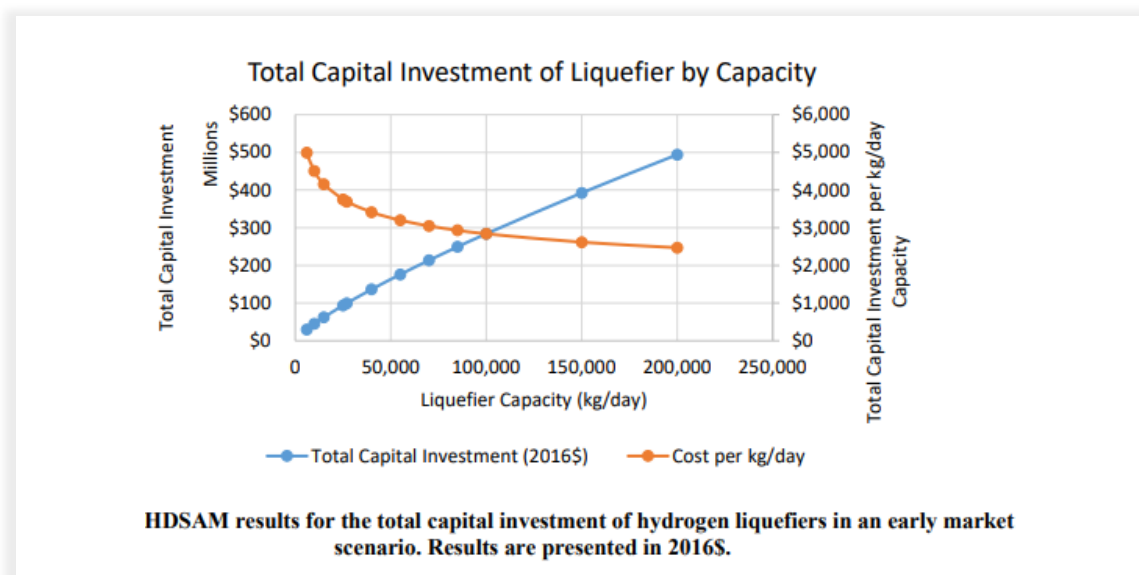


# Stockage liquide

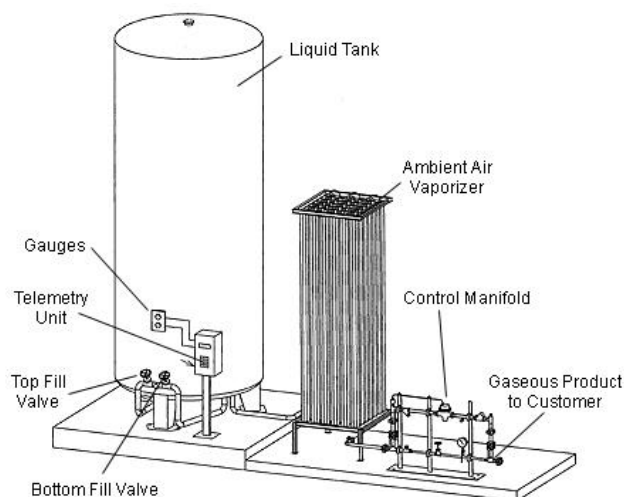
## Principes généraux

Le stockage liquide requiert un maintien de l'hydrogène à des températures basses, son point d'ébullition étant à  $-252,8^{\circ}\text{C}$  à pression atmosphérique. L'hydrogène liquide possède une masse volumique de près de  $71 \text{ kg/m}^3$  correspondant à un stockage d'environ 5 kg d'hydrogène dans un réservoir de 75 litres. (source : Air Liquide)

Le procédé utilisé pour le stockage liquide, basé sur la cryogénie, est déployé pour le transport embarqué ou stationnaire de grandes quantités d'hydrogène (ex : aéronautique). A ce jour le marché le plus mature reste celui de l'aérospatial.



**Système classique.** Source : Air Products



**Caractéristiques** (Données ACER 2021)

- $70,9 \text{ kg/m}^3$  à 1 bar
- Le processus de liquéfaction coûte environ  $1 \text{ \$/kgH}_2$
- Une installation typique comprend en général un réservoir, un vaporiseur et des commandes. Les systèmes sont choisis en fonction des besoins en volume, de la pression souhaitée, du niveau de pureté, du débit et du type de fonctionnement.

*Bibliographie utile*  
 ACER : *Transporting Pure Hydrogen by Repurposing Existing Gas Infrastructure* (16 July 2021)

# Stockage sous forme liquide

## Acteurs de la filière



### Entreprises Européennes



**CRYOLOR**



**CRYOFAB**



**MAN Energy Solutions**

**Cryotherm®**

**ABSOLUT**  
Hydrogen

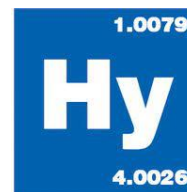


### Entreprises Hors Europe



**SAG**

Progress in Aluminium





# Stockage liquide

## Les acteurs du secteur



**MAN Energy Solutions**



**Applications :** Application à terre ou marine (AiP de DNV 2018)

**Volume réservoir :** 50 – 300 m<sup>3</sup>

**Pression de design :** 9 barg max

**Commercialisation :** disponible



Source: Man Es

# SAG

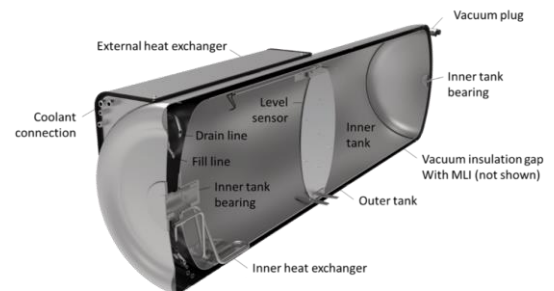
Progress in Aluminium

**Applications :** Véhicule (voiture, camion, remorques)

**Volume réservoir :** 400 L

**Pression de design :** jusqu'à 10 barg (sécurité à 20 barg)

**Disponibilité :** Pilotes



Source : SAG



**Applications:** Production d'énergie, Transport, Stockage, Maritime, Aéronautique

**Volume du réservoir :** de 10 à 1 500 m<sup>3</sup>

**Pression de design :** de 2 à 12 barg (standard)

**Commercialisation :** disponible



Source : Chart Industries



**Applications:** Système de stockage embarqué d'hydrogène liquide pour de la mobilité lourde

**Typologie :** NC

**Pression de design:** 10 barg max

**Poids à vide :** NC

**Poids H<sub>2</sub> embarqué :** 35 kg LH<sub>2</sub>

**Commercialisation:** disponible



Source : Chart Industries

# Stockage liquide

## Les acteurs du secteur



Réservoirs isolés sous vide à double paroi pour hydrogène liquide.

**Applications :** Mobilité et Industrie

**Volume réservoirs :** 20 – 75 m<sup>3</sup> (horizontaux et verticaux)

**Pression de design :** 9,9 barg à 12 barg

**Commercialisation :** disponible



Source : Air Liquide



**Applications :**

Transport à basse pression, Stockage et distribution d'hydrogène liquide

**Capacité réservoir :** jusqu'à 400 L



Source : Cryofab



**Applications :**

Stockage et le transport dans la recherche et l'industrie

**Volume du réservoir :** 202 L

**Pression de design :** 6 barg max



Source : Cryotherm



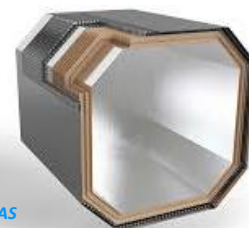
**Application :** Maritime

**Solution :**

Membrane de stockage d'hydrogène liquide sur équipement de stockage

- 2 plaques d'acier inoxydable séparées par des membranes isolantes
- Isolation thermique et fuites

**Maturité :** Technologie validée par DNV



Source : Offshore Energy IC Technology AS liquid hydrogen containment system 2021

# Stockage liquide

## Les acteurs du secteur



**Applications :** Stockage stationnaire, embarqué (Off-road, engins, bateaux, Vtol...)

**Solution:**

- Stockage d'hydrogène sous forme liquide
- Solution clé-en-main accompagnée d'un ensemble des systèmes de sécurité
- Solution zéro boil-off : Gestion des évaporations possible par cycle de reliquéfaction ou isolation active.

**Pression de design :** 2 ou 3 bar

**Commercialisation :** En développement

Source : Absolut Hydrogen



**Applications :**

Drone, automobile, camion, maritime, transport, stockage stationnaire longue durée

**Volume du réservoir :** jusqu'à 39 m<sup>3</sup>

**Pression de design :** 12 barg max



Source : Hylium Industries



---

# Stockage sous forme solide

---



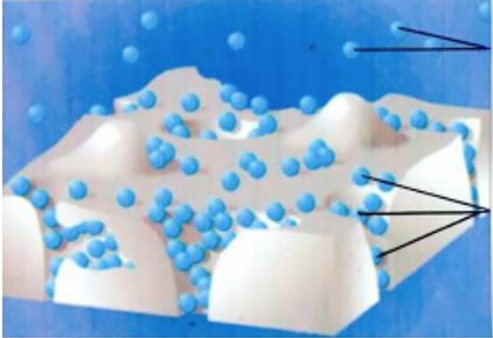
# Stockage solide

## Principes généraux

L'hydrogène est stocké par l'intermédiaire d'hydrures métalliques par mécanisme d'adsorption, c'est-à-dire que la molécule de gaz se fixe sur un métal support (poudre). Le stockage ou la libération de l'hydrogène se fait par variation de température (lancement des réactions chimiques) via un apport de chaleur au système.

Les recherches sont axées sur l'augmentation de la capacité de stockage, théoriquement très élevée. Cette forme de stockage n'est pas adaptée à toutes les utilisations notamment du fait du poids généralement élevé de ces solutions.

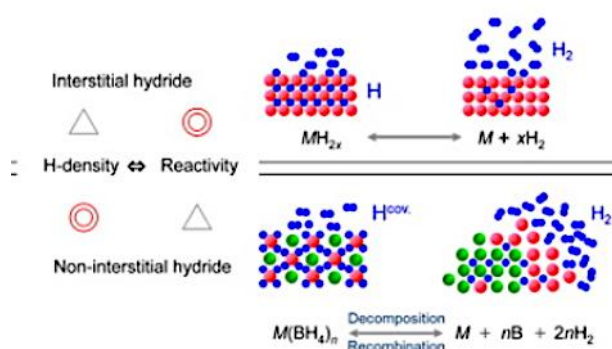
**Modélisation de la physisorption**



1 – molécules libres (phase gazeuse)  
2 – molécules adsorbées en surface et dans les pores (phase adsorbée)

### Caractéristiques (Données ACER 2021)

- Densité encore faible (80 à 150 g/L d'encombrement) du gaz stocké.
- Les usages sont de niches : laboratoire, système avec faible volume de stockage et stockage embarqué.



### Projets :

- COSMHYC XL : Couplage de stockage solide et de compression mécanique
- HYDRIDE4MOBILITY : Stockage solide d'hydrogène sur des chariots élévateurs

### Bibliographie

- Allan Chen : *Research Highlights : A solid hydrogen storage solution*
- E. Rivard et al. : *Hydrogen Storage for Mobility: A Review (2019) Centre of Excellence in Transportation Electrification and Energy Storage, Hydro-Quebec*
- *Perspectives and challenges of hydrogen storage in solid-state hydrides (Z. Chen et al. 2021)*

# Stockage

## Stockage solide



**Solution :** Stockage sur hydrure  
Cadre avec réservoirs, instrumentation, contrôle et sécurité.

**Type :** FeTi (Fer / Titane)

**Caractéristiques :**

- 100 bar max, faible échauffement
- Poids hydrogène stocké : Quelques grammes à quelques kilos

**Applications :**  
Stationnaire, transport ou mobilité spéciale

**Disponibilité :**  
2021



Source Mahytec



**Solution :**

Gammes de réservoirs de stockage d'hydrogène sous forme solide

**Caractéristiques :**

- Poids hydrogène stocké : 150 g à 50 kg

**Applications :**

**Stationnaires**

Site isolé

Groupe électrogène

**Mobiles**

Bateaux maritimes

Engins terrestres



Source : Mincatec Energy



**GKN Hydrogen**

**Solution :**

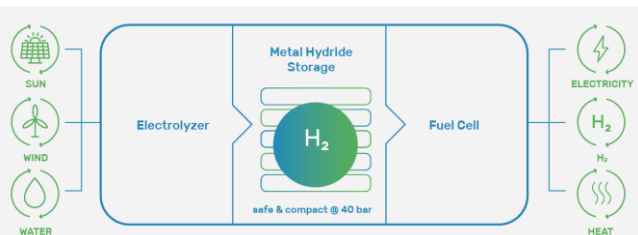
Solution complète génération d'hydrogène et stockage solide

**Caractéristique :**

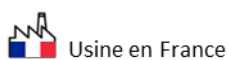
- Poids hydrogène stocké : 10 à 260 kg

**Applications :** Station de distribution, stockage, industrie, micro grids

**Disponibilité :** NC



Source : GKN Hydrogen







---

# Stockage géologique

---



# Stockage géologique

## Stockage souterrain

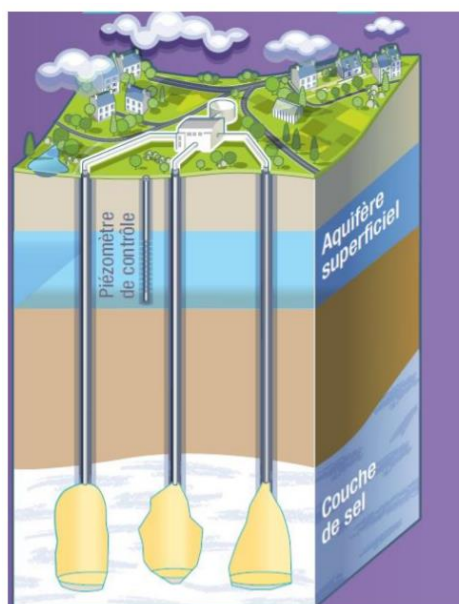
Le stockage souterrain est envisagé dans les infrastructures H<sub>2</sub> de grande ampleur (Dorsale Européenne), sur le modèle du gaz naturel. Plusieurs technologies sont à l'étude (complémentaires selon leur localisation, maturité...). Le stockage souterrain est une solution envisagée sur plusieurs projets en France dans certaines zones géologiques particulières et selon les besoins des territoires.

### Typologie :

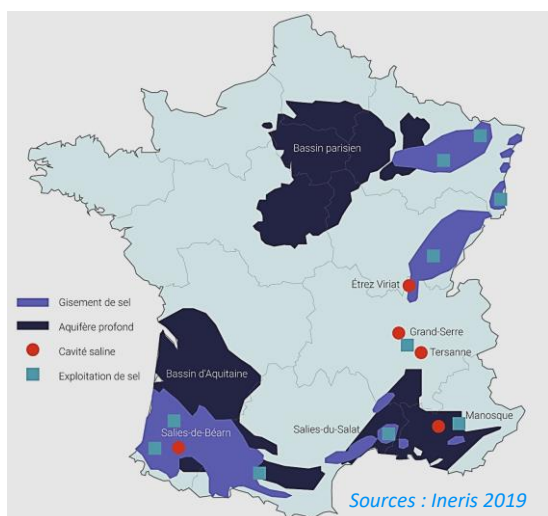
- Cavité saline : En développement avec premiers pilotes
- Champs déplété ou aquifère : premiers pilotes d'ici 3 ans – 5 ans (Données fournisseurs)
- Cavités minées revêtues : ~ 10 ans (Données fournisseurs)

### Caractéristiques (Données ACER 2021)

- Volume type par cavité : **100 000 m<sup>3</sup>**
- Capacité / cyclage : **1 semaine à 1 mois**
- Masse utile : **2 000 à 4 000 tonnes de H<sub>2</sub> par cavité saline.**
- Pression haute : 100 bar (typique)
- Coûts : 0,18 à 1,34 €/kg H<sub>2</sub>



Sources : Ineris 2019 Stockage souterrain hydrogène dans le cadre de la transition énergétique



Sources : Ineris 2019



H<sub>2</sub> storage potential (repurposed only):  
 ▲ Potential H<sub>2</sub> storage: Salt cavern  
 ▼ Potential H<sub>2</sub> storage: Aquifer

Source : GIE 2021 Hydrogen backbone

### Bibliographie utile

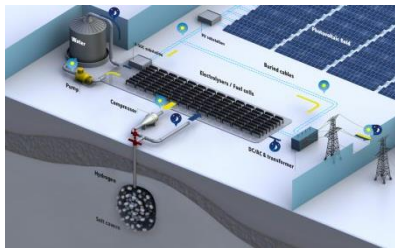
- Maitrise des risques et impacts, INERIS, 2019
- Perspective Européenne, Gas infrastructure Europe, Juin 2021,

# Stockage massif

## Cavité saline



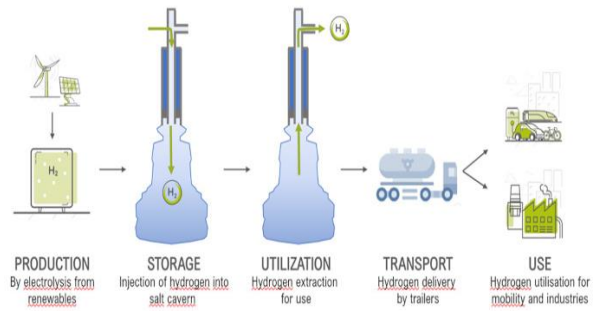
**Solution :** Services pour le stockage sous-terrain H<sub>2</sub>  
Etudes R&D, ingénierie. Supervision construction.  
Assistance à l'exploitation ou exploitation  
**Caractéristique :** Cavité saline  
**Projets :** R&D et démonstrateurs industriels  
[Rstock-H](#), [FluidStory](#), [Stopil H<sub>2</sub>](#), [Hystories](#) (aquifère ou champs déplété), HygreenProvence,



Source : Geostock



**Solution :**  
Opérateur / investisseur de stockage sous-terrain H<sub>2</sub>  
Services pour le stockage sous-terrain H<sub>2</sub> pour tiers  
**Caractéristique :** Cavité saline  
**Projets :** R&D et démonstrateurs industriels :  
[Stopil H<sub>2</sub>](#), [Hypster](#) (capacité totale de la cavité : 44 t),  
HygreenProvence



Source : Storengy



**Solution :**  
Opérateur / investisseur de stockage  
sous-terrain H<sub>2</sub>  
**Caractéristique :** Cavité saline  
**Projets :** R&D et démonstrateurs industriels :  
[Hygeo](#), Lacq H<sub>2</sub>

# Transport

H<sub>2</sub>



# Sommaire



## Transport

---

**Transport : Principes généraux** 81

---

**Transport par voie routière** 84

---

**Transport par hydrogénoducs** 89

---

**Transport par voie maritime** 92

---



# Transport

## Principes généraux

Le transport et la distribution d'hydrogène pur sont déjà bien connus du fait de l'utilisation de ce gaz dans l'industrie. Les entreprises telles qu' Air Liquide, Linde ou encore Messer transportent régulièrement de l'hydrogène depuis leurs centrales de production jusqu'aux points de consommation.

100  
kg

### Transport sous pression par camion

L'hydrogène est comprimé entre 200 bar et 500 bar dans des bouteilles de volumes et technologies variables (acier ou composite). Les bouteilles sont transportées par camion et chargées/déchargées sur le lieu de consommation. Ce type de transport baisse en compétitivité à partir d'une tonne d'hydrogène et au-delà d'un rayon logistique de 150 km. Le bilan carbone de l'hydrogène augmente également avec la distance parcourue lors du transport. (source : projet Hyd'Occ).



Crédit: Linde

1  
tonne

### Transport liquide par camion

L'hydrogène est refroidi afin qu'il condense en phase liquide. Un camion citerne adapté transporte ainsi un volume plus important que par bouteille d'hydrogène gazeux. La capacité de transport est de quelques tonnes et peut s'effectuer dans un rayon logistique de 500 km.



Crédit: Air Liquide

10  
tonnes  
et +

### Transport par hydrogénéoducs

L'hydrogène est transporté sous forme gazeuse à travers des conduites dédiées. Des hydrogénéoducs sont installés dans le nord et dans le sud de la France sur des zones industrielles fortement consommatrices d'hydrogène.



Crédit: DoE

### Cas particulier : le transport par vecteur chimique

L'hydrogène peut être associé avec d'autres molécules supports (silicium, huiles) pour être transporté sous forme liquide. Il peut aussi être combiné à du dioxyde de carbone ou diazote pour être respectivement transporté sous forme de méthanol ou ammoniac. Le méthane de synthèse peut aussi être vu comme une voie de transport de l'hydrogène, via le réseau de gaz naturel existant. Ces technologies sont en cours de maturation et sont développées dans la catégorie "Molécules de synthèse".

# Transport

## Aspects technico économiques

Le **volume d'hydrogène transporté** par jour ainsi que la distance parcourue entre son site de production et son site de stockage représentent des paramètres essentiels dans le choix du mode de transport. Ces paramètres peuvent justifier les choix de transports plus coûteux. Par exemple, le coût de transport de l'hydrogène liquide est plus élevé que l'hydrogène gazeux mais il permet de transporter une quantité deux fois plus importante d'hydrogène (hydrogène liquide :  $70,9 \text{ kgH}_2/\text{m}^3$  et hydrogène gazeux :  $39,6 \text{ kg/m}^3$ ). Le stockage d'hydrogène doit également prendre en compte les fuites du gaz ainsi que l'impact carbone du transport. Sur de très longues distances, les modes de transports les plus coûteux tels que les hydrogénoducs ou le transport par voie maritime sont donc relativement légitimes.

### Transport par camion d'hydrogène gazeux *(Source Bloomberg 2019)*

- **Prix** : 0,46 € à 0,64 €/kg H<sub>2</sub>
- **Périmètre** : Pour 0 à 10 t H<sub>2</sub> transporté / jour dans un rayon de 150 km

### Transport par camion d'hydrogène liquide *(Source Bloomberg 2019)*

- **Prix** : 0,64 € à 2,23 €/kg H<sub>2</sub>
- **Périmètre** : Pour 0 à 10 t H<sub>2</sub> transporté / jour à partir d'un rayon de 300 km

### Transport par pipeline *(Source Bloomberg 2019 et Hydrogen Backbone)*

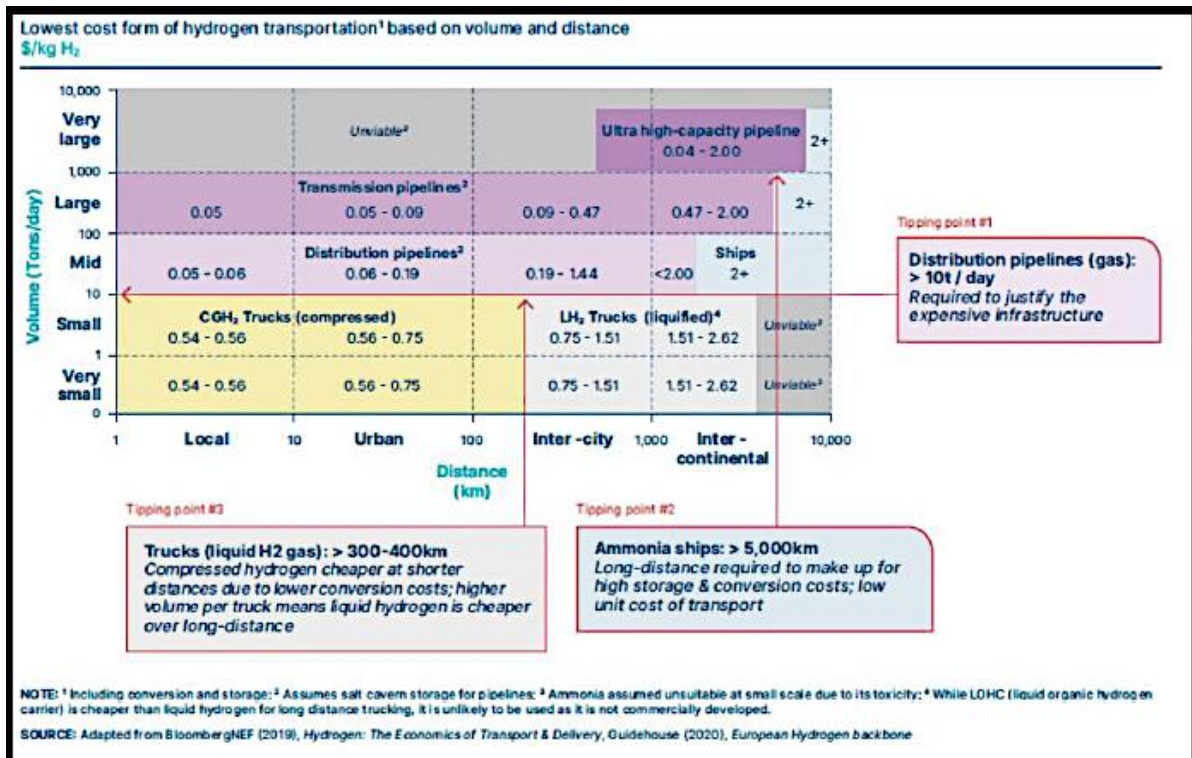
- **Prix** : 0,04 € à 1,7 €/kg H<sub>2</sub>
- **Périmètre** : A partir de 10 t H<sub>2</sub> transporté / jour afin de justifier les coûts élevés des infrastructures

### Transport par voie maritime *(Source Bloomberg 2019)*

- **Prix** : > 1,7€ /kg H<sub>2</sub>
- **Périmètre** : Transport sur plus de 5 000 km à plus de 10 t H<sub>2</sub> transporté / jour



## Coût du transport de l'hydrogène basé sur le volume et la distance



Source: Energy Transition Commissions. Accelerating Clean Hydrogen in an Electrified Economy. Cost of hydrogen transportation, based on distance and volume.



---

# Transport par voie routière

---



# Transport par voie routière

## Principes généraux

Le transport par voie routière se fait généralement à une pression de 200 bar ou par hydrogène liquide mais les acteurs se préparent à augmenter ce niveau de pression à 500 bar pour accroître la capacité délivrée.

Le camion peut soit transporter un ensemble de bouteilles maintenues dans un **cadre ou par tubes trailers**. Il peut également être équipé d'une remorque supportant de long tube de stockage dans quel cas le camion déposera la remorque ou fera un remplissage sur site. Cette configuration sera valable pour le transport cryogénique (ensuite stocké sous forme gazeuse en station) ou par l'intermédiaire de vecteurs chimiques. (cf. section stockage)

Plusieurs études sont en cours pour déterminer les modèles de transports les plus intéressants du point de vue économique et environnemental. Les indicateurs dépendent de la quantité délivrée, de la fréquence de renouvellement ainsi que de la distance à parcourir.



### Principe de réapprovisionnement en stockage gazeux

#### Typologie :

- Cadre de bouteilles
- Tube trailer
- Gazeux
- Cryogénique
- Vecteur chimique (peu utilisé par route)
- Remorque avec tube de stockage



Source : cadre de bouteilles Linde



Source : Tubes trailer CYE energy

#### Caractéristiques :

- Livraison : locale à internationale
- Longueur : remorque 20 pieds à 40 pieds
- Masse utile : jusqu'à 900 – 1000 kg
- Pression haute : 300 b, 500 b en développement
- Coûts : 0,2 à 3 €/kg H<sub>2</sub> pour un rayon inférieur à 500 km



Source : Tube de stockage Kawasaki

#### Bibliographie utile

- Hydrogen Council – « Hydrogen insight 2021 »
- Reuss and al. « Hydrogen Road Transport Analysis in the Energy System : A case Study for Germany through 2050 »

# Transport par voie routière

## Ces groupes d'experts gaziers

assurent un rôle de logisticien/coordonateur dans le conditionnement du gaz.

Le transport en tant que tel est assuré par des entreprises de transporteurs indépendants (Géodis, etc.) agréés en transport de matières dangereuses.

## Le type d'approvisionnement dépend de différents paramètres dont :

- La quantité demandée
- La fréquence de renouvellement
- La pression de sortie
- La distance à parcourir pour la livraison



### Type de stockage :

- Gazeux (inférieur à 5 000 m<sup>3</sup>/mois, cadre de 9, 18, 28 bouteilles, tube trailers)
- Cryogénique (Solution de mini vrac si besoin entre 400 à 4 000 m<sup>3</sup>/mois)



### Distributeur d'H2 par camion sous forme:

- Gazeuse jusqu'à 500 bar (bouteilles et cadre de bouteilles, tube trailers)
- Liquide



Source : Air Products



### Type de stockage :

- Gazeux (bouteilles et cadre de bouteilles) @200 & 300 bar
- Cryogénique (en fonction du pays)



Entreprise française



Entreprise Européenne



Usine en France



Membre de France Hydrogène

# Transport par voie routière

## Les acteurs du secteur



### Type de stockage :

- Gazeux (bouteilles)
- Cryogénique

Source: Linde



### Type de stockage :

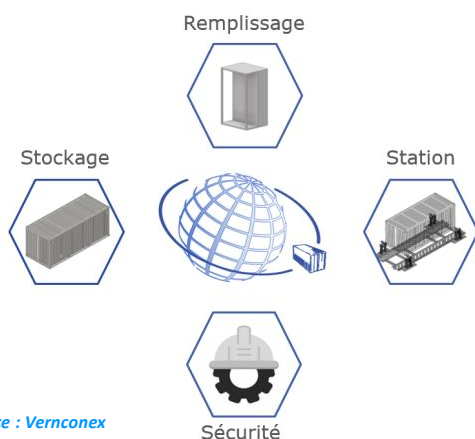
- Gaz industriels et médicaux

Source : Calvera



### Type de stockage :

- Gazeux (bouteilles et cadre de bouteilles)  
350 bar – 450 bar
- Par conteneurs mobiles



Source : Vernconex



### Type de stockage :

- Conteneurs mobiles modulaires de 10 à 45 pieds
- Transport d'H2 Gazeux (bouteilles et cadre de bouteilles @ 300 bar /381 bar /500 bar



Source : Wystrach & Hexagon Purus



Entreprise française



Entreprise Européenne



Usine en France



Membre de France Hydrogène

# Transport par voie routière

## Les acteurs du secteur

### BayoTech™

**Type de stockage :** remorque de transport d'H2 gazeux

**Typologie de réservoirs :** type III

**Poids à vide :**

- 28 991 kg (80 réservoirs de 25 000 L @ 450 bar)
- 28 556 kg (75 réservoirs de 23 000 L @ 520 bar)

**Poids H<sub>2</sub> embarqué :**

- 733,4 kg (pour 80 réservoirs de 25 000 L @ 450 bar)
- 752,8 kg (pour 75 réservoirs de 23 000 L @ 520 bar)

**Commercialisation:** disponible



Source : BayoTech

### CHART®

**Type de stockage:**

Remorques de transport non- cryogénique:

- Gazeux (Bouteilles de 350 & 640 bar)

Remorques de transport cryogénique:

- Liquide (capacité 3 800 – 4 500 kg)

Conteneurs ISO:

- Liquide (capacité 3 000 kg)

**Commercialisation:** disponible



Source : Chart

### CRYOLOR



**Applications :** Mobilité et Logistique

**Solution :** Semi-remorques pour le transport d'hydrogène liquide.

**Capacité réservoirs :** 2100 kg et 4500 kg

**Pression de design :** 0,14 barg

**Commercialisation:** disponible



Source : Air Liquide



Entreprise française



Entreprise Européenne



Usine en France



Membre de France Hydrogène





---

# Transport par hydrogénoducs

---





# Hydrogénoducs

## Principes généraux

Un hydrogénoduc est une canalisation industrielle qui achemine de l'hydrogène sous forme gazeuse sur des longues distances entre la zone de production et les zones de consommation. A ce jour, ces infrastructures sont adressées essentiellement aux grands consommateurs d'hydrogène. D'ici 2040, un grand projet regroupant 21 pays européens prévoit de déployer 40 000 km de pipelines hydrogène, dont 69 % issus d'infrastructures gazières existantes reconverties. Les 31 % restantes sont de nouvelles canalisations, requises afin de pouvoir raccorder les nouveaux consommateurs et sont situées dans des pays dont les réseaux gaziers existants sont de tailles limitées. (Source : *Hydrogen Backbone*)

### Typologie :

- Enjeux : Fragilisation des parois et fuites du gaz
- Les hydrogénoducs, comme les gazoducs, peuvent être enfouis

### Caractéristiques :

- Débit type : Pression typiquement autour de 50-80 bar
- Quantité d'H<sub>2</sub> adressée : Intérêt du pipeline pour un transport supérieur à 10 tonnes/jour pour justifier les coûts d'infrastructure



Ex. Tube de stockage Kawasaki

### Caractéristiques :

- Structure et diamètre du pipeline
- Les coûts opérationnels pourront être plus élevés pour les diamètres plus faibles: 0.11-0.21 €/kg H<sub>2</sub> pour un diamètre de 50 à 100 cm et 0.09-0.17 €/kg H<sub>2</sub> pour un diamètre de 120 cm (sources : *Hydrogen Backbone*)
- Utilisation ou non d'infrastructures déjà existantes
- Effets d'échelle sur les futurs volumes installés

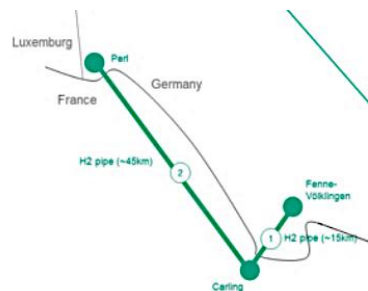
# Hydrogénoducs



**Solution :** Opérateur / investisseur de réseaux de transport de H<sub>2</sub> sur son domaine géographique (France hors Sud-ouest)

- Services pour le transport H<sub>2</sub> pour tiers (distance, débit à voir)

**Projets :** [Mosahyc](#) (70 km, 20 000 m<sup>3</sup>/h, 100% H<sub>2</sub>, réseau partiellement converti du Gaz naturel au H<sub>2</sub>), Dorsale Européenne H<sub>2</sub> (backbone)



Source : GRTgaz



**Solution :** Opérateur / investisseur de réseaux de transport de H<sub>2</sub> sur son domaine géographique (Sud ouest)

- Services pour le transport H<sub>2</sub> pour tiers (distance, débit à voir)

**Projets:** Lacq H<sub>2</sub>, Dorsale Européenne H<sub>2</sub> (backbone)



Source : Hydrogen Europe/Hydrogen for a European Green Deal



**Solution :** Opérateur / investisseur de réseaux de transport de H<sub>2</sub> sur son domaine géographique (nord ouest de l'Europe)

- Services pour le transport H<sub>2</sub> sur 3 espaces géographiques



Source : Air Liquide



**Solution :** Opérateur / investisseur de réseaux de transport de H<sub>2</sub> (Nord de l'Europe)

• Services pour le transport H<sub>2</sub>  
2900 km de pipeline dans le monde



Source : Air Products



---

# Transport par voie maritime

---



# Transport par voie maritime

## Principes généraux

Particulièrement adapté pour le transport à très longue distance, le transport par voie maritime présente un fort intérêt pour les vecteurs chimiques et l'hydrogène liquide. L'hydrogène liquide est une technologie plus mature possédant déjà des marchés importants tel que l'accord d'approvisionnement du Japon par l'Australie.

### Typologie :

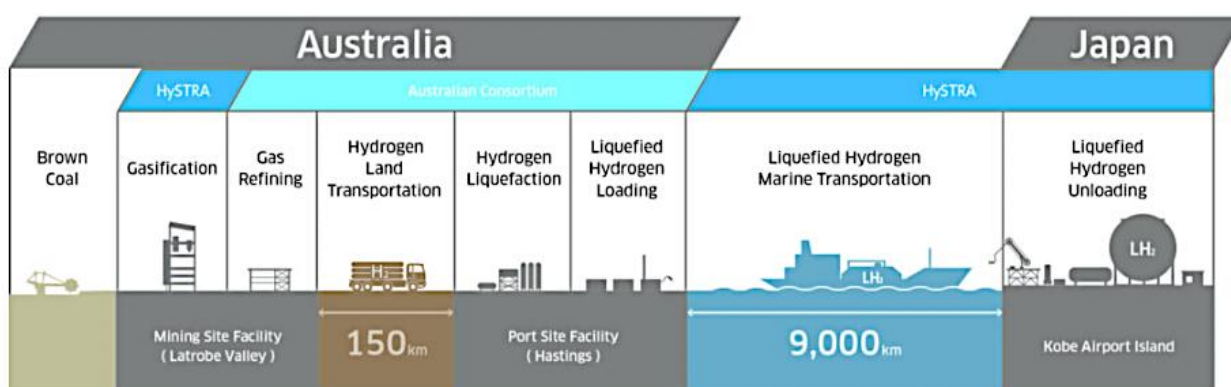
Peu d'export aujourd'hui mais de grands corridors vont naître avec de grands hubs internationaux avec la nécessité de transporter beaucoup d'hydrogène d'un pays à un autre



LH2 tanker « Suiso Frontier » de Kawasaki

### Projets :

Approvisionnement du Japon par l'Australie : Un premier bateau de transport d'hydrogène liquide a vu le jour en 2020, le « Suiso Frontier », long de 116m pour 1250 m<sup>3</sup> d'hydrogène à l'état liquide et un tonnage brut du navire de 8 000 tonnes



Source : H2mobile

# Transport par voie maritime

## Les acteurs du secteur

**AIR PRODUCTS**



### Container Hydrogène liquide

#### Fabricant et operateur de:

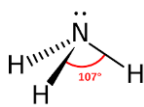
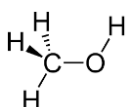
- Containers 40 pieds
- Capacité hydrogène: 2600 kg d'hydrogène



Source : Air Products

# Molécules de synthèse

H<sub>2</sub>



# Sommaire



## Molécules de synthèse

---

Molécules de synthèse : Principes généraux 97

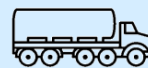
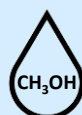
---

Méthane 98

---

L(O)HC : Liquid (Organic) Hydrogen Carrier 102

---





# Molécules de synthèse

## Principes généraux

La **densité énergétique volumique** de l'hydrogène gazeux est **faible** (2,8 kWh/m<sup>3</sup>) ; l'H<sub>2</sub> « vert » peut être **converti chimiquement** en une molécule liquide pour augmenter sa densité et faciliter son transport. La conversion chimique de l'H<sub>2</sub> en une molécule liquide permet de **diversifier les options de transport de l'hydrogène** mais aussi servir de **carburant** pour décarboner plus rapidement notamment les secteurs maritime et aérien.

On distingue **3 types de molécules de synthèse** selon la nature de la co-molécule qui réagit avec l'H<sub>2</sub> (CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, ...):

### 1) Les molécules carbonées qui nécessitent H<sub>2</sub> et CO<sub>2</sub> :

- **Le méthanol** (MeOH) gris est un marché déjà existant (essentiellement intermédiaire de synthèse en chimie) et la production est très concentrée en Chine. Le méthanol peut aussi être obtenu à partir d'H<sub>2</sub> renouvelable/électrolytique pour décarboner la chimie, les transports lourds et/ou le transport massif d'H<sub>2</sub>. Il y a une soixantaine de projets de production de e-Méthanol dans le monde aujourd'hui, à différents stades de déploiement : la dynamique est forte.
- **Les e-fuels** sont des carburants de synthèse produit par synthèse Fischer Tropsch. Il existe par exemple le e-kérosène mais aussi le e-diesel et le e-essence. La demande en e-carburants est tirée par la décarbonation des transports lourds (aérien, fret maritime, fret routier). Il y a une vingtaine de projets de production de e-carburants dans le monde aujourd'hui, à différents stades de déploiement.
- **Le méthane de synthèse** (SNG – Substitute Natural Gas) est aussi un vecteur (gazeux) de transport de l'hydrogène ; il peut être injecté et transporté massivement sur le réseau de gaz. Plusieurs projets démonstrateurs de Power-to-SNG à l'échelle industrielle sont en cours de développement en France et en Europe. Les acteurs européens se positionnent sur une technologie de méthanation : catalytique, biologique ou hybride ; chacune ayant ses spécificités.

**2) Les molécules non carbonées : l'ammoniac** (NH<sub>3</sub>) gris est un marché déjà existant (182 Mt/an dans le monde 2021 - capacité mondiale = 236 Mt/an), principalement pour la production des engrais. L'ammoniac peut aussi être obtenu à partir d'H<sub>2</sub> renouvelable/électrolytique pour décarboner les engrais et/ou transporter massivement l'H<sub>2</sub>. Pour les acteurs pétroliers, l'ammoniac est une des solutions envisagées pour permettre la mise en place d'un trading international d'hydrogène.

**3) Les L(O)HC - Liquid (Organic) Hydrogen Carrier** - sont une technologie de vecteurs de transport et de stockage de l'hydrogène moins mature mais avantageuse à plusieurs égards. Il existe une petite dizaine d'acteurs positionnés sur différentes molécules. En dépit des avantages, la dynamique générale des L(O)HC est plutôt incertaine car les différentes technologies/infrastructures ne seront pas interopérables.

En conclusion, de nouvelles chaînes de valeur et de nouveaux marchés se développent. Le choix du vecteur va dépendre de **l'usage visé**, mais le marché du transport de l'hydrogène semble se diviser entre **NH<sub>3</sub> et MeOH, les deux technologies les plus matures aujourd'hui**. Le **kérosène de synthèse** quant-à-lui, sera un enjeu majeur de **décarbonation** (cf. feuille de route de la décarbonation de l'aviation).



---

# Méthane

---



# Molécules de synthèse

## Méthane

La méthanation permet la conversion de CO<sub>2</sub> et de H<sub>2</sub> en méthane et en eau. Cette réaction est exothermique et nécessite la présence d'un catalyseur physico-chimique ou biologique.

L'efficacité énergétique du procédé Power-to-SNG est de l'ordre de 60% PCS (Pouvoir Calorifique Supérieur).

### Typologie :

Il existe 2 grandes familles de procédés, catalytique ou biologique, qui se distinguent sur les critères suivants:

- Productivité des réacteurs (en Nm<sup>3</sup> / jour / m<sup>3</sup> réacteur). Les réacteurs catalytiques permettent de produire beaucoup de gaz dans des faibles volumes
- Le niveau de température des rejets thermiques (65°C pour le biologique vs. >250°C pour le catalytique)
- Le coût
- Les exigences de pureté des gaz (très élevées pour les réacteurs catalytiques)

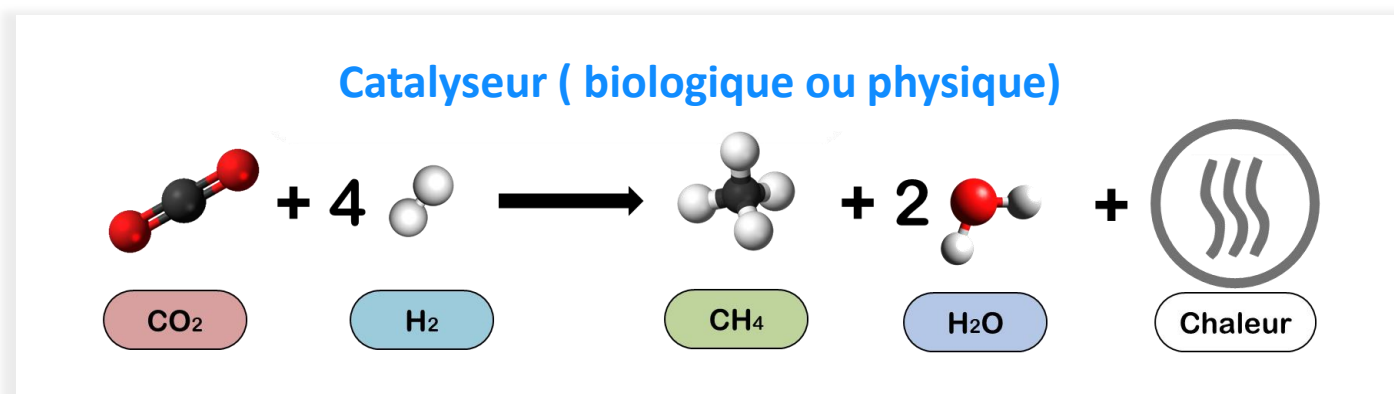
### Projets :

Il existe une quinzaine de projets de démonstration (>250 kW<sub>e</sub> d'électrolyse), essentiellement en Europe.

Parmi les plus connus, il y a en France les projets Jupiter 1000 (cat., 1MW<sub>e</sub>), Methycentre (cat., 250 kW<sub>e</sub>) et Hyaunais (biol, 1 MW<sub>e</sub>) et à l'étranger le projet Audi (6,3 MW<sub>e</sub>)

### Maturité :

La technologie est relativement mature. Certains fournisseurs continuent de développer des solutions innovantes sur ce segment.



# Conversion du CO<sub>2</sub> Méthane Biologique

**enosir**



**Solution :**

- Fournisseur d'installations de méthanation biologique

**Caractéristiques :**

- Microorganisme élevés (mix)
- Réacteur agité, non agité

**Projets :**

- Demetha (traitement direct de biogaz d'ordures ménagères, 10 Nm<sup>3</sup>/h, 50kWe électrolyse), avec Tryfil et Terega
- Occitanie (traitement direct de biogaz de boues de station d'épuration, 80 Nm<sup>3</sup>/h)
- Plainénergie (traitement du syngaz, 10 Nm<sup>3</sup>/h)



Source : Enosir

**arkolia**  
ENERGIES

**Solution :**

- Fournisseur de réacteur biologique et éleveurs de microorganismes
- Développeur de ses projets (en lien avec fourniture d'énergie renouvelable)

**Caractéristiques :**

- Microorganisme élevés (mix)
- Réacteur agité

Source : NC

**Electrochaea**

**Solution :**

- Fournisseur de technologie de méthanation biologique

**Caractéristiques :**

- Valorisation du CO<sub>2</sub> en méthane de synthèse
- Stockage d'énergie grande échelle
- Remplacement des énergies fossiles

**Projets**

- Test d'un pilote industriel 1 MWe
- Design d'un archétype de 10 MWe
- Mise à l'échelle jusqu'à 75 MWe (en cours)
- Projet commercial de 10 MWe à Roslev, DK en cours (500 Nm<sup>3</sup> SNG/h)



Source : Electrochaea



Entreprise française



Entreprise Européenne



Usine en France



Membre de France Hydrogène

# Conversion du CO<sub>2</sub> Méthane Catalytique



**MAN Energy Solutions**

**Solution:**

- Fournisseur de réacteur de méthanation
- Réalisation de projets de Power to Gas complet (capture, Electrolyseur PEM, Méthanation) (bloc type de 25 MWe)

**Caractéristiques :**

- Réacteur Catalytique refroidi aux sels fondus ou à vapeur basse pression

**Projets :**

- Audi 6,3 MW<sub>e</sub> (325 Nm<sup>3</sup>/h SNG) , Werlte, 2011



Source : MAN-Es



**Solution:**

- Fournisseur de technologies d'hydrogène (cœur de technologie) et services ingénierie

**Caractéristiques :**

- Réacteur catalytique/ Plasma

**Maturité:**

- Démonstrateur mobile (150 l/h, production de 0,5 kW de CH<sub>4</sub>)
- Démonstrateur semi-industriel (12,5 m<sup>3</sup>/h, production de 30 kW de CH<sub>4</sub>)
- Projet en cours (28 m<sup>3</sup>/h, production de 300 kW de CH<sub>4</sub>)



Source : Energo



**Solution :**

- Fournisseur de réacteurs et d'unités de production de molécules bas carbone.
- Synthèse Méthane, Méthanol, Fischer-Tropsch

**Caractéristiques :**

- Réacteurs milli-structurés, modulaires

**Projets :**

- Jupiter 1000 (25 Nm<sup>3</sup>/h de SNG)
- Store&Go Troia (10 Nm<sup>3</sup>/h de SNG)
- Methycentre (12,5 Nm<sup>3</sup>/h de SNG)
- Démonstrateurs WGS et reformage syngas pour la production d'H<sub>2</sub>.



Source : Khimod



Entreprise française



Entreprise Européenne



Usine en France



Membre de France Hydrogène



---

# L(O)HC

---



# Molécules de synthèse

## L(O)HC

Les L(O)HC – Liquid (Organic) Hydrogen Carrier - permettent de stocker/transporter de l'hydrogène sous forme liquide par association chimique avec un composé (ici A, ex : toluène), donnant par réaction un autre produit (ici B, ex : méthylcyclohexane). La chaîne complète comprend donc des installations de charge, des installations de décharge et des flux de transport de produits A et B, comme présenté sur le schéma ci-dessous.

Les L(O)HC sont des liquides porteurs d'hydrogène, pouvant être de type organique (LOHC) ou inorganique (ex. à base de silicium). Ils sont liquides à température ambiante et pression atmosphérique, et il est possible d'utiliser les infrastructures de stockage et de transport des hydrocarbures existantes.

Encore très peu utilisée, cette technologie semble présenter un fort potentiel pour le stockage et le transport de l'hydrogène.

### Typologie :

- Vecteur Organique : Méthane / Toluène, (perhydro)–dibenzyltoluène,
- Vecteur Silicium : Hydrosil (HysiLabs)

### Densité :

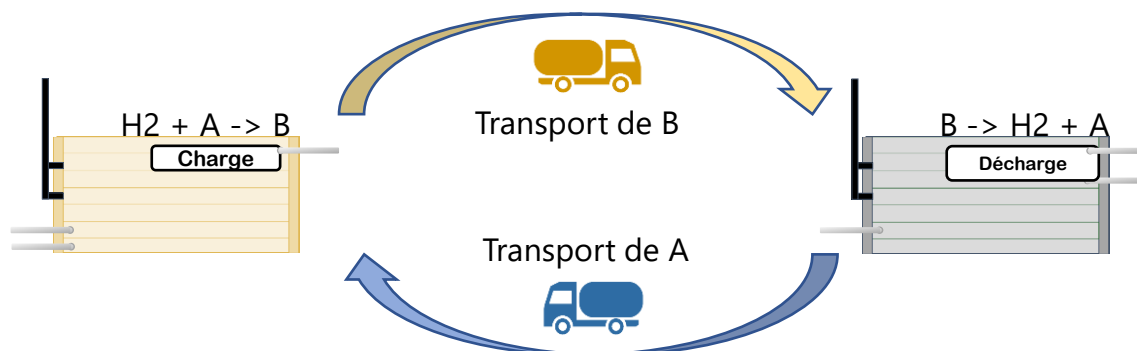
- **LOHC** : A pression atmosphérique à 20 °C : **57 kg/m<sup>3</sup>**
- **Hydrosil** : A pression atmosphérique à 20 °C : **100 kg/m<sup>3</sup>**

### Les paramètres clés sont :

- la capacité de stockage de l'hydrogène (en % massique du produit hydrogéné)
- les conditions de charge et décharge (réaction catalytique), les sélectivités des réactions
- les caractéristiques des produits A et B (inflammabilité, toxicité, densité ...)
- la stabilité au cyclage, la pureté de l'H<sub>2</sub>

### Projets :

Advanced Hydrogen Energy Chain Association for Technology Development (AHEAD) :  
Projet d'approvisionnement entre Brunei et le Japon



### Bibliographie utile

- Introduction of Liquid Organic Hydrogen Carrier and the Global Hydrogen Supply Chain Project (2018) AHEAD
- Liquid Organic Hydrogen Carrier (LOHC) - Assessment based on chemical and economic properties (Nermann al.) (2019) Hamburg University of Technology



# Molécules de synthèse

## L(O)HC



Fournisseur de technologie

### Solution :

Vecteur chimique base silicium (Hydosil)  
+ unités de charge et de décharge

### Caractéristiques :

- 8,7% en masse de H<sub>2</sub>.
- La déshydrogénation (décharge de H<sub>2</sub>) génère de la chaleur excédentaire
- Unité d'une capacité d'1 Mt H<sub>2</sub> sur un an sur le port d'Amsterdam
- Hydrosil est liquide à pression et température ambiante
- Non inflammable

### Projets :

- [H<sub>2</sub> Gate](#) : (Port d'Amsterdam)
- [Sun-to-X](#) : développement d'un système permettant de convertir l'énergie solaire en HydroSil.



Source : Hysilabs



Fournisseur de technologie de stockage

**Solution :** Vecteur chimique organique (dibenzyltoluène) + unités de charge et de décharge

### Caractéristiques :

- 6,2% en masse de H<sub>2</sub>.
- L'hydrogénation (charge en H<sub>2</sub>) génère de la chaleur excédentaire
- Unité de 5 à 12 tonnes H<sub>2</sub>/jour en cours de développement
- Considéré comme non dangereux dans le cadre de la réglementation ADR (transport)
- Le LOHC est liquide à pression et température ambiante

**Projets :** [HySTOC](#) : Projet Européen 2018 -2022 (Hydrogenious)



Source : Hydrogenious

# Distribution

H<sub>2</sub>

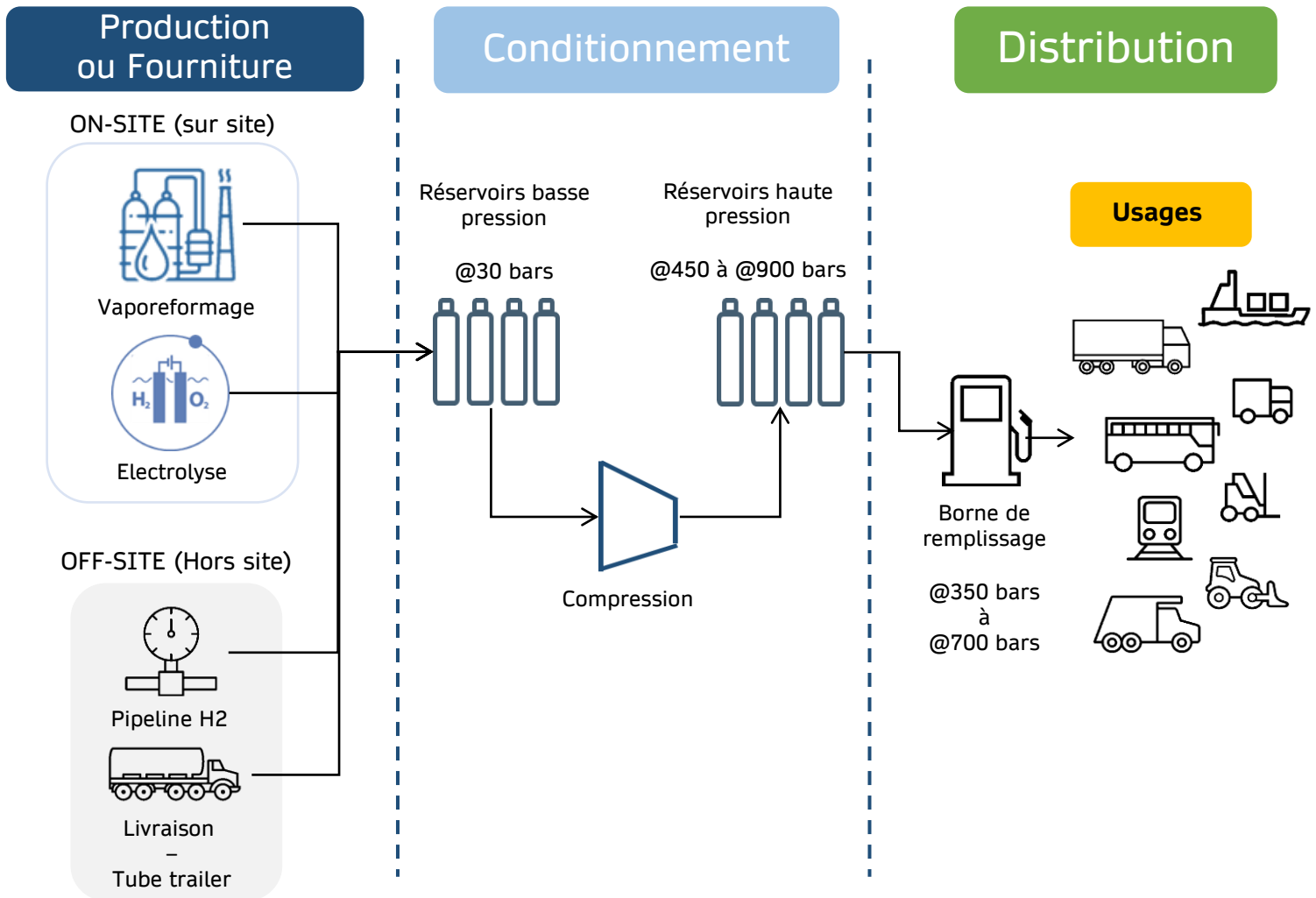


# Distribution

## Principes généraux

La distribution est la dernière phase avant l'usage final. Cette étape est particulièrement importante pour la mobilité, dont les usages sont plus diffus que l'industrie. Le déploiement de la mobilité nécessite un maillage et une disponibilité des points de distribution. La France compte à ce jour une cinquantaine de stations opérationnelles, elle fait ainsi partie des pays européens les plus actifs avec l'Allemagne dans le déploiement des infrastructures de distribution.

### Typologie :



Source : EnerKa Conseil

# Distribution

## Aspects technico-économiques

### Aspects économiques :

Les coûts des stations dépendent de leur utilisation ainsi que :

- Du type de véhicule : Si nécessité de devoir distribuer de l'hydrogène sous 350 et 700 bar, une station dual pression sera plus chère
- Du « back to back » souhaité pour la recharge : La capacité de stockage d'une station, élément important de son coût, est impactée par le profil de recharge souhaité pour les utilisateurs. Plus le niveau est élevé, plus la capacité de stockage est importante, plus le coût de la station est important ;
- Du niveau de disponibilité souhaité pour les installations : une disponibilité haute (par exemple de plus de 95%) impose une forte redondance des équipements.

Le prix de l'hydrogène est régulièrement exprimé à la sortie de la pompe. Ce prix dépend de l'ensemble des coûts de production, des coûts de transport et de l'investissement dans l'infrastructure de distribution jusqu'à la vente à l'utilisateur final.

(Source : Mobilité Hydrogène France, Element Energy)

### Décomposition des coûts d'une station de distribution

Hydrogène délivré	CAPEX	OPEX
<b>Production d'H<sub>2</sub> (si nécessaire)</b>	<b>Equipement de production (si nécessaire)</b>	<b>Electricité</b>
<b>Compression/liquéfaction</b>	<b>Réservoir H<sub>2</sub></b>	<b>Main d'œuvre</b>
<b>Logistique</b>	<b>Compresseur</b>	<b>Location du terrain</b>
<b>Taxes de vente</b>	<b>Pompe et évaporateur</b>	<b>Assurance</b>
<b>Prix de transaction</b>	<b>Refroidissement</b>	<b>Taxe de propriété</b>
	<b>Etudes et ingénierie</b>	
	<b>Génie civil</b>	

#### Bibliographie utile

- DOE Hydrogen Program Record 21002: Hydrogen Fueling Stations Cost (energy.gov)

# Stations hydrogène

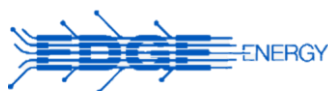
## Acteurs de la filière



### Entreprises Européennes



PRF  
GÁS, TECNOLOGIA E CONSTRUÇÃO, SA



### Entreprises Hors Europe



# Stations hydrogène

## Les acteurs du secteur



**Application :** Tout type de véhicules : véhicules légers, chariots élévateurs, poids lourds, bus, cars, trains...

**Capacité de remplissage :** 100 à 2000 kg/jour

**Pression adressée :** 350, 700 bar



Source : HRS



**Applications :** Poids lourds, bus, véhicules légers

**Capacité de remplissage :** Jusqu'à 1 t/jour

**Pression adressée :** 350 et 700 bar



Source : Air liquide



**Applications :** Poids lourds, bus, véhicules légers, ferroviaire, bateau

**Capacité de remplissage :**

- Compactes de 1 à 80 kg/jour
- Fixes évolutives de 100 à 1300 kg/jour
- Mobiles jusqu'à 100 kg/jour

**Pression adressée :** 300 bar, 350 bar et 700 bar



Source : Ataway



Driving  
clean energy  
forward



**Application :**

Poids lourds, bus, véhicules légers et trains

**Capacité de remplissage :**

**Starter kit** et **McFilling** de 20 kg/j à 2 000 kg/j

**Pression adressée :** 350 et/ou 700 bar



Source : McPhy



# Stations hydrogène

## Les acteurs du secteur



**Applications :** Tout type de véhicules terrestres et maritimes avec stations multi énergies (H<sub>2</sub>, BioGNV, Electricité)

**Capacité de remplissage :** 10 à 200 kg H<sub>2</sub>/j selon les stations



Source : Proviridis



### Station stationnaire HRS

**Application :** Tout type de véhicules terrestre et maritime

**Capacité de remplissage :** jusqu'à 5 t/j

**Pression adressée :** 350 et 700 bar

**Stockage :** Liquide et gazeux

### Station-mobile HRS

**Application :** Tout type de véhicules terrestre et maritime

**Capacité de remplissage :** jusqu'à 600 kg/j

**Pression adressée :** 350 bar

**Stockage :** Gazeux



Source : Air Products



**Applications :** Véhicules légers, Chariots élévateurs

**Capacité de remplissage :** 10 à 150 kg/j

**Pression adressée :** 350 bar

**Commercialisation :** disponible



Source : Plug



**Application :** Poids lourds, bus, véhicules légers

**Capacité de remplissage :** 200 à 570 kg/j

**Pression adressée :** 350, 700 bar



Source : ITM Power



Entreprise française



Entreprise Européenne



Usine en France



Membre de France Hydrogène



# Stations hydrogène

## Les acteurs du secteur

# TOSHIBA

### H2One™ Station Unit

**Application :** Mobilité

**Capacité de remplissage :** 40 kg H<sub>2</sub>/j

**Pression adressée :** 700 bar max



Source Toshiba

# nel



**Application :** Poids lourds, bus, véhicules légers et engins spéciaux

**Capacité de remplissage :** jusqu'à 120 kg/h pour 2,9 t/j

**Pression adressée :** 350, 700 bar



Source : NEL

# Haskel



**Application :** Poids lourds, bus, véhicules légers et engins spéciaux

**Capacité de remplissage :** 90 à 200 kg/j

**Pression adressée :** 350, 700 bar



Source : Haskel



# CALVERA

Gas Technology



**Applications :** Poids lourds, bus, véhicules légers et engins spéciaux

**Capacité de remplissage :** Selon les besoins.

Exemple de station déjà en place : 500 kg/jour à Barcelone

**Pression adressée :** 350, 700 bar



Source : Calvera



Entreprise française



Entreprise Européenne



Usine en France



Membre de France Hydrogène

# Stations hydrogène

## Les acteurs du secteur



**Horizon de commercialisation : 2022**



Source : Hynion



Electrolysis Technologies

**Application :** Poids lourds, bus, véhicules léger  
**Capacité de remplissage :** selon les besoins  
**Pression adressée :** 350, 700 bar



Source : H2B2



PRF  
 GÁS, TECNOLOGIA E CONSTRUÇÃO, SA

### PRF Solution

**Station portable**

**Capacité de remplissage :** NC

**Pression :** NC



Source : PRF Solution



### Station publique

**Application:** Tout type de véhicules

**Capacité de remplissage :** de 1000 kg/j à 3000 kg/j

**Pression :** 350 et 700 bar

### Station pour flotte captive

**Application:** Tout type de véhicules

**Capacité de remplissage :** 100 kg/j

**Pression :** 350 et 700 bar



Source : Resato



Entreprise française



Entreprise Européenne



Usine en France



Membre de France Hydrogène

# Stations hydrogène

## Les acteurs du secteur



**Wystrachli**  
Customized solutions in high pressure



### Station-mobile

**Application:** Ferroviaire, Camions, Bus, Engin, Aéroportuaire, Maritime et Fluvial.

**Capacité de remplissage :** 360 kg/j

**Pression :** 350 bar



Source : Hexagon Purus & Wystrach

**TOP INDUSTRIE**  
High Pressure Technology



### SIHyced

**Application :** véhicules légers , véhicules utilitaires légers

**Capacité de remplissage :** station modulaire selon le besoin. 5 - 40 kg/jour

**Pression adressée :** 350 - 700 bar



Source : TOP INDUSTRIE

**MADIC**  
group



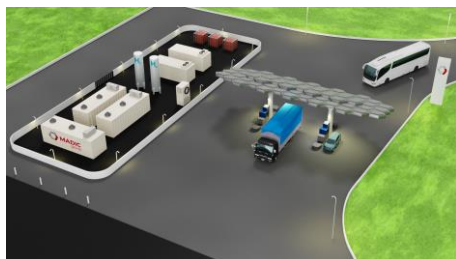
**Application :** Poids lourds, bus, véhicules légers, chariots élévateurs, bateaux, trains

**Capacité de remplissage :**

- < 40 kg/j
- 40-200 kg/j
- 200-2000 kg/j et +

**Pression adressée :**

350 et/ou 700 bars



Source : MADIC group

**sera**



**Application :** Poids lourds, bus, véhicules légers

**Capacité de remplissage :** station modulaire selon le besoin. Jusqu'à 165kg/h soit 3,9 t/j

**Pression adressée :**

350 et/ou 700 bars



Source : sera Group

# Stations hydrogène

## Les acteurs du secteur



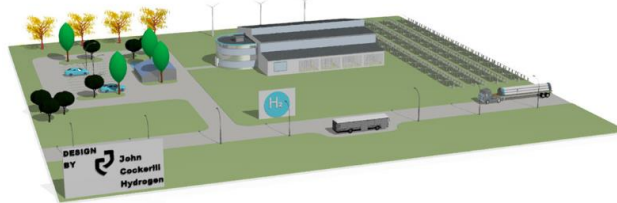
**Applications :** Poids lourds, bus, véhicules  
**Capacité de remplissage :** ---  
**Pression :** 350 et 700 bar



Source : Maximator Hydrogen



**Application:** Mobilité  
**Capacité de remplissage :** 200 à 2000 kg /j  
**Pression adressée :** jusqu'à 700 bars  
**Commercialisation :** 2023



Source : John Cockerill



### H-Patagonia

**Application :** Poids lourds, bus, véhicules légers  
**Capacité de remplissage :** NC  
**Pression adressée :** 350, 700 bar



### SimpleFuel

**Application :** Véhicules utilitaires légers, chariots élévateurs  
**Capacité remplissage :** de 20 kg/j  
**Pression adressée :** 350 bar, 700 bar  
**Commercialisation:** Disponible

### PDC Machines HRS

**Application :** VUL, VU, chariots élévateurs  
**Capacité remplissage :** de 1 kg/j à 2000 kg/j  
**Pression adressée :** 350 bar, 700 bar  
**Commercialisation:** Disponible



Source : PDC Machines



Entreprise française



Entreprise Européenne



Usine en France



Membre de France Hydrogène



# Stations hydrogène

## Les acteurs du secteur



**Applications:** Mobilité légère, Mobilité lourde  
Stockage d'hydrogène liquide (de 1 t à 5 t)  
**Capacité de remplissage:** 300 – 3 000 kg/j  
**Pression adressée :** 350 bar, 700 bar et liquide  
**Commercialisation:**

- Distribution H2 gazeux : disponible
- Distribution H2 liquide : en développement



Source : Chart Industries



**Application :** Véhicules légers , Poids lourds, ferroviaire  
Stockage en gaz et liquide  
**Capacité remplissage :** jusqu'à 1 t/j  
(1,8 t/j prévu pour le ferroviaire)  
**Pression adressée :** 350 bar, 700 bar et liquide



Source : Linde



Entreprise française



Entreprise Européenne



Usine en France



Membre de France Hydrogène

# Usages

H<sub>2</sub>



# Sommaire



## Usages

### Mobilité

- Véhicules Légers VL
- VUL – PTAC  $\leq 3,5t$
- VU -  $3,5t \leq PTAC \leq 7,5t$
- Bus
- Autocars
- BOM  $7,5t \leq PTAC \leq 32t$
- PL : Medium Duty  $7,5t \leq PTAC \leq 32t$
- Poids lourds : Heavy Duty  $> 32t$
- Evolutions économiques
- Synthèse de la mobilité

118

### Applications portuaires

- Equipements portuaires
- Equipements flottants

147

### Aéronautique

- Avions et taxis volants
- Drones

155

### Ferroviaire

159

### Engins spéciaux

161

### Usages stationnaires

- Système de chauffage
- Flexibilité des énergies
- Groupe électrogène

170





---

# Mobilité

---



# Mobilité

## Principes généraux

L'hydrogène peut être utilisé pour différents usages dans le secteur de la mobilité. Aujourd'hui sont privilégiés les mobilités lourdes, professionnelles et intensives requérant de l'autonomie et de la forte puissance.

La principale orientation technologique aujourd'hui déployée est la **pile à combustible**. Il s'agit alors d'un **véhicule électrique à hydrogène et zéro émission à l'usage**. La pile joue le rôle de convertisseur électrochimique pour produire de l'électricité à partir d'hydrogène et ne rejeter que de la vapeur d'eau.

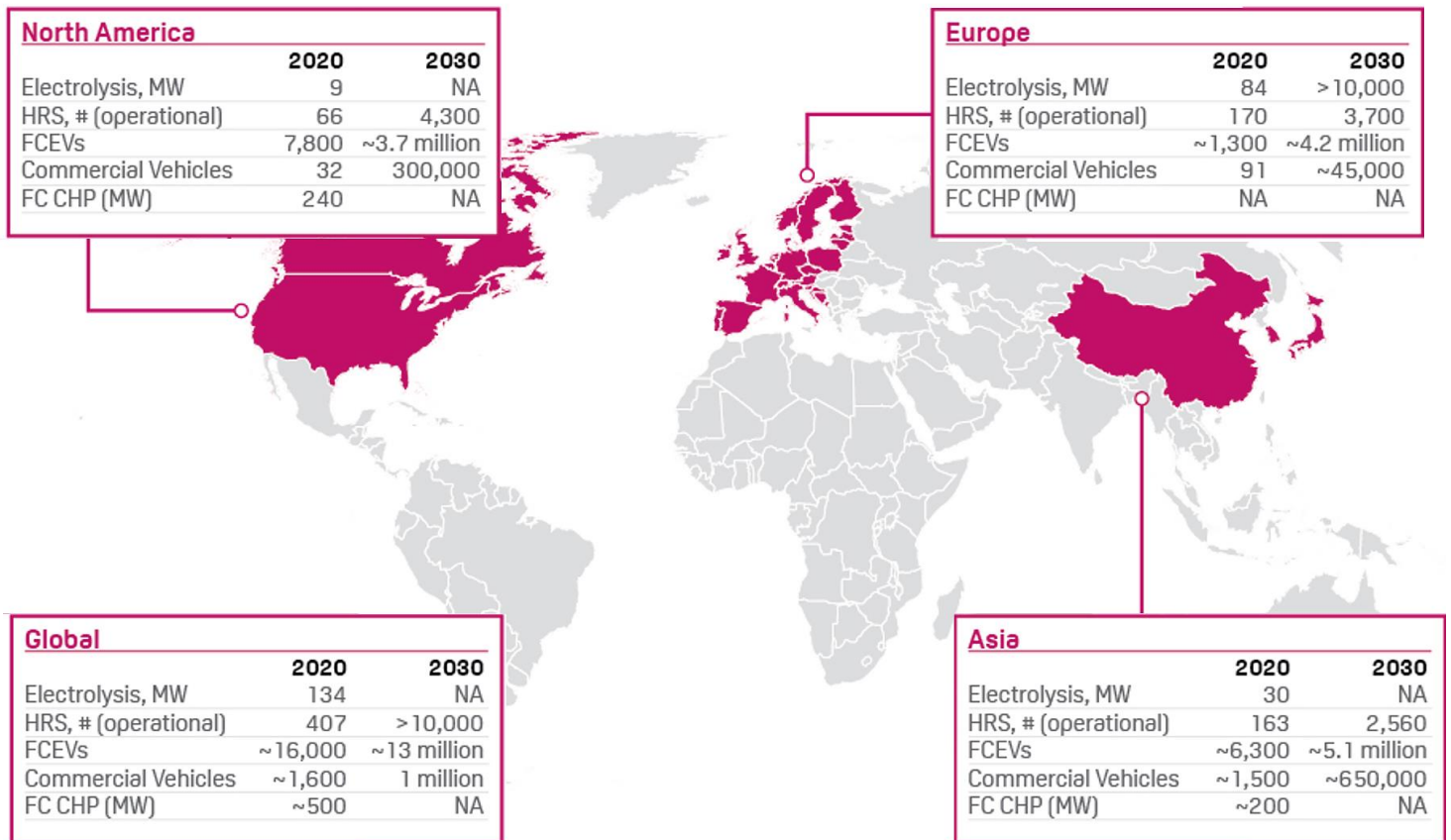
Une autre voie technologique, néanmoins qui n'est pas zéro émission, consiste à utiliser un **moteur à combustion interne** (MCI). Comme un moteur fonctionnant au GNV, l'hydrogène est injecté puis **brûlé** au sein du moteur. Il s'agit alors d'un **véhicule thermique**. En comparaison à une motorisation diesel, les MCI H<sub>2</sub> n'émettent pas de CO<sub>2</sub> mais les NOx restent présents.

Il est toujours possible **d'adapter des véhicules thermiques** à l'usage de l'hydrogène. On parle alors de **retrofit**. Il permet d'adapter un véhicule conventionnel à la technologie hydrogène, soit en remplaçant le **moteur thermique** par un groupe motopropulseur électrique, soit en installant des équipements pour injecter de l'hydrogène directement dans un moteur à combustion. Il y a un **fort potentiel** autour de cette mise en œuvre qui permettrait d'adapter l'ensemble du parc existant à l'hydrogène sans rachat de véhicule neuf.

Dans les pages qui suivent, nous considérons par défaut que les véhicules sont équipés d'une pile à combustible. Nous l'indiquerons lorsque ce n'est pas le cas ou qu'il s'agit d'un retrofit.

# Mobilitéé

## Perspectives mobilitéé



Note: HRS = Hydrogen Refueling Station, FC CHP = Fuel Cell Combined Heat and Power  
 Source: Hydrogen Council, based on input from IEA, H<sub>2</sub> Stations.org, Web, and government targets

# Mobilité

## Véhicules Légers VL – PTAC ≤ 3,5t

Cette catégorie regroupe tous les véhicules de moins de 3,5 tonnes :

- les véhicules particuliers (VP) comme ceux de type berline qui sont prévus pour le transport de personnes
- les véhicules utilitaires légers (VUL) qui sont destinés au transport de marchandises et parfois de personnes (leur spécificité est détaillée dans la catégorie suivante).

### VL-VP : Véhicules Particuliers

Etant donné la stratégie de déploiement de l'hydrogène, les véhicules particuliers, destinés au transport de personnes adressent plutôt un usage professionnel (taxis, véhicule de service, commercial). L'usage de voitures hydrogène pour les particuliers interviendra quand le maillage de l'infrastructure de recharge sera développé notamment grâce aux premiers déploiements de flottes captives professionnelles.

**Consommation moyenne (urbaine et périurbaine) des VP : Env. 1 kg H<sub>2</sub> / 100 km**

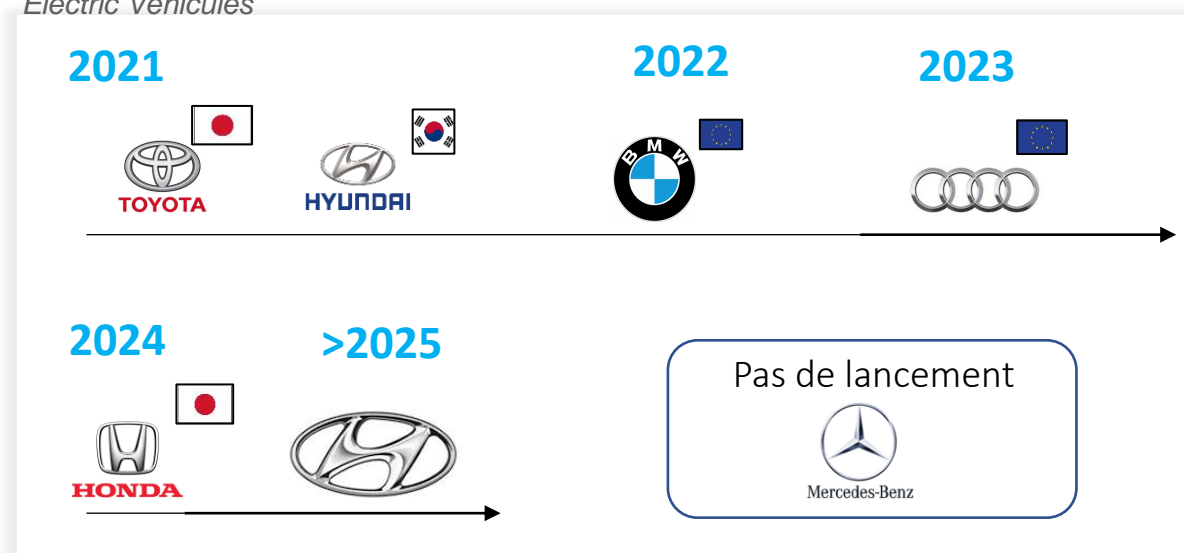
**Avantage sur la batterie :** Autonomie supérieure et temps de recharge réduit (5 min)

**Avantage sur le GNV (Gaz Naturel Véhicule) :**

Absence de polluants (CO<sub>2</sub>, particules fines) à l'usage, silencieux

**Notions de coûts :** prévision d'un coût similaire aux hybrides sur la 3<sup>e</sup> génération de Toyota. **Bonus écologique compris entre 2 000 et 6 000 €** suivant le type et le prix d'achat du véhicule neuf.

Source : Toyota ; *The role of Battery Electric Vehicles, Plug-in Hybrids and Fuel cells Electric Vehicles*



# Mobilité

## VL-VP : Véhicules Particuliers



**TOYOTA**

### Mirai

**Autonomie** : 500 à 650 km

**Typologie** : Véhicule PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cell)

**Date de commercialisation** : 2018

2<sup>ème</sup> génération de Mirai commercialisée en 2021

Prius et Corolla annoncées en 2023

Prius à moteur thermique H<sub>2</sub> en 2025



Source : Toyota



**HYUNDAI**

### Nexo

**Autonomie** : 600 km

**Typologie** : Véhicule PEMFC

**Date de commercialisation** : 2020



Source : Hyundai



### H-Tron quattro concept

**Typologie** : Véhicule PEMFC

**Commercialisation** : 2022-2023



Source : Audi



Entreprise française



Entreprise Européenne



Usine en France



Membre de France Hydrogène

# Mobilité

## VL-VP : Véhicules Particuliers



### I Hydrogen NEXT

**Typologie :** Véhicule PEMFC

**Commercialisation :** 2022 (petite série), grande série 2025



Source : BMW



### Range Rover

**Typologie :** Véhicule PEMFC

**Date de commercialisation :** 2025+



Source : Range Rover



### Warrego (H2X Global)

**Autonomie :** 650 km

**Typologie :** Véhicule PEMFC

**Commercialisation :** 2022



Source : H2X



### Hopium

**Autonomie :** 1 000 km

**Typologie :** Véhicule PEMFC

**Commercialisation :** 2026



Source : Hopium



Entreprise française



Entreprise Européenne



Usine en France



Membre de France Hydrogène

# Mobilité

## VL-VP : Véhicules Particuliers



### Grove

**Autonomie :** 1 000 km

**Typologie :** Véhicule PEMFC

**Commercialisation :** 2025



Source : Grove



### Viritech

**Autonomie :** NC

**Typologie :** Véhicule PàC H<sub>2</sub>

**Commercialisation :** 2022



Source : Viritech



# Mobilité

## VL-VUL : Véhicules Utilitaires Légers

Cette catégorie regroupe les camionnettes et les fourgonnettes destinées au **transport de marchandises et de personnes**, pour le public comme pour le privé. Ces véhicules sont particulièrement adaptés à la **circulation en zone citadine**.

**Consommation moyenne urbaine et périurbaine : Env. 0,5 - 1 kgH<sub>2</sub>/ 100 km** en fonction du type de technologie (range extender, mid power batteries/H<sub>2</sub>, 100% pile à combustible)

**Avantages de la solution hydrogène** : grande autonomie (double par rapport à la batterie avec un range extender), temps de recharge rapide (quelques minutes), pas ou peu d'impact sur le volume et la charge utile, fonctionnement silencieux, pas d'émission de polluants à l'usage (NO<sub>x</sub>, CO<sub>2</sub>, particules fines)

**Notions de coûts** : Ce segment est similaire au VL. Le bonus écologique pour une camionnette atteint **7 000 €**.

Plusieurs acteurs ont annoncé des VUL entre 2021 et 2022. Ci-après les informations sur les véhicules proposés par quelques acteurs :

The image displays logos of various manufacturers offering hydrogen-powered VUL vehicles. The logos are arranged in three rows. The first row includes Stellantis (with a French flag), UlemCo (with a flame icon and a UK flag), and Renault Group (with a French flag) and Hyvia. The second row includes Opel, Peugeot, Citroën, Fiat, and Ram. The third row includes Mercedes-Benz and Volkswagen. A central box labeled 'Pas d'information du constructeur' contains the Mercedes-Benz and Volkswagen logos. A legend at the bottom left identifies the flame icon as 'Moteur à combustion interne H<sub>2</sub>' and the green circle as 'Retrofit'.

**STELLANTIS** (France)

**ULEMCo** (UK) ultra low emission mileage company limited

**Renault Group** (France) **HYVIA**



**OPEL** **PEUGEOT** **CITROËN**

**FIAT** **RAM**

**Pas d'information du constructeur**

**Mercedes-Benz** **VW**

**Legend:**  
🔥 Moteur à combustion interne H<sub>2</sub>  
🟢 Retrofit

-  Moteur à combustion interne H<sub>2</sub>
-  Rétrofit

# Mobilité

## VL-VUL : Véhicules Utilitaires Légers



### Kangoo ZE H2

**Autonomie** : 300 km

**Typologie** : Véhicule électrique (range extender)

**Commercialisation** : 2020



Source : Symbio



### Peugeot Expert hydrogène

**Autonomie réelle (WLTP)** : 400 km

**Typologie** : Véhicule mid power PEMFC/ batterie rechargeable

**Poids total autorisé en charge** : < 3,5 t

**Capacité de transport** : 15 passagers

**Volume de chargement** : 5,3 et 6,1 m<sup>3</sup>

**Commercialisation** : fin 2021



Source : STELLANTIS



### Citroën e-Jumpy Hydrogen

**Autonomie réelle (WLTP)** : 400 km

**Typologie** : Véhicule mid power PEMFC/batterie rechargeable

**Poids total autorisé en charge** : < 3,5 t

**Volume de chargement** : 5,3 et 6,1 m<sup>3</sup>

**Commercialisation** : fin 2021



Source : STELLANTIS



### Opel Vivaro-e Hydrogen

**Autonomie réelle (WLTP)** : 400 km

**Typologie** : Véhicule mid power PEMFC/batterie rechargeable

**Poids total autorisé en charge** : < 3,5 t

**Volume de chargement** : 6,1 m<sup>3</sup>

**Commercialisation** : fin 2021



Source : STELLANTIS



Moteur à combustion interne H<sub>2</sub>



Retrofit

# Mobilité

## VL-VUL : Véhicules Utilitaires Légers



### HyRIS H1/H2

**Typologie:** Véhicule utilitaire électrique dont l'amélioration sera renforcée grâce à l'hydrogène.

**Autonomie (WLTP) :** 350 -500 km

**PTAC :** 3,2-3,4 t

**Charge utile :** 1500 -1600 kg

**Usages :** mobilité urbaine (collectivités notamment)

**Commercialisation:** 2023



Source : PowiDian Mobility



Entreprise française



Entreprise Européenne



Usine en France



Membre de France Hydrogène

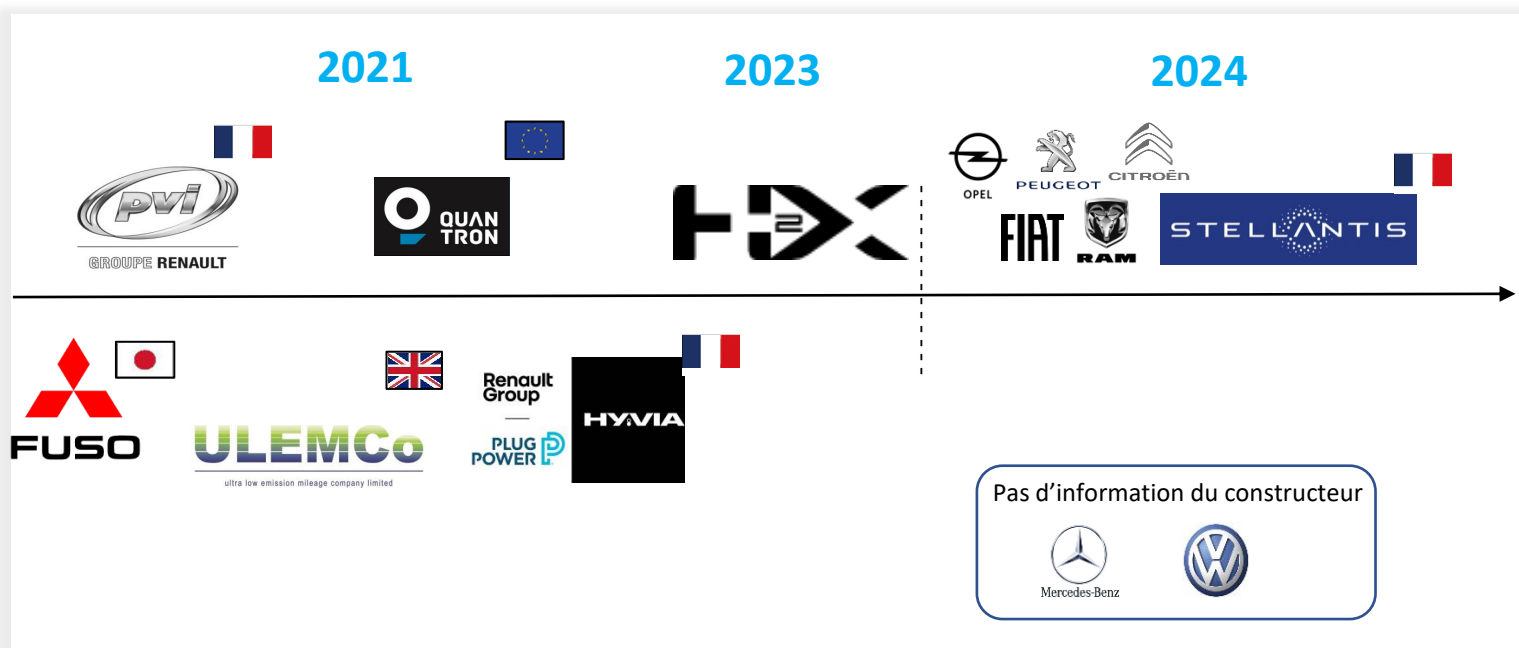
# Mobilité

## Véhicules Utilitaires 3,5t ≤ PTAC ≤ 7,5t

Comme pour les VUL, cette catégorie regroupe les camions et les fourgons destinés au transport de **marchandises** et de **personnes**. L'intérêt de cette catégorie réside principalement dans la possibilité de transporter des **charges plus encombrantes et / ou Lourdes**, tout en bénéficiant d'un véhicule plus mobile qu'un semi-remorque (utile notamment la **logistique du dernier kilomètre**).

**Consommation moyenne (urbain et périurbain) :** Environ **2 kg H<sub>2</sub> / 100 km**, soit **4 kg / jour** suivant la technologie

**Avantages de la solution hydrogène :** grande autonomie (double par rapport à la batterie avec un range extender), temps de recharge rapide (quelques minutes), pas ou peu d'impact sur le volume et la charge utile, fonctionnement silencieux, pas d'émission de polluants à l'usage (NOx, CO<sub>2</sub>, particules fines).



# Mobilité

## Véhicules Utilitaires 3,5t ≤ PTAC ≤ 7,5t



GROUPE RENAULT



### Fourgon Master H2

**Autonomie estimée :** 300 à 500 km

**PTAC :** 4,5t

**Typologie :** Véhicule électrique  
(range extender)

**Commercialisation :** 2022



Source : Pvi



Joint venture  
Renault Group  
Plug power



### Master City Bus H2-TECH

**Autonomie réelle :** 300 km

**Typologie :** Véhicule PEMFC

**Capacité de transport :** 15 passagers

**Commercialisation :** 2022



Source : Hyvia



Joint venture  
Renault Group  
Plug power



### Master Van H2-TECH

**Autonomie réelle :** 500 km

**Typologie :** Véhicule PEMFC

**Volume de chargement :** 12 m<sup>3</sup>

**Commercialisation :** 2022



Source : Hyvia



Joint venture  
Renault Group  
Plug power



### Master Châssis Cab H2-TECH

**Autonomie réelle :** 300 km

**Typologie :** Véhicule PEMFC

**Volume de chargement :** 19 m<sup>3</sup>

**Commercialisation :** 2022



Source : Hyvia



Entreprise française





Entreprise Européenne



Usine en France



Membre de France Hydrogène

-  Moteur à combustion interne H<sub>2</sub>
-  Rétrofit

# Mobilité

## Véhicules Utilitaires 3,5t ≤ PTAC ≤ 7,5t



### Crafter HyMotion

**Autonomie réelle :** 300 à 500 km

**PTAC :** 4,5 t

**Typologie :** Véhicule PEMFC

**Commercialisation :** non disponible sur le marché français



## ULEMCo

ultra low emission mileage company limited



### Mercedes Benz Sprinter

**Typologie :** véhicule thermique (Dual fuel diesel H<sub>2</sub>)

**Commercialisation:** Depuis 2014

**Autre :** Toutes marques adaptables, pas de production en série



### H2X / Renova

**Autonomie réelle :** NC

**PTAC :** 3,5 t

**Typologie :** Véhicule PàC H<sub>2</sub>

**Commercialisation :** non disponible sur le marché français



## ULEMCo

ultra low emission mileage company limited



### Ford Transit / Vauxhall Movano

**Autonomie réelle :** 300 km

**Commercialisation :** Depuis 2014

**Autre :** Toutes marques adaptables, pas de production en série







Moteur à combustion interne H<sub>2</sub>



Retrofit

# Mobilité

## Véhicules Utilitaires 3,5t ≤ PTAC ≤ 7,5t



### Daily

**Autonomie** : 500 km

**PTAC** : 3,5t à 7,5t

**Typologie** : Véhicule PEMFC

**Commercialisation** : 2021 / non disponible sur le marché français



### Vision F-Cell

**Autonomie estimée** : 270 – 300 km

**PTAC** : 7,5t

**Typologie** : Véhicule PEMFC

**Commercialisation** : 2020 – 2021 / non disponible sur le marché français





# Mobilité

## Bus

Cette catégorie regroupe les bus à hydrogène. Les constructeurs qui proposent des bus équipés d'une pile à combustible sont de plus en plus nombreux et participent à la montée en puissance de ces usages, grâce au développement de nombreux projets portés par les collectivités.

**Consommation moyenne : Env. 9 - 10 kg H<sub>2</sub>/100 km (Bus 12m) & 12 - 15 kg H<sub>2</sub>/100 km (Bus 18m) soit 20 - 30 kg H<sub>2</sub>/jour**

**Avantages de la solution hydrogène :** grande autonomie et temps de recharge réduit (20 min), absence de polluants (NOx, CO<sub>2</sub>, particules fines) à l'usage, silencieux

Les premiers déploiements de bus à hydrogène ont débuté en France en 2019 avec des projets ambitieux portés par les syndicats de transports comme celui d'Artois-Gohelle dans le Nord ou le Syndicat Mixte des Transports Urbains de Pau Béarn-Pyrénées. Plusieurs villes et métropoles font le choix de l'hydrogène comme Le Mans, Dijon, Auxerre, Versailles, Rouen, ...





Moteur à combustion interne H<sub>2</sub>



Retrofit

# Mobilité Bus

**SAFRA**  
Accélérateur de mobilité décarbonée



## Safra Hycity

**Puissance moteur électrique:** 2 x 115 kW  
**Energie / Puissance :** batterie 130 kWh ; PàC 45 kW  
**Autonomie :** 350 kilomètres  
**Maturité :** commercialisation 2023



Source : safra

**VANHOOL**



## Van Hool A330FC

**Autonomie :** 350 km  
**Typologie :** Véhicule PEMFC  
**Energie / Puissance :** Batterie 24-36 kWh ; PàC 85 kW  
**Commercialisation :** 2020



Source : Van Hool

**VANHOOL**



## Van Hool EQUI.CITY FC

**Autonomie :** 350 km  
**Typologie :** Véhicule PEMFC  
**Puissance :** PAC 100 kW  
**Commercialisation :** 2020



Source : Van Hool



CaetanoBus



## Caetano H2.CITY GOLD

**Autonomie :** 400 km  
**Typologie :** Véhicule PEMFC  
**Energie / Puissance :** Batterie 180 kWh ; PàC H<sub>2</sub> 70 kW  
**Commercialisation :** 2021



Source : CaetanoBus



Entreprise française



Entreprise Européenne



Usine en France



Membre de France Hydrogène



Moteur à combustion interne H<sub>2</sub>



Rétrofit

# Mobilité Bus



## Bus H2 – Simple étage

**Autonomie :** 450 km

**Typologie :** Véhicule PEMFC

**Commercialisation :** Prêt à la livraison depuis 2020, non disponible sur le marché français



Source : Wright bus



## Bus H2 – Articulé

**Autonomie :** 520 km

**Typologie :** Véhicule PEMFC

**Commercialisation :** Prêt à la livraison en 2021, non disponible sur le marché français



Source : Wright bus



## Bus H2 – Double étage

**Autonomie :** 310 km

**Typologie :** Véhicule PEMFC

**Commercialisation :** Prêt à la livraison depuis 2020, non disponible sur le marché français



Source : Wright bus



## Urbino H2

**Autonomie :** 400 km

**Typologie :** Véhicule PàC H<sub>2</sub>

**Energie / Puissance :** Batterie 180 kWh ; PEMFC 70 kW

**Commercialisation :** 2020



Source : Solaris Bus



Entreprise française



Entreprise Européenne



Usine en France



Membre de France Hydrogène



Moteur à combustion interne H<sub>2</sub>



Retrofit

# Mobilité Bus



**H2.0**

**Autonomie :** 300 km

**Typologie :** Véhicule PEMFC



Source : ALEXANDER DENNIS

## DAIMLER



**eCitaro REX**

**Autonomie :** 400 km

**Typologie :** Véhicule tout électrique avec PàC en tant que prolongateur d'autonomie

**Commercialisation :** à partir de 2022



Source : DAIMLER



**HyBatt Bus**

**Autonomie :** 300 km

**Typologie :** Véhicule PàC H<sub>2</sub>

**Energie / Puissance :** Batterie 65 kWh ; PàC 60 kW

**Commercialisation :** 2022



Source : CLEAN LOGISTICS



Entreprise française



Entreprise Européenne



Usine en France



Membre de France Hydrogène

# Mobilité

## Autocars

Fortement facilité par un décret de mars 2020, le retrofit électrique permet de décarboner des véhicules polluants. Plusieurs projets, notamment soutenus par les régions, sont en train de voir le jour en France.

Dans le cadre du projet NOMAD Car Hydrogène, Transdev et plusieurs partenaires souhaitent assurer le **retrofit d'un autocar diesel en autocar électrique fonctionnant à l'hydrogène**.

L'opération de retrofit, menée sur un car Irisbus Crossway de plus de 5 ans, permet d'avoir **une autonomie prolongée à 450 km (+ 30 % par rapport à un car électrique classique)**. De plus, la durée de vie passe de 14 à 25 ans.

**Le kit a été installé par IBF H<sub>2</sub>**. La start-up a bénéficié du concours de la société d'ingénierie automobile IAV. Le moteur diesel et la boîte de vitesses sont remplacés par un moteur électrique, une pile à combustible, une batterie et des réservoirs à hydrogène (placés sous le plancher). La capacité du véhicule en nombre de passagers pouvant être transportés n'est pas modifiée.

Après une phase de tests de roulage **sans voyageur** effectuée, le nouvel autocar à hydrogène circulera **en 2023 avec des voyageurs à bord** sur la ligne régionale Nomad Car express Evreux-Rouen.

Un projet de retrofit de 15 autocars est également mené par Safra et porté par la région Occitanie dans le cadre du programme Corridor H<sub>2</sub>.

Pour ce type d'applications, l'hydrogène est l'énergie la mieux adaptée pour un parcours de 380 km ou plus par jour.





# Mobilité

## Bennes à ordures ménagères (BOM)

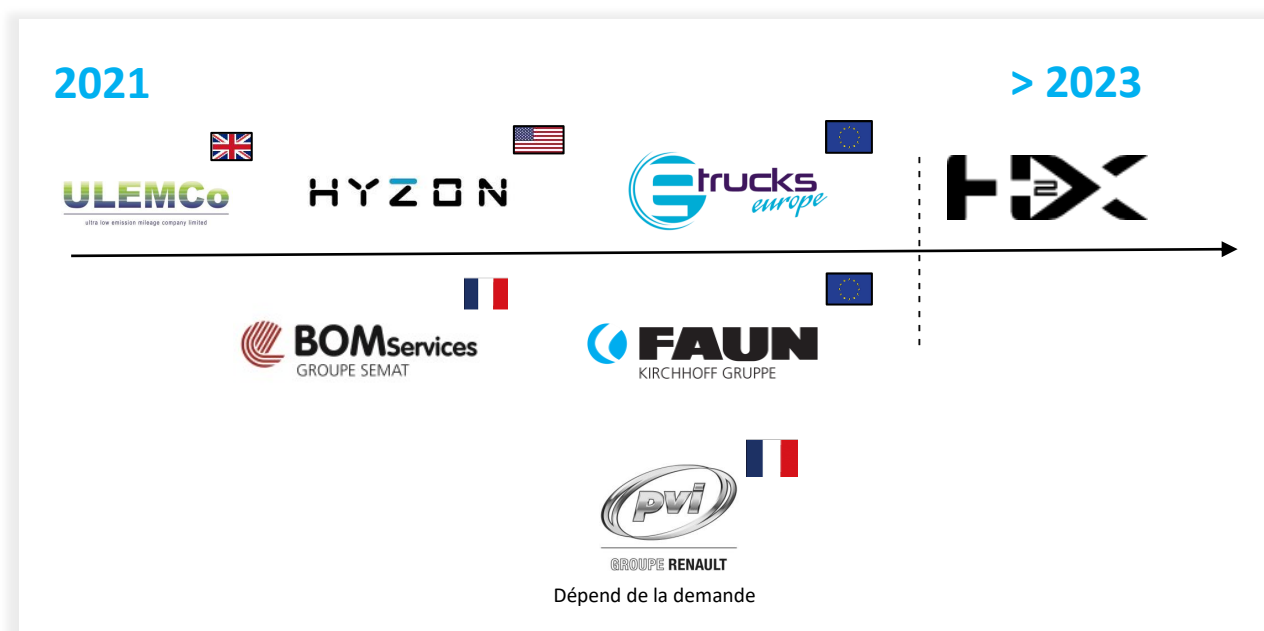
7,5t ≤ PTAC ≤ 32t

Ce segment regroupe les véhicules destinés à la collecte et au transport des déchets ménagers et volumineux. Ces BOM sont équipées de compacteur consommant de l'énergie lors de leurs tournées. Les consommations d'hydrogène sont supérieures à celles des poids lourds pour ces raisons ainsi que les nombreux cycles de démarrage/arrêt. L'autonomie de ces véhicules peut atteindre des autonomies supérieures à 400 km. Nous retiendrons un parcours moyen de 200 km, proche des données d'exploitants.



**Consommation moyenne : 11 - 15 kg H<sub>2</sub>/ 100 km** soit 30 à 40 kg H<sub>2</sub> /jour  
(Source Element Energy)

**Avantages de la solution hydrogène:** Autonomie, temps de recharge en minutes, volume utile, pas d'émission de polluants à l'usage (NOx, CO<sub>2</sub>, particules fines), pas de pollution sonore.

**Notions de coût :** Comme pour les bus, une production en série permettra d'atteindre un effet d'échelle favorable à la baisse des coûts. En supposant que la tendance suive celle des bus, le coût pourrait diminuer de **50%** du prix actuel à l'horizon **2025** pour atteindre un coût compétitif avec le diesel à l'horizon 2030.





-  Moteur à combustion interne H<sub>2</sub>
-  Rétrofit

# Mobilité

## Bennes à ordures ménagères 7,5t ≤ PTAC ≤ 32t



### CARGOPAC X2-H2

**Autonomie :** Jusqu'à 560 km

**Typologie :** Véhicule PEMFC

**Maturité :** Premier déploiement en 2021



Source : ULEMCo



GROUPE RENAULT



### C-less H2

**Autonomie :** 150 – 200 km

**Typologie :** Véhicule électrique (range extender)

**Commercialisation :** 2022



Source : Pvi



ultra low emission mileage company limited



### Ulemco - DAF

**Typologie :** Véhicule thermique  
(dual fuel H<sub>2</sub> – diesel)

**Commercialisation :** 2019



Source : ULEMCo



**Typologie :** Véhicule PEMFC

**Commercialisation :** 2021



Source : HYZON



Moteur à combustion interne H<sub>2</sub>



Retrofit

# Mobilité

## Bennes à ordures ménagères 7,5t ≤ PTAC ≤ 32t



### BLUEPOWER

**Autonomie :** 560 km

**Typologie :** Véhicule électrique (range extender)



Source : Faun



### E-Trucks

**Autonomie :** 400 km

**Typologie :** Véhicule électrique (range extender)



Source : E- Trucks Europe



### H2X Truck

**Autonomie :** NC

**Typologie :** Véhicule PàC H<sub>2</sub>



Source : H2X



Entreprise française



Entreprise Européenne



Usine en France



Membre de France Hydrogène

# Mobilité

## Poids lourds : Medium Duty 7,5t ≤ PTAC ≤ 32t

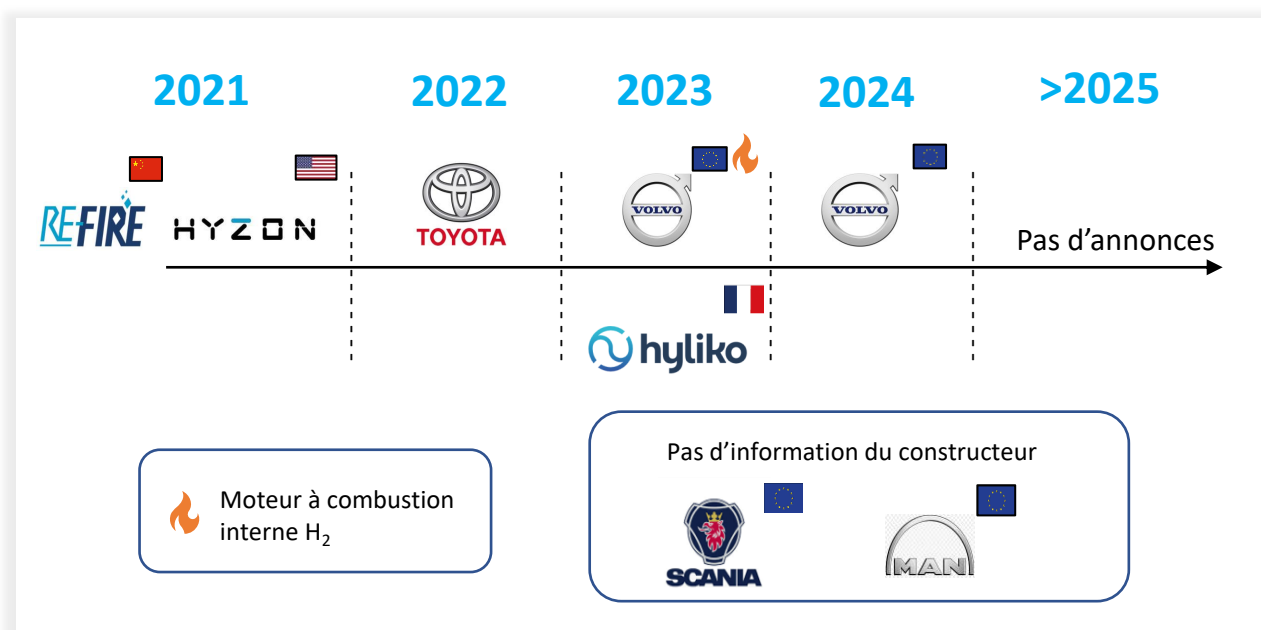
Ce segment regroupe les véhicules routiers destinés au transport de marchandises longue distance sur le réseau national voire européen. Les camions porteurs peuvent permettre de circuler en centre ville pour assurer les livraisons en **logistique du dernier kilomètre** (Livraison des restaurants, supermarché...).

**Consommation moyenne** : 4-6 kg H<sub>2</sub> / 100 km soit 30 kg H<sub>2</sub> / jour (hypothèse de 500 km / jour)

**Avantages de la solution hydrogène** : L'autonomie peut aller au-delà de **500 km WLTP**. Le temps de recharge est également réduit. L'objectif des constructeurs est de pouvoir assurer des autonomies similaires à un véhicule diesel. Fonctionnement silencieux, pas d'émission de polluants à l'usage. (NOx, CO<sub>2</sub>, particules fines)

**Notions de coûts\*** : Le coût total de possession est estimé à **+22%** par rapport au **diesel** à l'horizon **2023**. La tendance devrait **s'inverser** à l'horizon **2030** pour un TCO hydrogène inférieur à celui du diesel.

*\*Source : étude réalisée par Roland Berger pour le FCH-JU "Fuel Cells Hydrogen Trucks – décembre 2020"*





Moteur à combustion interne H<sub>2</sub>



Retrofit

# Mobilité

## Poids lourds : Medium Duty 7,5t ≤ PTAC ≤ 32t



**Toyota – Hino**

**Autonomie** : 600 km

**Charge utile** : 25 t (combiné)

**Typologie** : véhicule PEMFC

**Commercialisation** : 2022 (Pilote)



Source : Toyota



**Volvo** 

**Autonomie** : env. 500 km

**Charge utile** : 19 à 26 t (combiné)

**Typologie** : Véhicule thermique

**Commercialisation** : Projets démonstrateurs en 2022



Source : Volvo



**Volvo**

**Autonomie** : NC

**Charge utile** : > 26 t (combiné)

**Typologie** : Véhicule PEMFC

**Commercialisation** : Pilote en 2024



Source : Volvo

# HYZON

**HyMax-250 châssis**

**Autonomie** : 600 km

**Charge utile** : 25 t

**Typologie** : véhicule PEMFC

**Commercialisation** : 2022



Source : HYZON



Entreprise française





Entreprise Européenne



Usine en France



Membre de France Hydrogène

-  Moteur à combustion interne H<sub>2</sub>
-  Rétrofit

# Mobilité

## Poids lourds : Medium Duty 7,5t ≤ PTAC ≤ 32t

### HYZON

#### HyMax-160 châssis

**Autonomie :** 600 km

**Charge utile :** 16 t

**Typologie :** véhicule PEMFC

**Commercialisation :** 2022



Source : HYZON

### REFIRE

#### Dongfeng - ReFire

**Autonomie :** 300 – 350 km

**Charge utile :** 3,2 t

**Typologie :** véhicule PEMFC

**Commercialisation :** premiers déploiements en 2018 (Shanghai) / non disponible sur le marché français



Source : Refire

### hyliko



**Autonomie :** > 600 km

**Typologie :** véhicule PEMFC

**Commercialisation :** 2023



Source : Hyliko

### E-NEO

CONCEPTEUR VE



#### Camion porteur 19 t

**Puissance moteur électrique:** 280 kW

**Energie / puissance :** pàc 30 kW; batterie : 100 kWh

**Autonomie:** 250 -300 km

**Maturité:** mise en service fin 2022



Source : E-Néo



# Mobilité

## Poids lourds : Heavy Duty > 32 t

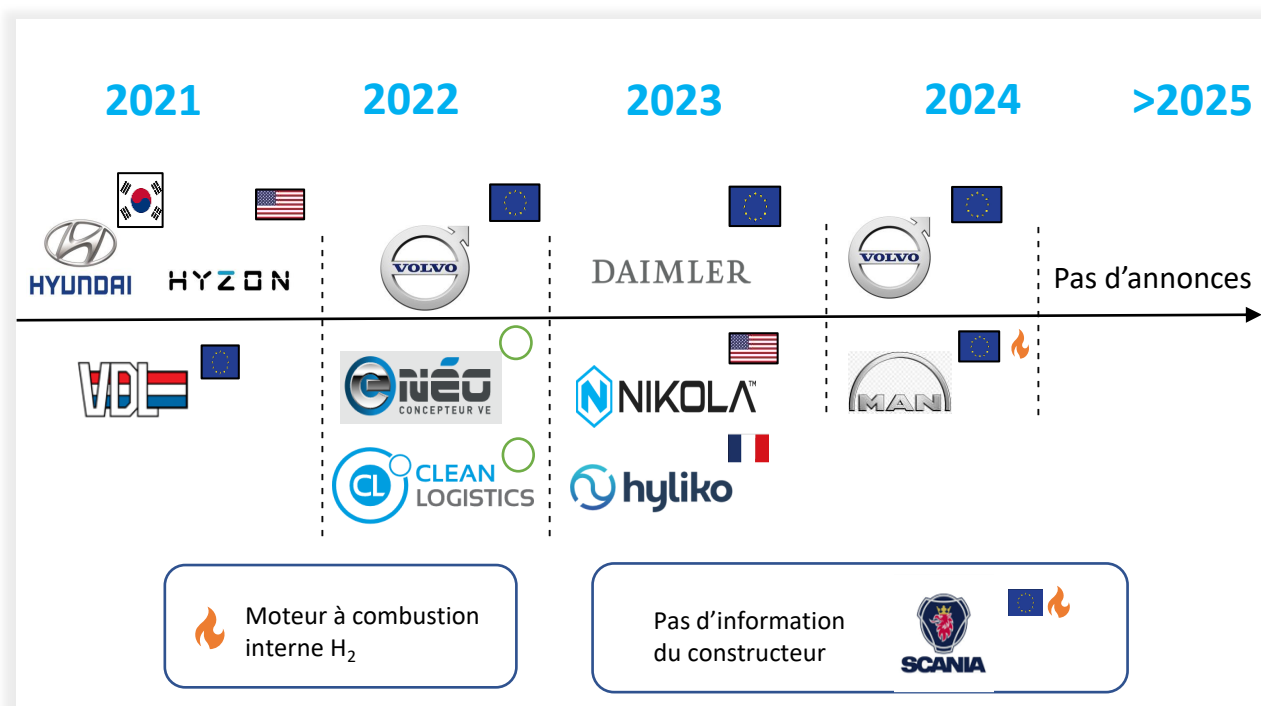
La mobilité lourde est une des pistes prometteuses pour le développement de l'hydrogène. Il permet de décarboner les flottes tout en autorisant des autonomies proches des motorisations diesel. Ce segment assure des livraisons long courrier à l'échelle nationale, internationale ou assure le transport d'engins spéciaux (non concernés par l'étude). Les autonomies d'une motorisation diesel peuvent atteindre 700 à 1000 km.

**Consommation moyenne** : Env **7 - 9 kg H<sub>2</sub> / 100 km** soit jusqu'à **45 kg H<sub>2</sub> / jour** (hypothèse de 500 km / jour)

**Avantages de la solution hydrogène** : L'autonomie peut aller au-delà de 500 km WLTP. Le temps de recharge est également réduit. L'objectif des constructeurs est de pouvoir assurer des autonomies similaires à un véhicule diesel. Fonctionnement silencieux, pas d'émission de polluants à l'usage (NOx, CO<sub>2</sub>, particules fines)

**Surcoût** : Les camions hydrogène **seraient plus compétitifs** par **t.km** que les solutions alternatives : e-carburant, batterie, caténaire du fait des fortes charges et autonomies requises. Le coût total de possession serait **19% plus élevé pour l'hydrogène** que le diesel à l'horizon **2023**. La tendance **s'inverserait** à l'horizon **2030** pour avoir un TCO **10%** plus faible sur la motorisation hydrogène selon leurs hypothèses (cf. les pages en fin de section). Le GNV n'a pas été intégré à l'étude réalisée par Roland Berger.

Sources : Rapport Roland Berger "Fuel Cells Hydrogen Trucks" 2020, Rapport PFA







Moteur à combustion interne H<sub>2</sub>



Retrofit

# Mobilité

## Poids lourds : Heavy Duty > 32 t



### H2 Xcient, version porteur et combiné

**Autonomie :** 400 - 600 km

**Charge utile :** 26 t (combiné),  
10 t en porteur

**Typologie :** Véhicule PEMFC

**Commercialisation :** 2021 (En déploiement)



Source : Hyundai



### PL – retrofit H2

**Autonomie :** 400 km

**Charge utile :** 40 t

**Typologie :** véhicule PEMFC

**Commercialisation :** 2022



Source : E-Néo

# HYZON

### HyMax-450 Puller

**Autonomie :** 200 - 500 km

**Charge utile :** NC

**Typologie :** véhicule PEMFC

**Commercialisation :** 2021



Source : HYZON

# HYZON

### Hymax-250 Puller

**Autonomie :** 200 - 500 km

**Charge utile :** NC

**Typologie :** Véhicule PEMFC

**Commercialisation :** 2021



Source : HYZON



Entreprise française



Entreprise Européenne



Usine en France



Membre de France Hydrogène



Moteur à combustion interne H<sub>2</sub>



Rétrofit

# Mobilité

## Poids lourds : Heavy Duty > 32 t



### Volvo

**Autonomie :** Env. 800 km

**Charge utile :** 40 t (combiné)

**Typologie :** véhicule thermique

**Commercialisation :** 2 projets démonstrateurs en 2022



Source : Volvo



### Tre

**Autonomie :** 1000 km

**Charge utile :** 26 t (combiné)

**Typologie :** Véhicule PEMFC

**Commercialisation :** 2023



Source : Nikola

# DAIMLER



### Mercedes-Benz GenH2

**Autonomie :** 1 000 km

**Charge utile :** 25 t

**Typologie :** véhicule PEMFC

**Commercialisation :** Production série 2025-2028 (Essais clients 2023)



Source : Daimler



### VDL

**Autonomie :** 350 - 400 km

**Charge utile :** 27 t

**Typologie :** Véhicule PEMFC

**Commercialisation :** NC

Phase de démonstration depuis début 2020



Source : VDL



Entreprise française



Entreprise Européenne



Usine en France



Membre de France Hydrogène



Moteur à combustion interne H<sub>2</sub>



Retrofit

# Mobilité

## Poids lourds : Heavy Duty > 32 t



### HyBatt Truck

**Autonomie :** 400 - 500 km

**PTAC:** 40 t

**Energie :** Batterie 200 kWh

**Puissance:** 2 pàc 120 kW /pàc

**Typologie :** Véhicule PàC H<sub>2</sub>

**Commercialisation :** 2022



Source : CLEAN LOGISTICS



**Plateforme Autonomie :** > 600 km

**Typologie :** véhicule PEMFC

**Commercialisation :** 2023



Source : hyliko



### Camion bi-carburant (diesel-hydrogène)

**Autonomie H<sub>2</sub> :** environ 490 km

**Charge utile :** 34 t

**Typologie :** Véhicule thermique

**Maturité:** Début de production en série en Octobre 2022



Source : CMB. tech



Entreprise française



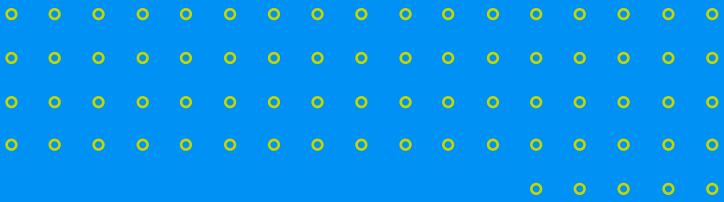
Entreprise Européenne



Usine en France




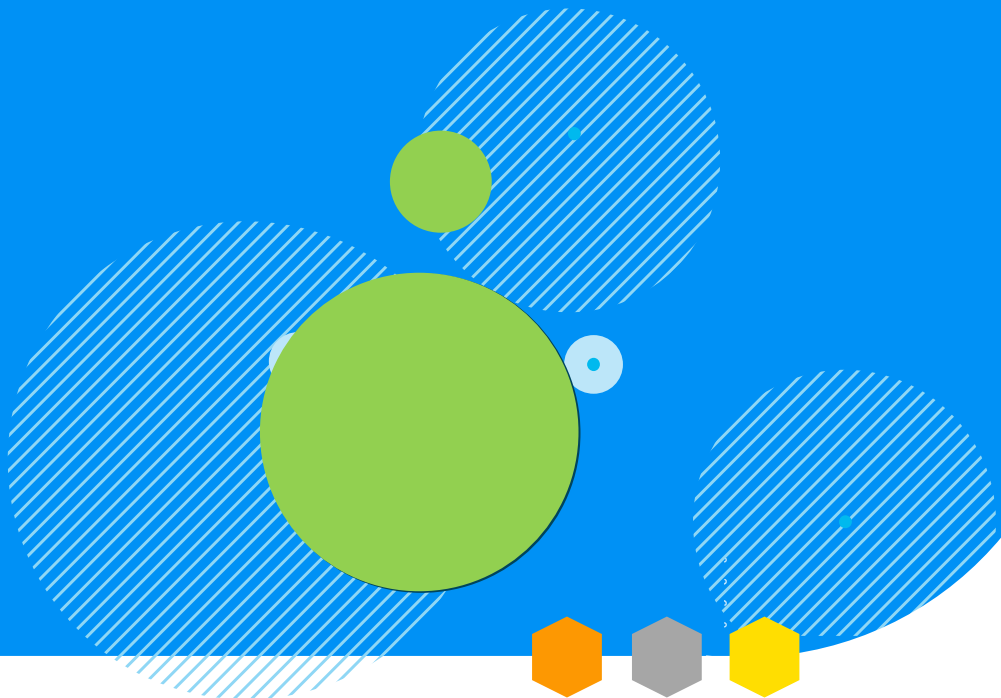
Membre de France Hydrogène



---

# Applications portuaires

---



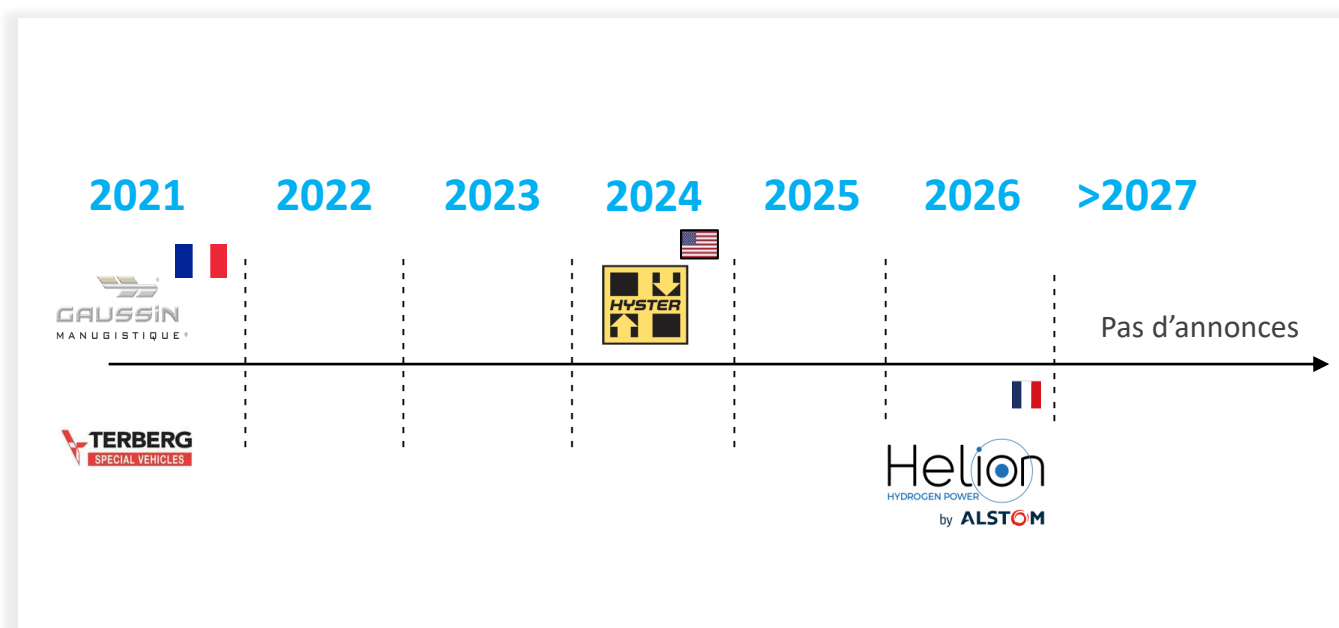
# Applications portuaires

## Equipements au sol

Cette section regroupe les différentes applications portuaires existantes au sol. Les groupes électrogènes n'ont pas été introduits ici mais peuvent également être utilisés au sein du port pour alimenter des portiques électriques ou assurer une alimentation de secours (signalétique pour le réseau ferré par exemple). On retrouvera ici principalement les véhicules de manutention.

**Avantage sur la batterie :** Autonomie, les reach stackers peuvent être utilisés 10h / jour voire plus.

**Avantage sur le GNV :** Fonctionnement silencieux, pas d'émission de polluants à l'usage. (NOx, CO<sub>2</sub>, particules fines)





Moteur à combustion interne H<sub>2</sub>



Retrofit

# Applications portuaires

## Equipements au sol



**Transport de conteneur (APM)**  
**Consommation :** 8 – 10 kg / jour  
**Capacité de traction :** 75 tonnes  
**Autonomie :** 8 à 10h  
**Commercialisation :** 2021



Source : Gaussin



### AGV H2

Engin portuaire autonome  
**Typologie véhicule :** Véhicule pàc  
**Applications :** Containers  
**Charge utile :** 65 tonnes  
**Autonomie avec H<sub>2</sub> :** 24 heures  
**Commercialisation :** Début 2023



Source : Gaussin



**Reach-staker**  
**Consommation :** de 40kg / jour  
**Maturité :** Test au port de Valence



Source : Hyster



**Transport de conteneur**  
**Maturité :** En test au port de Rotterdam



Source : Terberg



Entreprise française



Entreprise Européenne



Usine en France



Membre de France Hydrogène



# Applications portuaires

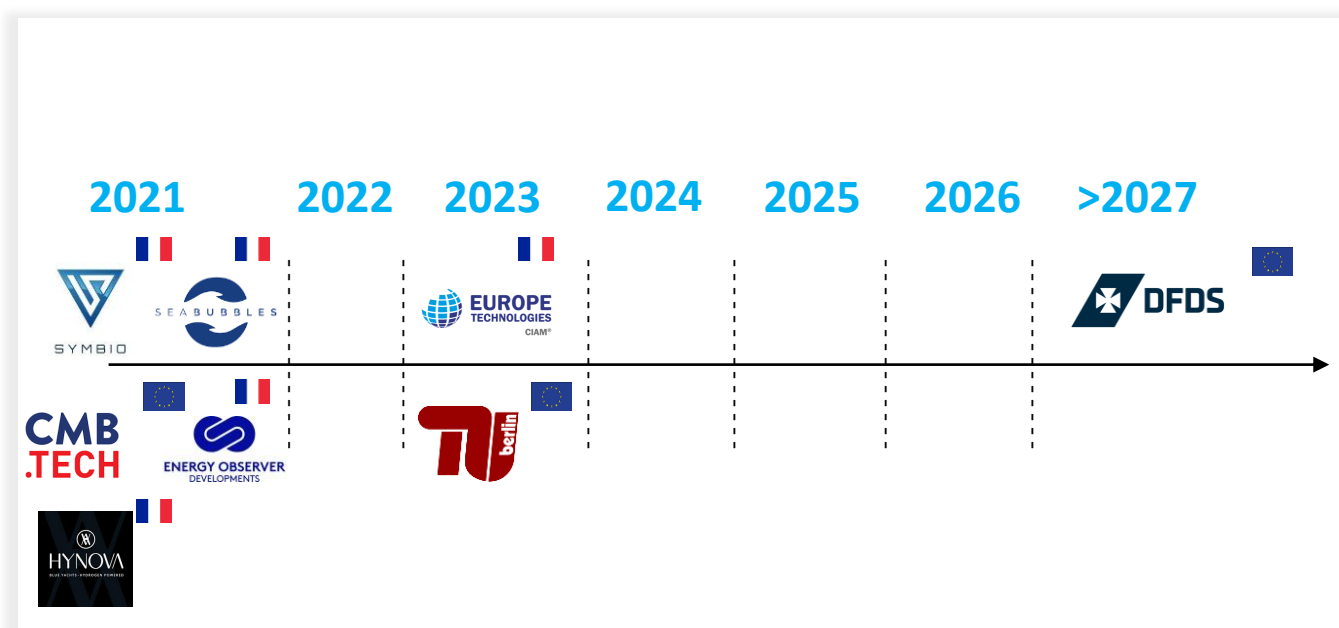
## Éléments flottants



Cette section regroupe les applications de l'hydrogène sur des embarcations flottantes. L'ensemble des projets n'est pas recensé mais une sélection de quelques offres et projets illustrent les applications possibles allant du yacht au ferry en passant par le navire de fret.

L'hydrogène permet d'opérer **sans émissions** (sonore et atmosphérique) facilitant ainsi **l'accès** à certaines **zones de circulation restreintes**. L'autonomie sera plus importante que sur des navires à batterie. Le temps de recharge peut toutefois s'avérer être long suivant la quantité stockée (plusieurs heures). On utilisera ici l'hydrogène sur la **chaîne de propulsion** ou bien pour l'alimentation en **électricité** pour la **vie à bord**.

Certaines applications utilisent des moteurs à combustion interne « dual fuel » qui brûlent de l'hydrogène en injectant une faible quantité de diesel. Cette configuration intervient sur les navires ayant besoin d'une forte puissance ne pouvant pas encore être assurée totalement par une pile à combustible.

L'hydrogène représente aujourd'hui une solution crédible et pertinente pour répondre aux usages énergétiques des différents types de flottes de bateaux et de navires. L'hydrogène peut également être combiné pour obtenir des carburants de synthèse envisagés pour les grands navires (porte-conteneur, vraquier, etc.).



-  Moteur à combustion interne H<sub>2</sub>
-  Rétrofit

# Applications portuaires

## Éléments flottants



### Bubbles

**Capacité** : 8 personnes  
**Typologie** : Véhicule PàC H<sub>2</sub>  
**Consommation** : > 10 kg/jour  
**Autonomie** : 3h en mode taxi  
**Maturité** : première livraison fin 2021



Source : NC



SYMBIO

### Navette

**Capacité** : 24 personnes  
**Typologie** : Véhicule PàC H<sub>2</sub>  
**Consommation** : 10 kg/semaine  
**Autonomie** : 3h en mode taxi  
**Mise en service** : 2018



Source : NC



### HYLIAS

**Capacité** : 150 à 200 personnes  
**Typologie** : Véhicule PàC H<sub>2</sub>  
**Consommation** : 200 kgH<sub>2</sub> / jour  
**Maturité** : Prototype livré en 2023



Source : NC



### HYNOVA

**Capacité** : 12 personnes  
**Typologie** : Véhicule PàC H<sub>2</sub>  
**Autonomie** : 44 miles (70 km) à 8 Nœuds  
**Maturité** : 2021



Source : Hynova

# Applications portuaires

## Éléments flottants



### Station Ship hydrogène

Station de distribution d'hydrogène tout intégré.

**Stockage** : 90 à 250 kg H<sub>2</sub>

**Distribution** : 2 dispensers jusqu'à 400 bars

**Typologie** : Station mobile hydrogène

**Maturité** : Prototype fin 2023



Source : EODDev



### Hyseas

navette hydrogène

**Capacité** : 200 personnes

**Typologie** : véhicule PEMFC

**Maturité** : Commercialisé 2022



Source : Hyseas energy

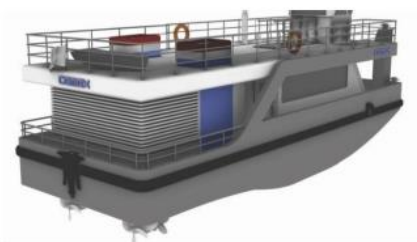


### Bateau pousseur

**Typologie** : Véhicule PEMFC

**Consommation** : 200 kg/jour

**Maturité** : Projet démonstrateur CEMEX (Paris)



Source : NC



### Navette, cargo, ferry

**Capacité** : 50 à 150 passagers  
ou 20 tonnes de marchandises

**Typologie** : Véhicule PEMFC

**Maturité** : Premier déploiement en 2023



Source : NC

# Applications portuaires

## Éléments flottants

BUBBLEFLY 



### Bubblefly

#### Navette

**Capacité** : 6 à 32 passagers

**Typologie** : Véhicule PEMFC

**Maturité** : Premier déploiement en 2022



Source : Gaussin

 DFDS



### DFDS

Ferry hydrogène

**Typologie** : véhicule PàC H<sub>2</sub>

**Capacité** : 1800 Passagers - 2300 « Lane meters » (120 camions ou 380 voitures)

**Typologie** : Véhicule électrique

**Autonomie** : 48h

**Maturité** : 2027



Source : DFDS



### Zesst

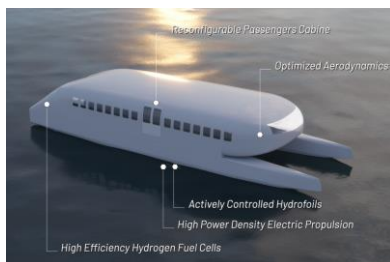
#### Navette

**Capacité** : 50 à 400 passagers  
ou 4 à 36 tonnes de marchandises

**Typologie** : Véhicule PEMFC

**Autonomie** : 100 km

**Maturité** : Premier déploiement en 2025



Source : Zesst



**CMB**  
**.TECH**

### Hydrotug

#### Remorqueur à hydrogène-diesel

Il se compose de deux moteurs BeHydro V12 pouvant fonctionner sur l'hydrogène et diesel ou diesel.

**Puissance / moteur** : 2 MW

**Maturité** : Le premier remorqueur sera opérationnel en 2023



Source : CMB.tech



Moteur à combustion interne H<sub>2</sub>



Retrofit

# Applications portuaires

## Éléments flottants



### Pousseur

Bateau pousseur ou remorqueur

**Typologie véhicule** : véhicule PEMFC

**Autonomie** : NC

**Commercialisation** : NC

**Maturité** : Projet démonstrateur Electra (Allemagne)



Source : Gaussin



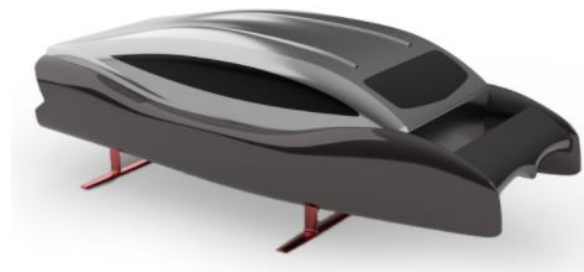
### Mobyfly

**Navette**

**Capacité** : 12 à 300 passagers

**Typologie** : Véhicule PEMFC

**Maturité** : Premier déploiement en 2022



Source : MobyFly



### Hyrex

**Navette**

**Capacité** : 6 à 32 passagers

**Typologie** : Véhicule PEMFC

**Autonomie** : 25 h

**Maturité** : Premier déploiement en 2022



Source : Hyrex



### Hydrocat

**Navire de transfert d'équipage**

Propulsé par un moteur bicarburant (hydrogène-diesel)

**Autonomie**: 1 jour

**Maturité** : Commercialisé



Source : CMB. tech



Entreprise française



Entreprise Européenne



Usine en France



Membre de France Hydrogène



---

# Aéronautique

---





# Aéronautique

## Avion et taxi volant

### AIRBUS



#### Airbus

**Type :** Avion

**Application :** Transport jusqu'à 200 passagers

**Programme :** programme ZEROe

**Maturité :** premiers déploiements en 2035



Source : Airbus



#### Avions Mauboussin

**Type :** Avions à propulsion hybride et hydrogène

**Application :** transport de passagers : 2

**Hydrogène utilisé :** 700 bar

**Maturité :** premiers déploiements en 2025



Source : Avions Mauboussin



#### Blue Spirit Aero

**Type :** Avions légers (de 4 à 8 places)

**Hydrogène utilisé :** Gazeux à 700 bars

**Maturité :** 2026

Source : Blue spirit aero

### Hover taxi



#### Hover taxi

**Type :** Taxi Volant

**Application :** transport de passagers : 2 actuellement et 5 à l'avenir

**Maturité :** Démonstrateur au plus tard en début 2022



Source : Hover taxi



Moteur à combustion interne H<sub>2</sub>



Retrofit

# Aéronautique

## Avion et taxi volant

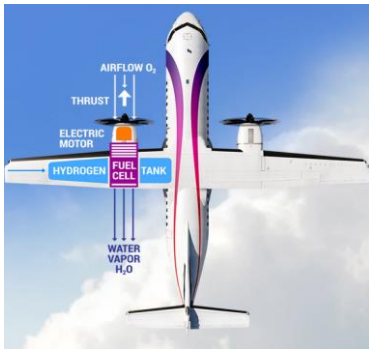


### ZeroAvia

**Type :** Avion

**Application :** transport pour 10 à 20 passagers

**Maturité:** premier déploiement en 2024



Source : Zero Avia



### PA-890

Cet appareil sera équipé d'une pile à combustible(HT-PEM)

**Capacité :** 7 passagers

**Maturité :** Essais en vol d'ici 2027



Source : Piasecki



Entreprise française



Entreprise Européenne



Usine en France



Membre de France Hydrogène

# Aéronautique

## Drone

### H<sup>3</sup>Dynamics



#### H3Dynamics

**Autonomie :** Entre 30 min à 3h pour 2kg  
**Hydrogène utilisé :** Hydrogène liquide  
**Maturité :** Fin 2021



Source : H3 Dynamics

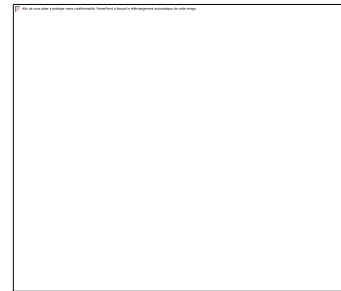
### DELAIR

AERIAL INTELLIGENCE

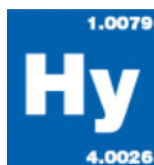


#### Delair

**Type :** Pile à combustible à cathode ouverte  
 Solution en plug and play  
**Applications :** Industrie et sécurité  
**Maturité :** 2022



Source : Delair



**Hydrogène utilisé :** Hydrogène liquide  
**Autonomie :** 5h pour 800 grammes  
**Maturité :** Premiers tests en cours



Source : Hylium industries



Drone multicoptère à pile à combustible et à batterie.

**Hydrogène utilisé :** Hydrogène liquide  
**Masse maximale au décollage :** 700 grammes  
**Maturité :** Premier test en cours



Source : Hyundai Motor Group





---

# Ferroviaire

---



-  Moteur à combustion interne H<sub>2</sub>
-  Rétrofit

# Ferroviaire Train

## ALSTOM



### Alstom Régiolis

**Typologie :** Bimode pour le Régiolis

**Maturité :** Essais en 2023

(Coradia iLint est déjà déployé en Allemagne en 100% hydrogène)



Source : Helion

## DB SIEMENS



### Deutsche Bahn Energy en partenariat avec Siemens (Mireo H)

**Typologie :** 100% hydrogène

**Maturité :** Essais en 2024



Source : Siemens

Siemens

## STADLER



### Stadler rail

**FLIRT H2**

**Capacité :** 108 sièges

**Typologie :** 100% hydrogène

**Maturité :** Essais en 2025



Source : STADLER

## DB SIEMENS



### Mireo Plus H

**Autonomie :** 800 km en plein hydrogène

**Maturité :** Essais en 2023, mise en service 2024



Source : Siemens



---

# Engins spéciaux

---





# Engins spéciaux

## Chariot élévateur

**Typologie** : Aujourd'hui, toutes les gammes de chariots élévateurs peuvent être converties à l'hydrogène.

**Consommation moyenne** : 0,5-1,5 kg H<sub>2</sub> / jour

**Autonomie** : 8-9 h



**Avantages sur la batterie** :

- **Meilleures performances** : les performances des chariots élévateurs à batterie actuels (batterie au plomb) se dégradent au cours d'une journée de travail, à mesure que la batterie se vide. Grâce à leur capacité à fournir une tension constante, les chariots élévateurs à hydrogène offrent de meilleures performances sur des périodes de travail plus longues.
- **Les changements de batteries ne sont plus nécessaires** : les chariots élévateurs à hydrogène peuvent être ravitaillés rapidement et efficacement à partir d'un système de remplissage très similaire à celui utilisé actuellement pour le plein des véhicules dans les stations-service.
- **Récupération d'espace dans les entrepôts** : En fonction de la taille du parc de chariots élévateurs exploité et du nombre de chargeurs de batterie installés pour maintenir les unités en fonctionnement pendant les longues périodes de travail, il peut être nécessaire de consacrer une grande partie de l'espace au sol à une salle comprenant tous les équipements de charge et de changement.
- **Temps de recharge** : Le ravitaillement des chariots élévateurs à hydrogène ne prend que 3 minutes, contre 20 minutes pour les batteries au plomb actuelles.
- **Suppression des risques de santé** : Les batteries actuelles des chariots élévateurs doivent être dégazées dans le cadre du processus de chargement des batteries. Sans une ventilation correcte de la zone de chargement des batteries, l'accumulation de fumées de dégazage peut nuire à la santé des travailleurs.
- **Surcoût (à l'achat)** : 25% par rapport à la batterie
- **Prix unitaire** : Env. 20 k€ à 40 k€ suivant le type de chariot



# Engins spéciaux

## Mobilité légère

**Typologie** : Généralement, les engins de déplacements personnels motorisés légers sont utilisés en ville (vélos, triporteurs, scooters et balayeuses)

**Puissance PAC** : < 6 kW

**Autonomie** : Environ **3 fois plus importante** qu'un véhicule à batterie



**Avantages** :

- **Meilleure autonomie** : Tout comme les autres véhicules hydrogène, ils bénéficient d'une autonomie annoncée comme trois fois plus importante qu'un véhicule à batterie (source : Pragma Industries).
- **Usages multiples de l'hydrogène** : L'hydrogène étant un vecteur énergétique, il peut avoir d'autres fonctions que la mobilité. Par exemple dans le cas du réglage de la température des marchandises (blocs de froid) durant le transport par triporteur.
- **Solution économique à forte visibilité** : En fonction des besoins d'un territoire ou d'une collectivité, l'installation d'une flotte de véhicules légers hydrogène permet de réaliser un premier investissement sur une solution moins coûteuse et visible.
- **Temps de recharge** : Le ravitaillement des véhicules légers à hydrogène ne prend que 3 minutes contre 20 minutes pour les batteries actuelles (lithium-ion ou plomb).

**Inconvénients** :

- **Encombrement de l'hydrogène** : Ces véhicules étant par définition relativement légers et petits, le stockage de l'hydrogène présente des enjeux d'encombrement et de poids. Ces inconvénients sont compensés par une compression importante de l'hydrogène à 700 bar ainsi que de nouvelles technologies de stockage (cf. stockage solide p.61)
- **Notions de coûts** : L'hydrogène est fortement soumis aux effets d'échelle, l'adoption d'une flotte de véhicules légers peut encore représenter un surcoût par rapport à la batterie par exemple.



-  Moteur à combustion interne H<sub>2</sub>
-  Rétrofit

# Engins spéciaux

## Mobilité légère



**Acteurs en France :** Pragma Industries, CycleEurope (Gitane+ Stor-H)

**Acteurs en Europe :** Rytle, Atena Scarl

**Autonomie :** 100-150 km

**Temps de recharge :** 2-6min (capsules interchangeables)

**Poids :** ≈20-25 kg

**Maturité :** commercialisé

Source : Pragma industries



Source : Stor-H



### Green Machine

**Taille :** 1 m<sup>3</sup> pour le centre ville

**Typologie :** PAC PEM sans assistance batterie

• Stockage fixe :

104 L à 700 bar → 11 h de fonctionnement

• H<sub>2</sub>-pod à cartouche rechargeable :

52 L à 300 bar → 4 h de fonctionnement

**Poids :** 2325 kg



Source : CMAR

# Engins spéciaux



ultra low emission mileage company limited



## Balayeuse sur châssis DAF

Acteurs en France : **E-Neo**

Acteurs en Europe : **Ulemco**

Ulemco réalise un rétrofit dual fuel (Diesel avec injection d'hydrogène).



Source : ULEMCo



ultra low emission mileage company limited



## Chasse neige sur châssis DAF

Acteurs en France : **E-Neo**

Acteurs en Europe : **Ulemco**

Ulemco réalise un rétrofit dual fuel (Diesel avec injection d'hydrogène).



Source : ULEMCo



Moteur à combustion interne H<sub>2</sub>



Retrofit

# Engins spéciaux

## Mobilité légère



### Scooter AM1

Un modèle L1e (équivalent 50 cc) et un modèle L3e (équivalent 125 cc).

**Capacité de la bouteille :** 6,8 kg d'H<sub>2</sub>

**Autonomie estimée :** >150 km

**Commercialisation :** mai 2023



Source : Pragma industries



### Véhicule – Hermione

**Autonomie :** 180 km

**Typologie :** 1 pile 5 kW F005 + 2 stockages T700

**Maturité :** Commercialisé



Source H2X Ecosystems



Entreprise française



Entreprise Européenne





Usine en France



Membre de France Hydrogène



-  Moteur à combustion interne H<sub>2</sub>
-  Rétrofit

# Engins spéciaux



## Semi-remorque frigorifique

**Typologie:** Véhicule PàC + batterie  
**Autonomie:** 1 jour en distribution, 2 à 3 jours en longue distance  
**Commercialisation:** Phase d'industrialisation



Source : CHEREAU



## Dameuse

**Acteurs en France :** CM DUPON  
**Autonomie :** 6 à 7 h  
**Commercialisation :** estimée à 2025  
**Maturité :** prototype



Source : Pinorth



## Tractopelle thermique hydrogène

**Maturité :** prototype



Source : JCB





## Pelleteuse 20 t électrique hydrogène

**Maturité :** prototype



Source : JCB



-  Moteur à combustion interne H<sub>2</sub>
-  Rétrofit

# Engins spéciaux



## Tracteur Agricole

**Typologie:** Véhicule à batterie (traction) + PàC (système de relevage)

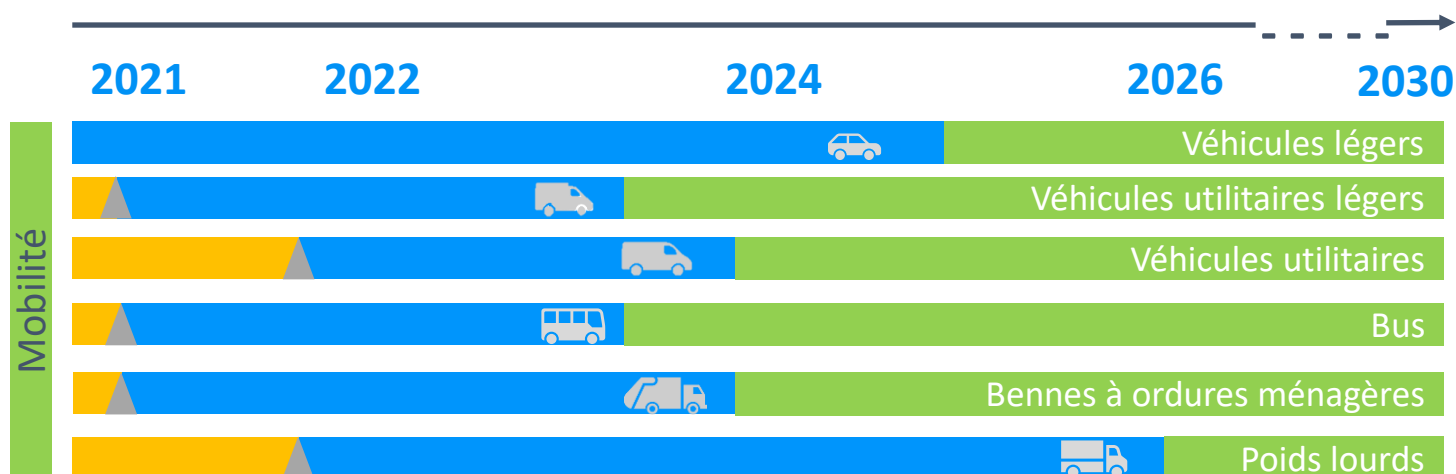
**Commercialisation:** estimée à 2022



Source : E-Néo

# Synthèse sur la mobilité

Horizon de déploiement commercial de l'hydrogène pour différentes applications de mobilité :





---

# Usages stationnaires

---



# Usages stationnaires

## Principes généraux

Cette catégorie regroupe les **usages stationnaires de l'hydrogène**. Ce segment regroupe la production de chaleur, d'électricité, d'eau chaude sanitaire mais aussi les usages de l'hydrogène dans l'industrie. Il convient de distinguer **3 sous-catégories** pour cette section :

- Les **systèmes de chauffage** à hydrogène : l'hydrogène est injecté comme combustible soit dans un **système pile à combustible** pour des applications de chauffage et électricité voire de la production d'eau chaude sanitaire si la puissance le permet, soit dans une **chaudière (brûleur)** pour des applications de chauffage et production d'eau chaude sanitaire. Dans le cas des systèmes pile à combustible et selon les solutions, l'alimentation peut se faire directement via de l' $H_2$  mais aussi via le réseau de gaz naturel avec un reformeur intégré. Dans le cas des chaudières, les taux d'injection d'hydrogène peuvent être variables, allant de 10% jusqu'à 100% pour les modèles de chaudière dédiés à l'hydrogène. Cette section intègre par ailleurs les solutions de **cogénération** avec un **moteur à combustion interne** permettant la production d'électricité tout en fournissant de la chaleur.
- Les **groupes électrogènes** : ils permettent d'assurer la fourniture d'électricité de manière temporaire. Ils peuvent être utilisés pour des applications en secours afin d'avoir une alimentation en cas de panne. On les retrouve également sur de l'événementiel où leur avantage réside dans l'absence de bruit et l'absence d'émission de particules et autres polluants. Ces systèmes peuvent également répondre à des besoins en énergie électrique sur des sites isolés non connectés au réseau électrique.
- Les systèmes permettant la **flexibilité des énergies** : ils répondent notamment à la problématique de stockage des EnR en déporté chez l'usage, et en particulier c'est un enabler à l'autoconsommation énergétique. Ce segment regroupe les **systèmes hybrides** produisant localement de l'hydrogène par électrolyse qui peut être stocké dans des réservoirs pour être converti en électricité et/ou chaleur via des piles à combustibles, mais aussi les **systèmes permettant l'électrification du gaz** de manière à produire de la chaleur et de l'eau chaude sanitaire via une électrolyse locale intégrée à une chaudière  $H_2$ , ainsi que les solutions d'électrolyse locale pour **l'hybridation et la décarbonation des combustions dans l'industrie**.



Source: Sylfen

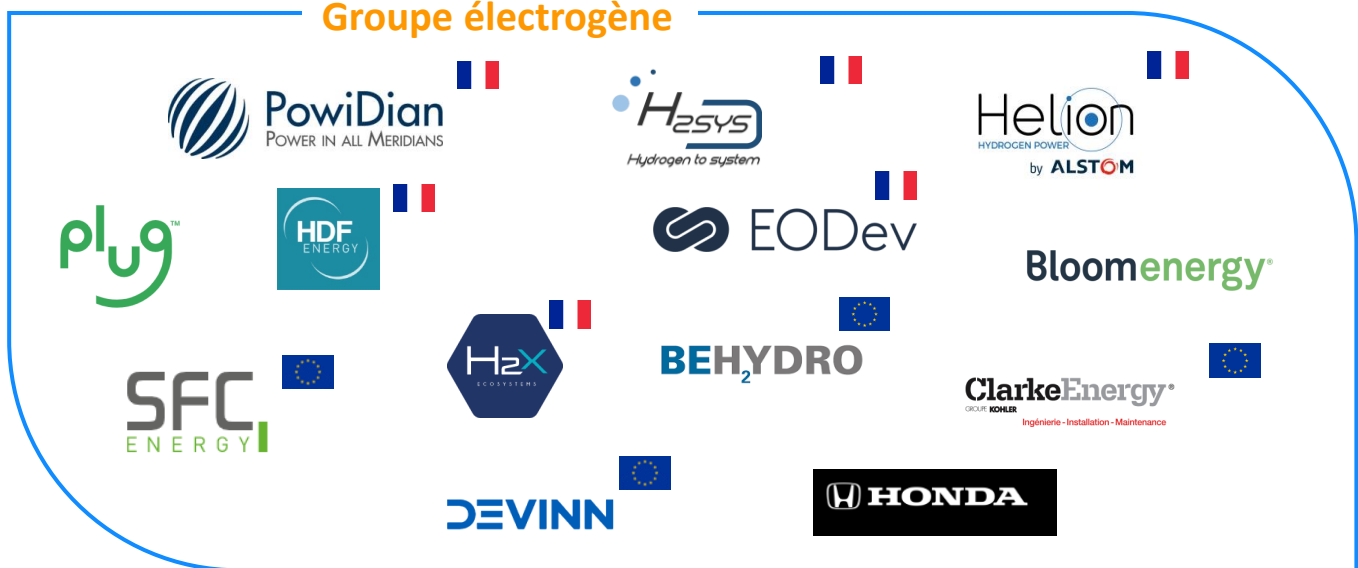
# Usages stationnaires

## Acteurs de la filière

### Système de chauffage





### Groupe électrogène



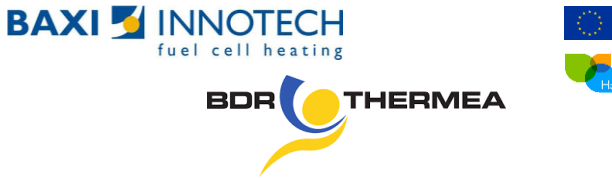
### Flexibilité des énergies



-  Moteur à combustion interne H<sub>2</sub>
-  Rétrofit

# Usages stationnaires

## Système de chauffage



### Gamma Fuel Cell

**Fabricant:** Baxi Innotech  
**Applications:** Habitat  
**Fonction:** Chauffage, électricité, ECS  
**Gaz d'alimentation :** HYDROGENE  
**Pile à combustible:** PEM  
**Puissance électrique:** 1,9 kW  
**Puissance thermique:** 20 kW  
**Maturité:** Démonstrateur



Source : BDR Thermea



### eLecta 300

**Fabricant:** Remeha  
**Applications:** Habitat  
**Fonction:** Chauffage, électricité, ECS  
**Gaz d'alimentation :** GN + vaporeformage  
**Pile à combustible:** PEM  
**Puissance thermique:** 28 kW  
**Puissance électrique:** 705 W  
**Maturité:** Démonstrateur



Source : BDR Thermea



### Dachs 0.8

**Fabricant:** SenerTec  
**Applications:** Habitat  
**Fonction:** Chauffage, électricité  
**Gaz d'alimentation :** GN + vaporeformage  
**Pile à combustible:** PEM  
**Puissance thermique:** 1,1 kW  
**Puissance électrique:** 750 W  
**Maturité:** Démonstrateur



Source : BDR Thermea





### Chaudières De Dietrich et Chappee

Ces modèles fonctionnent à **20% d'hydrogène**.  
**Applications :** Habitat collectif, individuel, tertiaire  
**Fonction:** Chauffage et ECS  
**Puissance:** 10 à 10080 kW  
**Maturité :** Commercialisé depuis 2010



Source : BDR Thermea



-  Moteur à combustion interne H<sub>2</sub>
-  Rétrofit

# Usages stationnaires

## Système de chauffage



### Chaudières De Dietrich

Ces modèles fonctionnent à **100% d'hydrogène**.

**Applications** : Habitat collectif, individuel, tertiaire

**Fonction** : Chauffage et ECS

**Puissance** : 24/28 kW et 45 kW

**Maturité** : Démonstrateur



Source : BDR Thermana



### Eco-générateurs De Dietrich

Une gamme fonctionne de **0 à 40% H<sub>2</sub>**

Gamme complémentaire fonctionne à **100% H<sub>2</sub>**

**Applications** : Habitat collectif et tertiaire

**Fonction** : Chauffage et ECS

**Puissance thermique** : 10 à 100 kW

**Puissance électrique** : 5 à 50 kW

**Maturité** : Commercialisé depuis 2010



Source : BDR Thermana



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

Ces modèles fonctionnent à **100% d'hydrogène**.

**Fabricant** : 2G Energy

**Applications** : Industrie, secteur hospitalier ou hôtelier, parcs de loisirs

**Fonction** : Chaleur et électricité

**Puissance thermique** : 129 à 371 kW

**Puissance électrique** : 115 à 360 kW

**Maturité** : Commercialisé



Source : 2G Energy



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

**Applications** : Habitat



**Fonction** : Chaleur

**Puissance fournie** : Max 5,36 kW

**Maturité** : En développement



Source : GIACOMINI

-  Moteur à combustion interne H<sub>2</sub>
-  Rétrofit

# Usages stationnaires

## Groupe électrogène



### MobHyl Power S4, M30, M110

**Applications** : site isolé, évènementiel, chantier de construction, télécom

**Production** : électricité

**Consommation d'hydrogène** : 67 g/kWh

**Puissance**: 8kVA(S4)/45 kVA (M30)/110 kVA (M110)

**Autonomie** : 5h avec 2 bouteilles B20 , 8h avec cadre V09 et 8h avec cadre V18 (à 50% Pnom)

**Maturité** : commercialisé



Source : PowiDian



### FC RACK™ Stationnaire:

**Application** : site isolé, évènementiel, chantier de construction, data centers, télécom, alimentation à quai des navires

**Production** : électricité

**Consommation d'hydrogène** : hydrogène gazeux - pression supérieure à 10 bars

**Puissance** : 100 kW à quelques MW

**Autonomie** : dépend de la quantité d'hydrogène stockée

**Maturité** : commercialisé en 2021



Source : Helion Hydrogen Power  
© ALSTOM SA 2023. Alstom Hydrogène SAS. FC-Rack™.



**Application** : site isolé, évènementiel, chantier, alimentation de secours

**Production** : électricité

**Maturité** : commercialisé

### BOXHY 5 kVA

**Puissance** : 3,2 kW

**Consommation d'hydrogène** : 0,15 kg/h

### THYTAN 50/130 kVA

**Puissance** : 80 kW

**Consommation d'hydrogène** : 5 kg/h



Source : H2SYS



**Application** : alimentation de secours

**Production** : électricité

**Puissance installation** : 1MW

**Maturité** : essai en 2023



Source : CPG Click Petroleo e gas



Moteur à combustion interne H<sub>2</sub>



Rétrofit

# Usages stationnaires Groupe électrogène



**Application** : alimentation de secours, site isolé, événementiel, chantier  
**Production** : électricité  
**Autonomie** : réservoir dimensionné selon le besoin  
**H2X G005 – G025**  
**Puissance** : 5 kW à 25 kW  
**Consommation d'hydrogène** : 58 g/kWh  
**Maturité** : commercialisé  
**H2X G350**  
**Puissance** : 350 kW-5MW  
**Consommation d'hydrogène** : 65 g/kWh  
**Maturité** : commercialisé



Source H2X Ecosystems

## Bloomenergy®

### Bloom Box

**Application** : stationnaire, alimentation de secours,  
**Production** : électricité  
**Puissance installation** : 300 kW  
**Consommation d'hydrogène** : 17,3 kg/h



Source : Bloomenergy

## DEVINN



### H2 BASE

**Application** : recharge rapide de l'électromobilité, chantier de construction, événementiel  
**Production** : électricité + Chaleur  
**Consommation d'hydrogène** : 60 g/kWh  
**Puissance installation** : de 30 kW à 100 kW  
**Autonomie**: 10 heures de fonctionnement continu  
**Maturité** : commercialisé

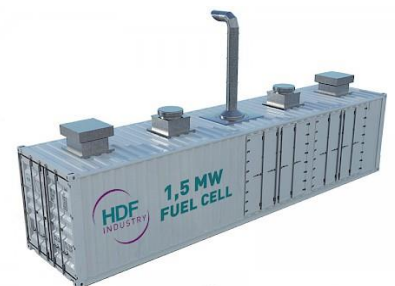


Source : DEVINN



### HyPower

**Application** : stationnaire, maritime, Ferroviaire, back-up Data center  
**Production** : électricité  
**Puissance installation** : 1,5 MW  
**Consommation d'hydrogène** : < 60 g/kWh  
**Maturité** : commercialisé



Source : HDF Energy



Entreprise française



Entreprise Européenne



Usine en France



Membre de France Hydrogène

# Usages stationnaires

## Groupe électrogène

 EODDev



### REXH2

**Application** : propulsion ou vie à bord pour applications maritimes et fluviales  
**Production** : électricité + chaleur  
**Consommation d'hydrogène** : 65 g/kWh  
**Puissance** : 70 kW  
**Autonomie** : réservoir dimensionné selon le besoin  
**Maturité** : commercialisé



Source : EODDev

 EODDev



### GEH2

**Applications** : site isolé, alimentation de secours  
**Production** : électricité  
**Consommation d'hydrogène** : 65 g/kWh  
**Puissance** : 110 kVA  
**Autonomie** : réservoir dimensionné selon le besoin  
**Maturité** : commercialisé



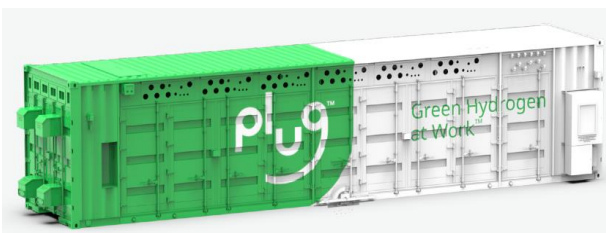
Source : EODDev





### GenSure HP

**Application** : secours/Back-up, Prime power  
**Production** : électricité  
**Consommation d'hydrogène** : 60 à 67 g/kWh  
**Puissance installation** : 1,5 MW  
**Autonomie** : réservoir dimensionné selon le besoin  
**Maturité** : commercialisé



Source : Plug





### GenSure LP

**Application** : sites de télécommunications, passages à niveau ferroviaires  
**Production** : électricité  
**Consommation d'hydrogène** : 60 à 67 g/kWh  
**Puissance installation** : 200 W, 1100 W et 2500 W  
**Autonomie** : réservoir dimensionné selon le besoin  
**Maturité** : commercialisé



Source : Plug



Moteur à combustion interne H<sub>2</sub>



Retrofit

# Usages stationnaires

## Groupe électrogène

**SFC**  
ENERGY



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

**Application** : alimentation de secours, système autonome

**Production** : électricité

**Puissance nominale** : jusqu'à 5 kW

**Autonomie** : 21,6 h avec 6 bouteilles de 50 l (300 bar) à 5kW

**Maturité** : commercialisé



Source : SFC ENERGY

**SFC**  
ENERGY



### H2 Genset

**Application** : site isolé, alimentation de secours, événementiel

**Production** : électricité

**Puissance nominale** : jusqu'à 20 kW

**Autonomie** : 36 h à 10kW

**Maturité** : NC



Source : SFC ENERGY



Entreprise française



Entreprise Européenne



Usine en France



Membre de France Hydrogène



Moteur à combustion interne H<sub>2</sub>



Retrofit

# Usages stationnaires Groupe électrogène



## ClarkeEnergy®

GRUPE KOHLER

Ingénierie - Installation - Maintenance



### JENBACHER INNIO 60% & 100% H<sub>2</sub>

**Application :** Couplé réseau, autoconsommation, îlotage, cogénération

**Production :** Électricité + Chaleur

**Puissance installation :**

de 500 kWe à 900 kWe (moteur 100 % H<sub>2</sub>)

de 250 kWe à 4,5 MWe (moteur 60 % H<sub>2</sub>)

**Fonctionnement :** Continu ou en pointe

**Consommation d'hydrogène :** 75 g/kWh

**Maturité :** commercialisé



Source : Clarke Energy



## BEHYDRO<sub>2</sub>



### Moteur à gaz 100% hydrogène/ diesel-hydrogène

**Applications :** Site isolé, secours forte puissance, industrie

**Production :** Électricité

**Puissance d'installation :** 1MW – 2.6 MW

**Consommation d'hydrogène :** 70 g/kWh

**Autonomie:** NC

**Commercialisation:** Disponible



Source : BEH<sub>2</sub>YDRO



Entreprise française



Entreprise Européenne



Usine en France



Membre de France Hydrogène



# Usages stationnaires

## Flexibilité des énergies

Sylfen



### Smart Energy Hub

Solution accompagnant la transition énergétique des bâtiments. Elle donne la main aux propriétaires pour gérer leur énergie: analyse de production et de consommation, stockage lors de pics de production (via les vecteurs hydrogène et batteries), puis restitution aux moments optimaux. Cette solution innove avec un système réversible : électrolyseur et pile à combustible restituant électricité et chaleur.

**Type d'application :** Collectif, Tertiaire, Industriel

**Production :** Electricité + Chaleur + hydrogène

**Maturité :** Premiers déploiements / début d'industrialisation



Source : Sylfen

Powidian  
POWER IN ALL MERIDIANS



### Station SAGES

Système hybride qui produit de l'H<sub>2</sub> par électrolyse pour le stocker dans des réservoirs pour être convertis en électricité et/ou chaleur via des PàC

**Type d'application :** Alimentation de secours, autoconsommation, site isolé

**Production :** Electricité + Chaleur + hydrogène

**Puissance installation :** jusqu'à 500 kW

**Maturité :** Commercialisé



Source : Powidian

hps  
HYDROGEN POWER SOLUTIONS



HPS a développé un système nommé Picea qui est une solution d'auto-consommation adaptée aux besoins d'une maison individuelle. L'hydrogène produit est valorisé en production d'électricité et de chaleur pour l'habitation.

**Type d'application :** Individuel, collectif

**Production :** ECS + électricité + ventilation

**Puissance électrique continue :** 1,5 kW

**Maturité :**  
Commercialisé



Source : hps

**TOSHIBA**

### Pure Hydrogen Fuel Cell System, H2Rex™

**Type d'application :** Logement individuel, collectif, tertiaire

**Production :** Electricité + chaleur

**Puissance électrique :** 100 kW – 1 MW

**Maturité :**  
Commercialisé



Source : TOSHIBA



Moteur à combustion interne H<sub>2</sub>



Retrofit

# Usages stationnaires

## Flexibilité des énergies

# HENSOLDT



### SURHYCATE

Système conteneurisé équipé d'électrolyseur, de PàC et de réservoirs permettant le stockage et la restitution de l'énergie

**Type d'applications :** Site isolé, bâtiments, mobilité légère

**Production :** Electricité + chaleur + Hydrogène

**Puissance de sortie des PàC:** 30 kW ou 60 kW

**Puissance batteries:** 50 kW

**Maturité :** Commercialisé



Source : Hensoldt Nexeya France

# SOLENCO POWER



### Solenco Powerbox / Powerhub

Cette solution complète alimentée par des énergies renouvelables permet de produire de l'hydrogène via une pile à combustible réversible.

L'hydrogène produit est stocké. Quand il y a une demande d'énergie qui ne peut pas être livré directement par la source d'énergie renouvelable, l'hydrogène stocké est reconverti en électricité et chaleur via la pile à combustible réversible.

**Applications:** Résidentiel, logistiques, sites industriels

**Fonction :** Chaleur et électricité

**Puissance nominale :** Powerbox 5kW, Powerhub kW (>5kW)

**Maturité :** Commercialisé



Source : Solenco Power



Entreprise française





Entreprise Européenne



Usine en France



Membre de France Hydrogène

-  Moteur à combustion interne H<sub>2</sub>
-  Rétrofit

# Usages stationnaires

## Flexibilité des énergies



### Electrolyseurs associés aux Chaudières Chappee

Ces modèles fonctionnent avec une électrification du gaz

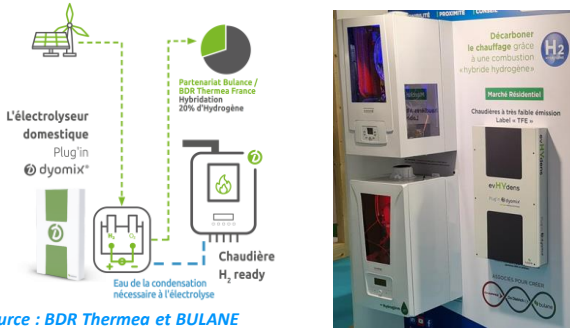
**Applications :** Habitat collectif, individuel, tertiaire

**Fonction:** Chauffage et ECS

**Puissance:** 3 à 35 kW

**Maturité:** Preuve de concept en cours

Réglementation en cours d'évolution



### Electrolyseurs associés aux Chaudières De Dietrich

Ces modèles fonctionnent avec une électrification du gaz

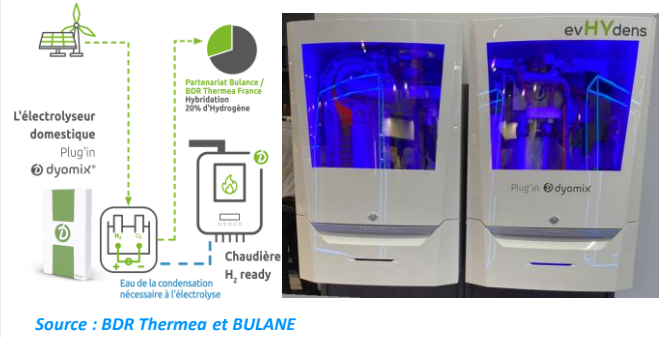
**Applications :** Habitat collectif, individuel, tertiaire

**Fonction:** Chauffage et ECS

**Puissance:** 3 à 10 MW

**Maturité:** Preuve de concept en cours

Réglementation en cours d'évolution



### LP2H - Local Power To Heat

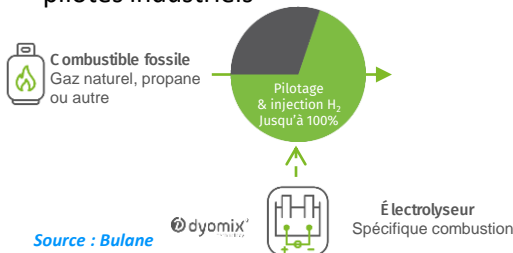
Solution d'électrolyse locale pour l'hybridation et la décarbonation des combustions dans l'industrie.

**% H<sub>2</sub> dans les combustions :** 20% à 100%

**Gamme de puissances électriques :** 2 kW - 1 MW

**Maturité :**

- Solution LP2H (Dyoflam) pour usages « oxy-combustion » – Commercialisation européenne de +1500 unités)
- Solution LP2H pour usages « combustion » – pilotes industriels



# Glossaire

<b>AEM</b>	Technologie d'électrolyse : Anion Exchange Membrane
<b>Bar</b>	Unité de pression : 1 bar = Pression Atmosphérique
<b>Barg</b>	Bar jauge : exprime l'écart à la Pression Atmosphérique normale (utilisation manométrique)
<b>Boil-off</b>	Phénomène d'évaporation d'un liquide cryogénique dû au réchauffement naturel de celui-ci
<b>CO<sub>2</sub></b>	Dioxyde de Carbone
<b>CSR</b>	Combustible solide de récupération
<b>Ft</b>	Le pied ou ft (en anglais foot) est une unité de longueur correspondant à la longueur d'un pied humain, c'est-à-dire 30,48 cm
<b>GNV</b>	Gaz Naturel pour Véhicules utilisé comme carburant.
<b>H<sub>2</sub></b>	Dihydrogène, communément appelé hydrogène.
<b>HT</b>	Haute Température
<b>LOHC</b>	Porteurs d'hydrogène liquide organiques : composés organiques pouvant absorber et libérer de l'H <sub>2</sub> par réactions chimiques
<b>MCI</b>	Moteur à Combustion Interne
<b>NC</b>	Non-Connue
<b>Nm<sup>3</sup></b>	Normo mètre cube : unité correspondant au contenu d'un volume d'un mètre cube d'un gaz se trouvant dans les conditions normales de température et de pression (0° C et 1,01325 bar)
<b>NOx</b>	Oxydes d'azote
<b>PAC</b>	Pile à Combustible.
<b>PCI</b>	Pouvoir Calorifique Inférieur: quantité de chaleur dégagée par la combustion complète d'une unité de combustible, la vapeur d'eau étant supposée non condensée et la chaleur non récupérée
<b>PCS</b>	Pouvoir Calorifique Supérieur: quantité d'énergie dégagée par la combustion complète d'une unité de combustible, la vapeur d'eau étant supposée condensée et la chaleur récupérée
<b>PEM</b>	Proton Exchange Membrane
<b>PEMFC</b>	Proton Exchange Membrane Fuel Cell
<b>PSA</b>	L'adsorption à pression modulée (APM) ou PSA (Pressure Swing Adsorption) est un procédé de séparation de mélanges de gaz. Dans ce cadre ci, il consiste à séparer l'hydrogène d'un mélange gazeux (procédé retrouvé régulièrement pour la gazéification)

# Glossaire

<b>PTAC</b>	Poids Total Avec Charge: limite de poids d'un véhicule.
<b>Rétrofit</b>	Technologie qui transforme un(e) ancien(ne) module/motorisation thermique en module/motorisation électrique à batterie ou à PAC.
<b>SMR</b>	Vaporeformage du Méthane (Steam Methane Reforming): solution pour produire de l'hydrogène à partir d'hydrocarbures
<b>SOFC</b>	Pile à Combustible à Oxyde Solide (Solid Oxide Fuel Cell)
<b>t.km</b>	Représente le transport d'une charge de 1t sur 1km, soit la performance d'un poids lourds par rapport aux facteurs liés au poids. (tonne kilométrique)
<b>TCO</b>	Coût total de possession. Cet indicateur comprend les coûts liés au véhicule (investissement, maintenance, assurance, carburant...) sur la durée d'exploitation et pour un kilométrage donné. Il est exprimé en €/km.
<b>TRL</b>	« Technology Readiness Level » : système de mesure employé pour évaluer le niveau de maturité d'une technologie. Les valeurs de TRL vont de 1 à 9.
<b>USD</b>	United States Dollar: monnaie des Etats Unis (\$)
<b>VL</b>	Véhicule Léger: véhicule dont le Poids Total Autorisé en Charge (PTAC) ne dépasse pas 3,5 tonnes
<b>VUL</b>	Véhicule Utilitaire Léger
<b>W</b>	Watt : Unité de mesure de puissance
<b>WGS</b>	Water Gas Shift: procédé utilisé lors de la production d'un syngaz pour convertir du monoxyde de carbone en hydrogène par l'introduction du vapeur ( $\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2$ )
<b>Wh</b>	Watt Heure : Unité de mesure d'énergie



Acteur possédant son siège social en France



Acteur possédant son siège social sur le territoire européen



Acteur possédant un site de production en France



Acteur ne possédant pas son siège social sur le territoire européen



Membre de France Hydrogène



## Contacts

.....

Emmanuel BENSADOUN , Responsable de pôle

.....

Rémi COURBUN, chargé de mission

.....

[solutionsH2@france-hydrogene.org](mailto:solutionsH2@france-hydrogene.org)

.....

Réalisé avec



50 avenue Daumesnil - 75012 Paris  
Contact : [info@france-hydrogene.org](mailto:info@france-hydrogene.org)  
T. +33 (0)1 44 11 10 04

.....

Edition: Mai 2022 - Textes : France Hydrogène  
Crédits photos couverture :  
Ataway, EODev, McPhy, Safra, Gaussin, Semat  
Conception graphique - illustrations : © Cap Interactif agency