

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

Production	<ul style="list-style-type: none">○ Electrolyse○ A partir de biomasse○ Reformage du méthane○ Pyrolyse du Méthane○ Hydrogène géologique○ Autres	4
Liquéfaction	<ul style="list-style-type: none">○ Liquéfacteur	56
Stockage	<ul style="list-style-type: none">○ Forme gazeuse○ Forme liquide○ Forme solide○ Géologique	60
Transport	<ul style="list-style-type: none">○ Voie routière○ Hydrogénoducs○ Voie maritime	89
Molécules de synthèse	<ul style="list-style-type: none">○ Méthane○ L(O)HC	106
Distribution	<ul style="list-style-type: none">○ Stations de recharge	119
Usages	<ul style="list-style-type: none">○ Piles à combustible○ Mobilité VL & PL○ Applications portuaires○ Aéronautique○ Ferroviaire○ Engins spéciaux○ Usages stationnaires	134

Production

H₂



Sommaire



Production

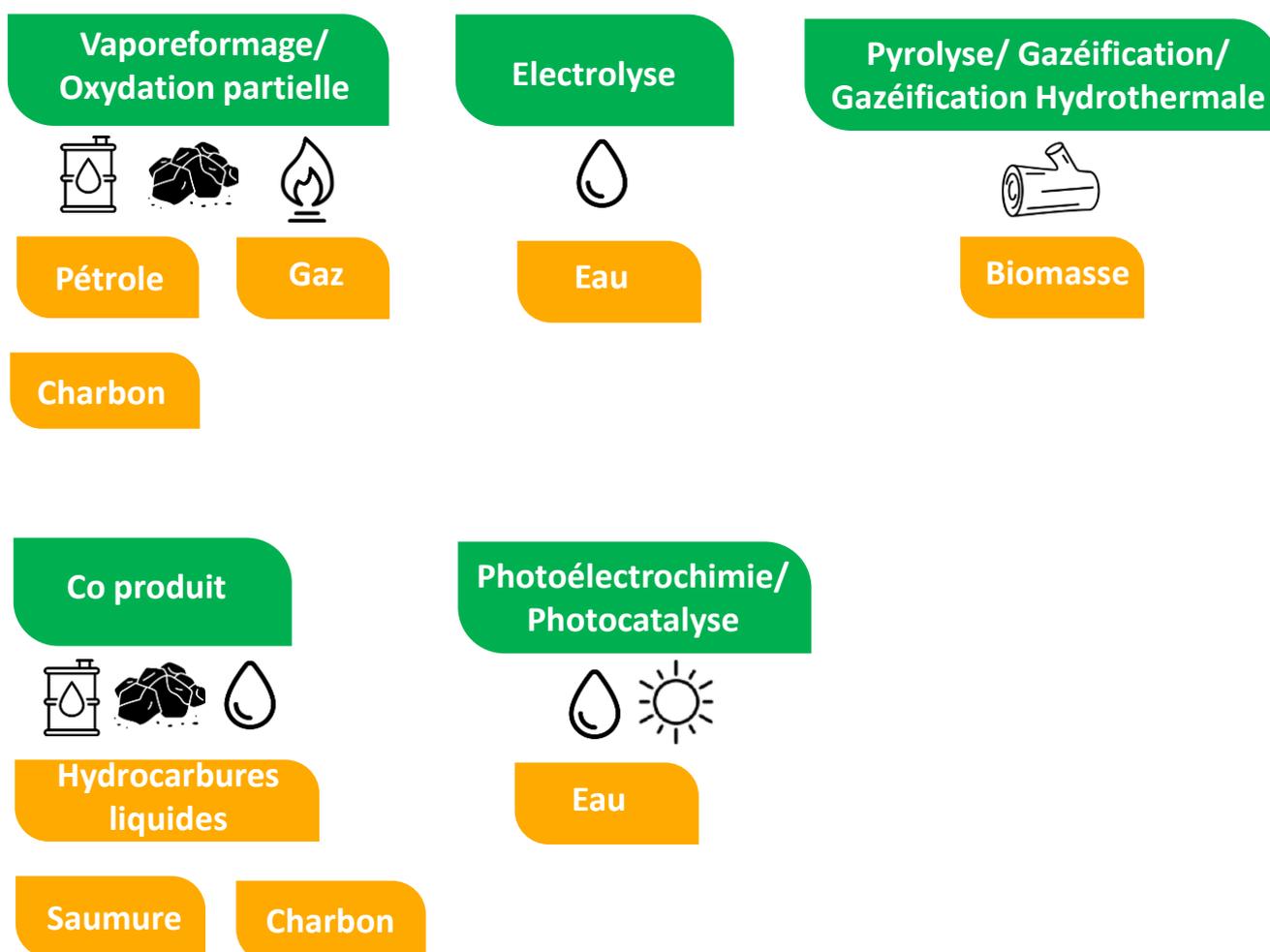
Production : Principes généraux	6
Electrolyse	8
<ul style="list-style-type: none">○ Principes généraux○ PEM○ Alcalin○ AEM○ HT○ Autres types d'électrolyse	
Hydrogène à partir de biomasse	27
Reformage du méthane	37
Pyrolyse du méthane	48
Hydrogène géologique	50
Autres types de production	54

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

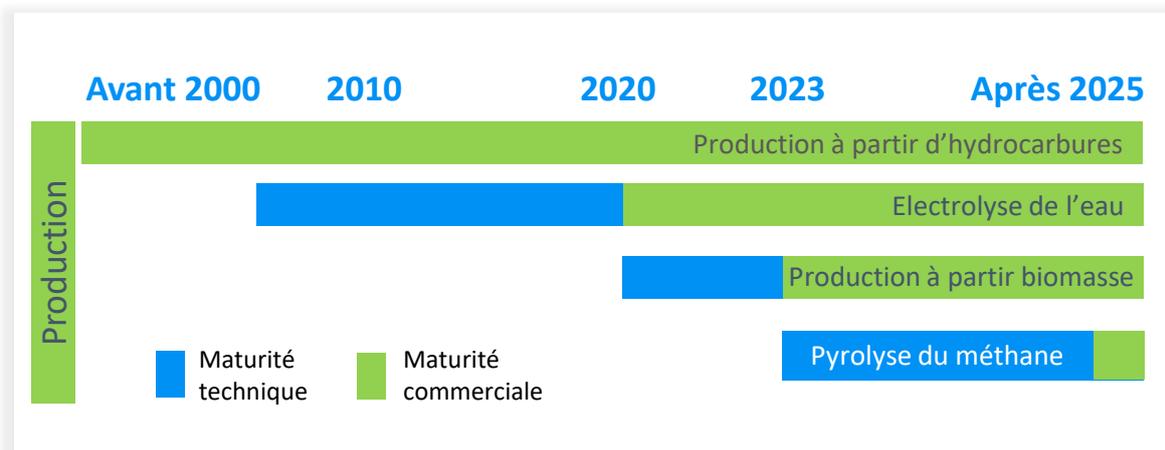
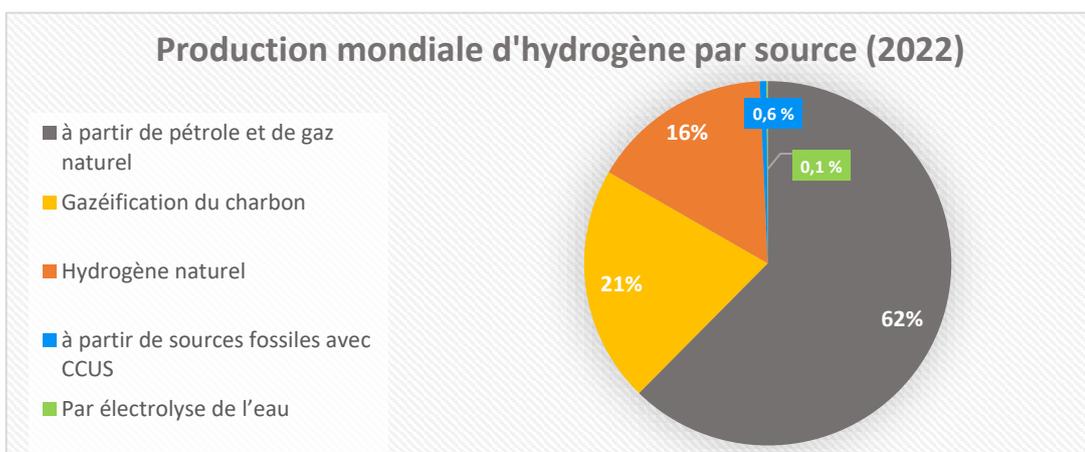
Principes généraux

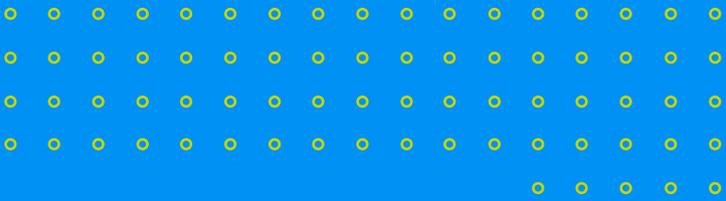
En 2018, la production mondiale d'hydrogène représentait environ **75 millions de tonnes** (Source : DOE 2019). Les procédés recourant à des ressources fossiles sont les plus répandus (reformage du méthane, gazéification du pétrole, etc.). Des procédés comme l'électrolyse de l'eau ou la pyrogazéification 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 : Hydrogen Europe)

- 3 € à 9,7 €/kgH₂ par électrolyse de l'eau (2021)
- 2,65 €/kgH₂ à 4,8 €/kgH₂ pour celui produit par reformage des hydrocarbures (2021/2022)

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**.





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 CO₂ 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

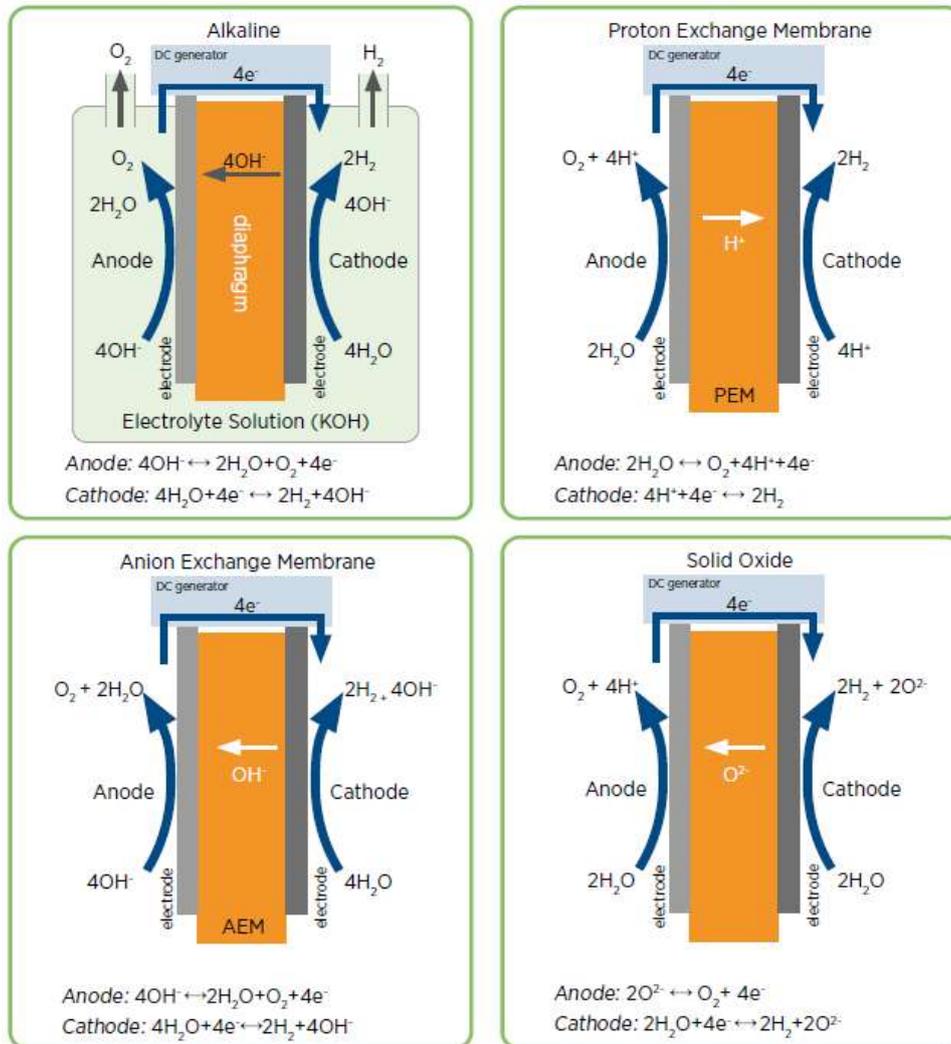
200-250kW 50 kgH ₂ /jour	1MW 400 kgH ₂ /jour	4-5MW 1500-2000 kgH ₂ /jour	10MW et plus 4-10 tH ₂ /jour
Laboratoire	Mobilité légère	Mobilité lourde	Industrie

- 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 ₂	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	37-39	15 000-20 000	> 0,5 %/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).

L'augmentation de la puissance d'un électrolyseur de 1 à 20 MW réduit les coûts d'investissement initiaux (CPAEX) de 60%.

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 €/kgH₂ 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).

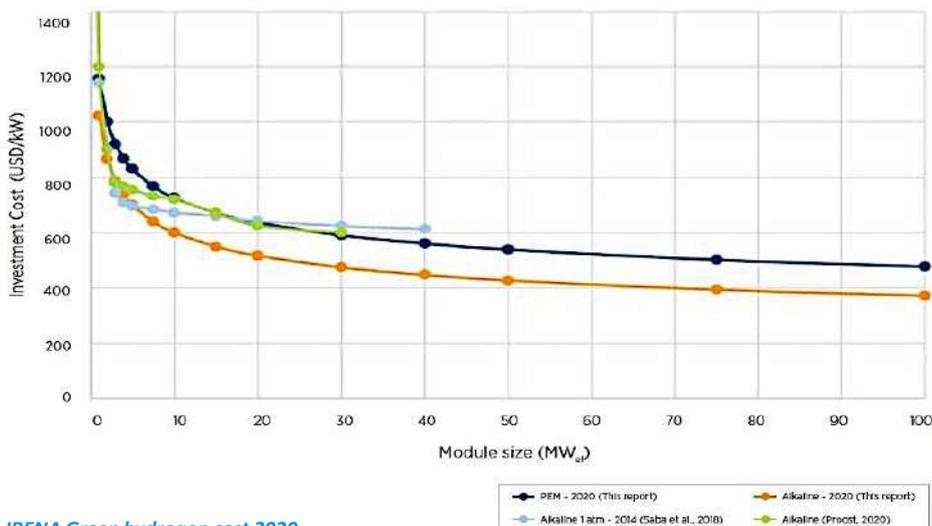
Coût à l'investissement (CAPEX) d'un électrolyseur de 1MW (retours fournisseurs)

Marché adressé	Coûts (€/kW)		Electrolyseur	Système complet (clé en main)*
	Moyenne	Fourchette		
Electrolyseur ALK			1000	2500
			700-1300	2000-3000
Electrolyseur PEM			1500	4000
			1100-1900	3500-4500
Electrolyseur SOE			1900	NC
			1600-2200	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'H₂ 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

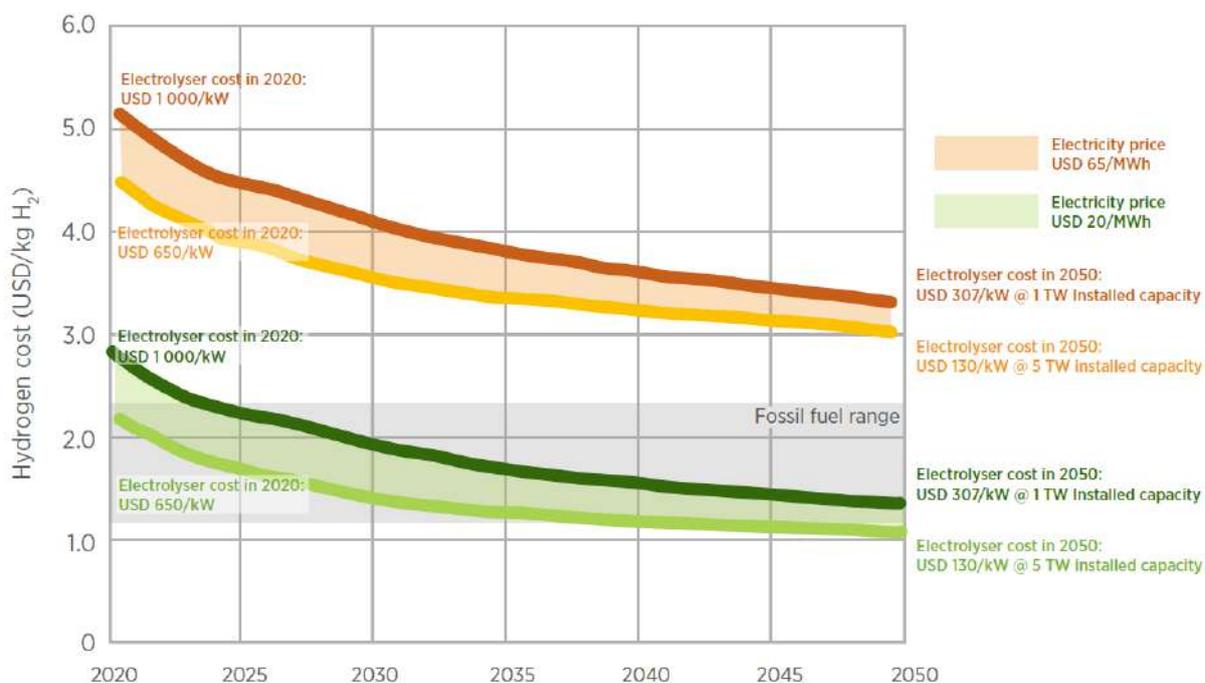
Prévisions de réduction de coût

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 renouvelable et bas carbone 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 renouvelable et bas carbone peut devenir plus compétitif que toute autre solution carbonée d'ici 2040.

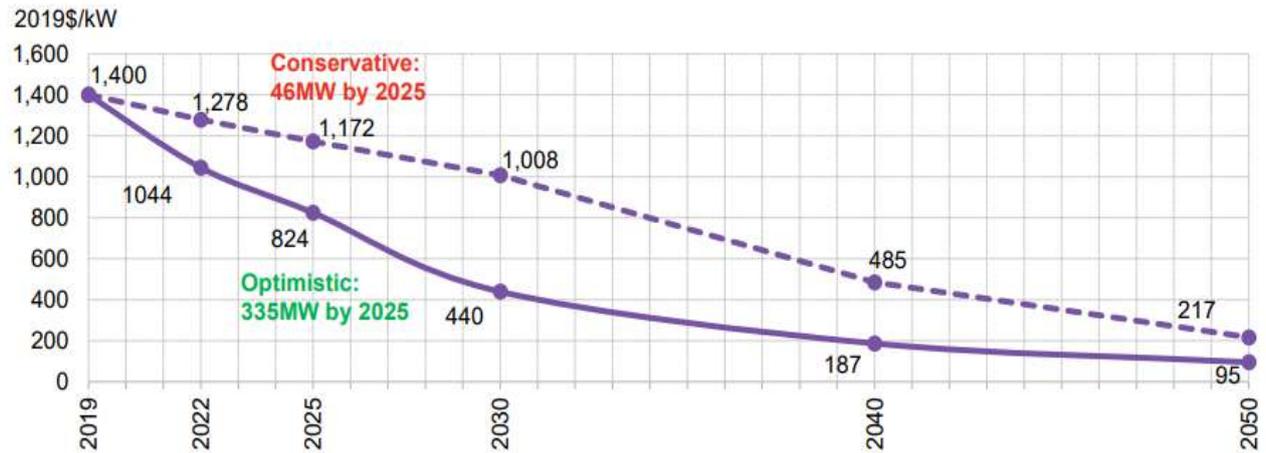
Rajouté aux prix spécifiques, les coûts de maintenance (usure des pièces, utilities, etc.), les contrats d'eau et d'électricité sont également très élevés et doivent être pris en compte lors de l'élaboration des projets.

IRENA Green hydrogen cost 2020



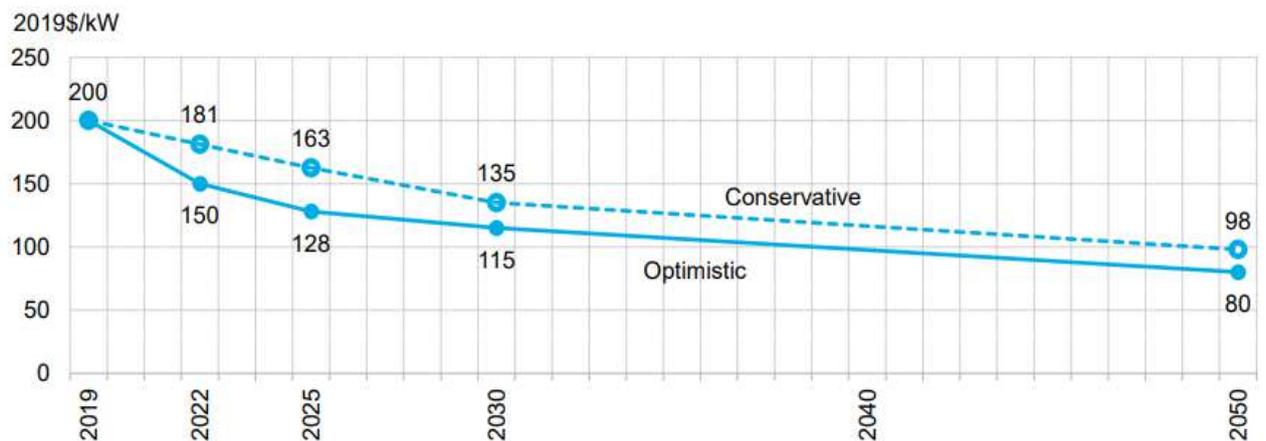
Prévisions de réduction de coût des électrolyseurs PEM et alcalins à horizon 2050

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

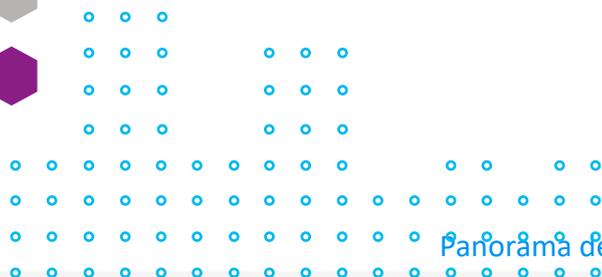
Alcalin

PEM: H-TEC SYSTEMS, hystar, elogen, Hytron, SIEMENS energy, plug, ITM POWER, iGas energy, SOLENCO POWER, H2B2, RR, MAN Energy Solutions, AIR PRODUCTS, Cummins, nel, H2Greem.

Alcalin: John Cockerill, McPhy, Hydrogen pro, thyssenkrupp nucera, nel, Cummins, HYGEAR, sunfire, SOLENCO POWER, AIR PRODUCTS, saqim, NextHydrogen, stargate hydrogen.

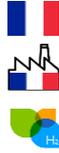
Autres technologies d'électrolyse

Autres technologies d'électrolyse: Enapter, CPH₂, HYTER, ALCHEMR, Bloomenergy, sunfire, saqim, gen-hy.



Electrolyse de l'eau PEM

elogen



E200

Puissance : 1 MW

Production hydrogène : 200 Nm³/h soit 17,8 kg/h

E500

Puissance : 2,5 MW

Production hydrogène : 500 Nm³/h soit 44,5 kg/h

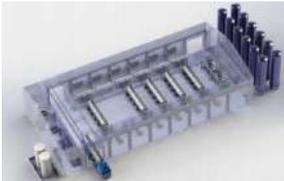
E1000

Puissance : 5 MW

Production hydrogène : 1000 Nm³/h soit 89 kg/h

Conception de 40 MW pour les plateformes multi-MW

Maturité: Commercialisés



Source : Elogen

hystar



Puissance stack : De 1 à 5,5 MW

Production hydrogène :
226 - 1 255 Nm³/h soit 20,3 - 112,9 kg/h



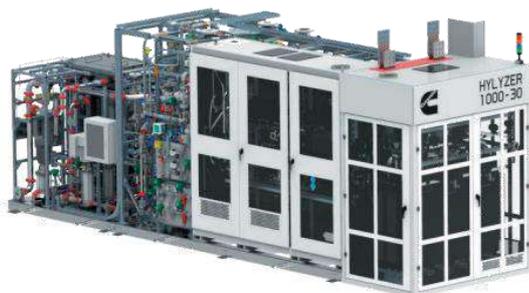
Source : Hystar

Cummins

**Anciennement
Hydrogenics**

Puissance stack : De 1,25 à 3MW (Conception jusqu'à 20 MW)

Production hydrogène : De 200 à 4 000 Nm³/h soit de 18 à 360 kg/h



Source : Cummins



Hydrogen is now.

H-TEC SYSTEMS



H-TEC PEM ME450 (conteneurisé, clef en main)

Puissance stack: 1 MW (modulaire jusque 10MW)

Production hydrogène : De 42 à 210 Nm³/h soit de 4 à 19 kg/h

H-TEC PEM MHP (à intégrer dans un bâtiment)

Puissance : 10MW (modulaire jusque 100MW)

Production hydrogène : De 213 à 2130 Nm³/h soit de 19 à 190 kg/h

Maturité : Commercialisé



Source : H-Tec Systems



Entreprise française



Entreprise Européenne



Usine en France



Membre de France Hydrogène

Electrolyse de l'eau PEM



Puissance stack : De 25 kW à 1.3 MW
Production hydrogène :
5 - 205 Nm³/h soit 0,5 – 18 kg/h



Source : iGas Energy



Puissance system: De 1 MW à 1 GW
Production hydrogène :
200 Nm³/h soit 18 kg/h pour 1 MW



Source : Plug

nel



Puissance stack : Jusqu'à 1,25 MW (M séries)
Production hydrogène : 235 Nm³/h soit 21 kg/h
Maturité : Commercialisé



Source : NEL



Entreprise française



Entreprise Européenne



Usine en France



Membre de France Hydrogène

Electrolyse de l'eau PEM

**SIEMENS
ENERGY**

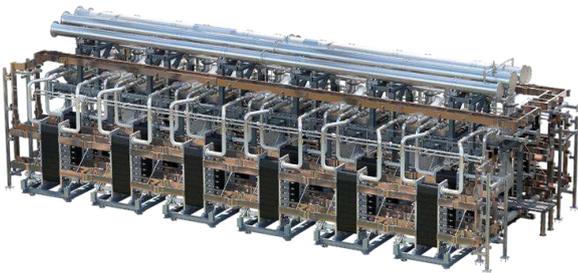


Silyzer 300

Puissance : De 17,5 MW jusqu'à 1 GW

Production hydrogène :

à partir de 4 000 Nm³/h soit 335 kg/h



Source : Siemens Energy

H2B2
Electrolysis Technologies

Puissance : De 3 kW jusqu'à 4,1 MW

Production hydrogène :

0,5 à 800 Nm³ /h soit 0,0045 à 72 kg/h



Source : H2B2

RR
ErreDue S.p.A.



Puissance : Jusqu'à 900 kW¹

Production hydrogène :

0,66 – 170,6 Nm³/h soit 0,06 – 15,2 kg/h

Mercury



**SOLENCO
POWER**



Solyzer

Puissance stack : De 25 kW à 500 kW

Production hydrogène : 115 Nm³/h

soit 10 kg/h

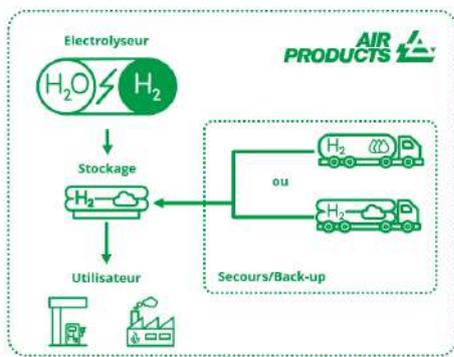


Source : Solenco Power

Electrolyse de l'eau PEM



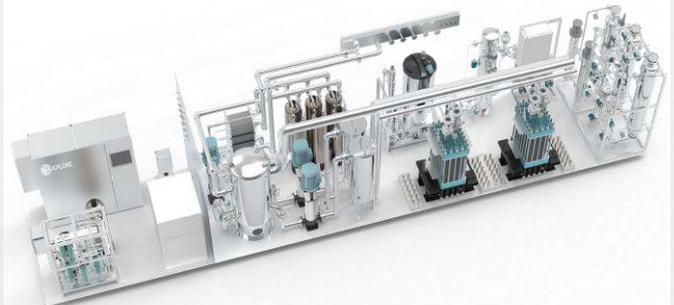
Puissance stack : De 0,5 MW à 5MW
Production hydrogène : De 45 à 933 Nm³/h
 soit de 4 à 84 kg/h
Maturité: Commercialisé



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 Nm³/h soit
 2000 kg/j
Maturité: Commercialisé



Source : NEA Hytron



Caldera
Puissance stack : 200 kW
Production hydrogène : 30 Nm³/h soit 2,67 kg/h
Maturité : En développement



Source : H2U Technologies



MAN Energy Solutions



Unités de production H₂ de 10 MW à 100 MW
Puissance unitaire électrolyseur: 10 MW
 Unités industrielles de production d'hydrogène « clef en main » basées sur le module électrolyse MHP 10 MW de notre filiale H-TEC SYSTEMS
 Standards développés : 10 MW et 50 MW
Production hydrogène :
 • Plateforme 10 MW : 2130 Nm³/h soit 4,6 t/j
 • Plateforme 50 MW : 10650 Nm³/h soit 23 t/j
Maturité : Commercialisé



Source : Man Energy & Solutions

Electrolyse de l'eau PEM



LABGREEM

Puissance : De 30 à 3000 W

Production hydrogène : De 0,006 à 0,6 Nm³/h soit de 0,013 à 1,28 kg/j

LPGREEM

Puissance système : De 1 à 30 kW

Production hydrogène : De 0,2 à 6 Nm³/h soit de 0,02 à 0,6 kg/h

Maturité : Commercialisé



Source : H2GREEM



HPGREEM

Puissance : De 30 à 300 kW

Production hydrogène : De 6,6 à 66 Nm³/h soit de 0,6 à 6 kg/h

VHPGREEM

Puissance système : De 300 à 1000 kW

Production hydrogène : De 66 à 200 Nm³/h soit de 6 à 20 kg/h

Maturité : Commercialisé



Source : H2GREEM



TRIDENT (Stack module)

Puissance : 2 MW

Production hydrogène : 400 Nm³/h soit 36 kg/h

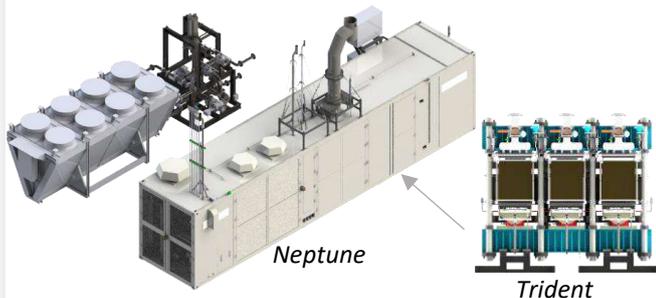
Maturité : Commercialisé

NEPTUNE (solution conteneurisée prête à l'emploi)

Puissance : De 2 à 20 MW

Production hydrogène : De 400 à 4000 Nm³/h soit de 36 à 360 kg/h

Maturité : Commercialisé



Source : ITM Power

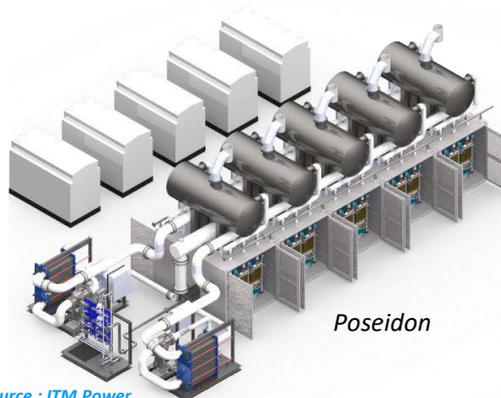


POSEIDON (module intégré)

Puissance : 20 MW (Multiple de 20 MW (dédié au Plateformes multi-MW / GW)

Production d'hydrogène : > 4000 Nm³/h soit 360 kg/h

Maturité : Commercialisé



Source : ITM Power

Electrolyse de l'eau Alcalin

McPhy

Driving clean energy forward



Gammes Piel® et McLyzer®

Puissance stack : De 0,003 à 4 MW

Production hydrogène :

- Équipements unitaires
De 0,4 à 3200 Nm³/h soit de 0,04 à 288 kg/h
- Plateformes multi-MW / GW
Multiples de 4 MW (800 Nm³/h soit 71 kg/h) ou de 16 MW (3200 Nm³/h soit 288 kg/h)

Maturité : Commercialisé



Source : McPhy

nel



Puissance max stack : 2,2 MW

Puissance : Jusqu'à 200 MW

Production hydrogène : Jusqu'à 38 800 Nm³/h soit 3 452 kg/h

Maturité : Commercialisé



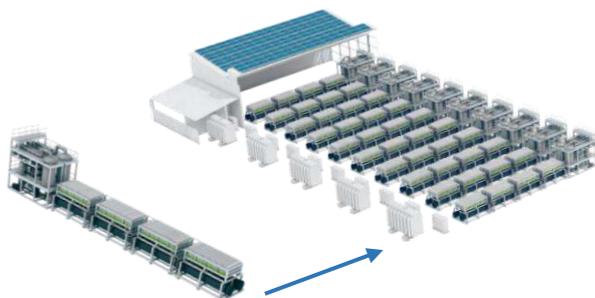
Source : Nel



Puissance stack : 20 MW

Puissance d'une unité d'électrolyse : 20 MW

Production hydrogène : 4000 Nm³/h soit 360 kg/h



Source : thyssenkrupp nucera

sunfire



Puissance : Jusqu'à 10 MW

Production hydrogène : 2 230 Nm³ /h soit 200 kgH₂/h



Source : Sunfire



Entreprise française



Entreprise Européenne



Usine en France



Membre de France Hydrogène

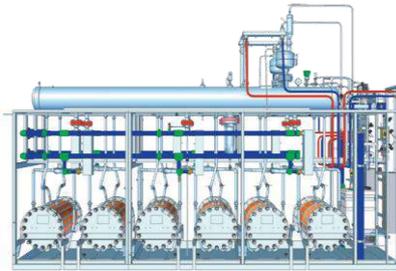
Electrolyse de l'eau Alcalin



Anciennement
Hydrogenics

Puissance module : De 0,1 à 0,8 MW

Production hydrogène :
10 à 100 Nm³/h soit 0,9 – 9 kg/h



Source : Cummins

Hydrogen pro



Puissance max : 5,5 MW (à HP 15 bar)

Production hydrogène : 1100 Nm³/h soit
99 kg/h



Source : Hydrogen Pro



HyProvide A-Series

Puissance module : Jusqu'à 0,9 MW
(Conceptions de 1 à 5 MW)

Production hydrogène :
Jusqu'à 180 Nm³/h soit 16 kg/h par module

HyProvide X-Series

Puissance module: Jusqu'à 6 MW
(Conceptions de 6 à ≥ 100 MW)

Production hydrogène :
Jusqu'à 1200 Nm³/h soit 107 kg/h par mod



Source : Green Hydrogen Systems

John Cockerill



Puissance stack : 5 MW

Production hydrogène : 936 Nm³/h
soit 83,3 kg/h



Source : John Cockerill

Electrolyse de l'eau Alcalin



Hy.GENe

Puissance : De 0,25 à 5 MW

Production hydrogène : De 50 à 1000 Nm³/h
soit de 4,45 à 89 kg/h

Maturité : Commercialisé



Source : HYGEAR



Puissance : De 600 kW à 2,5 MW

Production hydrogène :
17 – 500 Nm³/h soit 1,5 – 45 kg/h¹



Source : NextHydrogen



Solyzer

Puissance stack : De 25 kW à 500 kW

Production hydrogène : 115 Nm³/h soit
10 kg/h

Maturité: Commercialisé



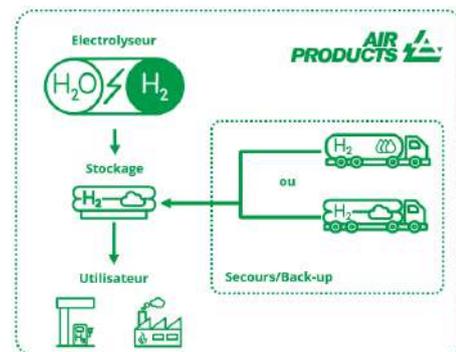
Source : Solenco Power



Puissance stack : De 0,5 MW à 5MW

Production hydrogène : De 45 à 933 Nm³/h
soit de 4 à 84 kg/h

Maturité: Commercialisé



Source : Air Products

Electrolyse de l'eau Alcalin



Générateur BP-MP

Solution électrolytique non corrosive (Pas de KOH)

Puissance absorbée : à partir de 5 kW

Production hydrogène :

À partir de 0,25 Nm³/h soit 0,5 kg/j
jusqu'à 5 Nm³/h soit 10 kg/j

Maturité: Commercialisé

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



Source : SAGIM



Gateway

Puissance max stack : 1 MW

modules jusqu'à 10 MW pour les plateformes multi-MW

Production hydrogène : De 200 à 2000 Nm³/h soit de 18 à 180 kg/h

Maturité : Commercialisé



Source : Stargate Hydrogen



Stellar Stacks

Puissance stack: 0,5 MW

Production hydrogène: Adaptable de 20 à 100 Nm³/h soit de 1,8 à 9 kg/h

Maturité: Commercialisé



Source : Stargate Hydrogen



Entreprise française



Entreprise Européenne



Usine en France



Membre de France Hydrogène

Electrolyse de l'eau

AEM



EL 4.0

Puissance stack : jusqu'à 2,4 kW

Production hydrogène : 0,52 Nm³/h soit 1,1 kg/j

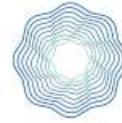
AEM Multicore

Puissance : 1 MW

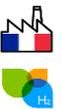
Production hydrogène : 210 Nm³/h soit 450 kg/j



Source : Enapter



HYTER
NEW ENERGY ROUTES



Puissance stack : De 100 à 250 kW

Puissance modulaire : Jusqu'à 2MW

Production hydrogène : De 2 à 400 Nm³ soit de 0,20 à 36,0 kg/h

Maturité : Commercialisé



Source : Hyter



Gamme Hy-Cube 40 pieds

Puissance max stack : : 50 kW

Puissance: Jusqu'à 2 MW

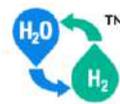
Production hydrogène : de 23 Nm³/h soit 50 kg/j jusqu'à 460 Nm³/h soit 1000 kg/j

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

Maturité : Pré-production



Source : Gen-Hy



ALCHEMR

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



Principes d'électrolyse à haute température
Fonctionnement à 850°C

Puissance max : 2.68 MW

Production hydrogène :

750 Nm³/h soit 67 kg/h

Démonstrateur à échelle industrielle en 2022



Source : Sunfire



Electrolyseur de démonstration SOEC

Production hydrogène: 200 kg/j

Rendement : 90%

Maturité : En développement (Niveau TRL 7)



Source : Genvia



Produit SP

Production d'hydrogène: Jusqu'à 0,8 kg/h soit 9 Nm³/h par module (jusqu'à 6 modules par configuration)

Produit MP

Production d'hydrogène: Jusqu'à 8 kg/h soit 90 Nm³/h par module

Rendement : > 70%

Système réversible : Production d'électricité et de la chaleur à partir d'hydrogène



Source : Sylfen



Electrolyseur SOE

Puissance : De 2,6 MW à 2 GW

Production hydrogène : de 478 Nm³/h

à 266 000 Nm³/h soit de 43 kg/h à 24 000 kg/h

Maturité : En développement



Source : Bloomenergy

Electrolyse de l'eau

Autres types d'électrolyse



Electrolyseur sans membrane

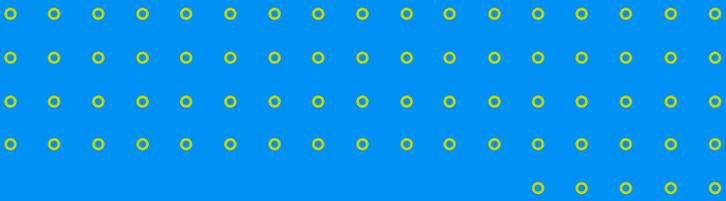
Puissance : 1 à 2 MW

Production hydrogène :

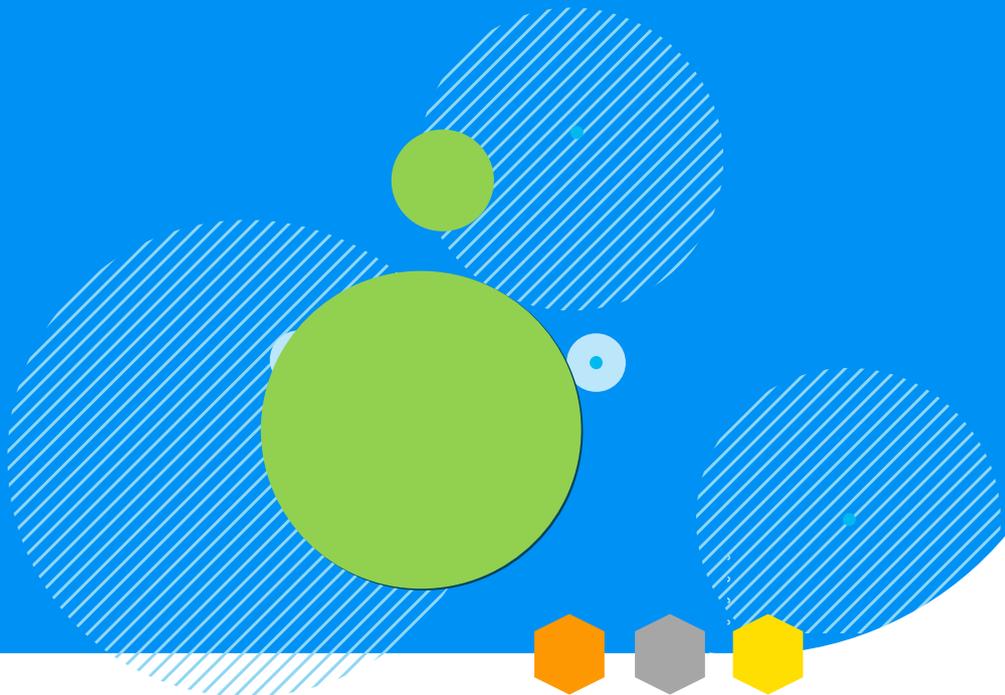
De 209 à 3300 Nm³/h soit 19 à 300 kg/h



Source : CPH2



Production d'hydrogène à partir de biomasse



Production à partir de biomasse

Aspects techniques (Pyrogazéification, Thermolyse et Pyrolyse)

La **Pyrogazéification** de la biomasse est la succession de deux procédés : **la pyrolyse et la gazéification**, permettant de transformer la matière carbonée **en gaz de synthèse (syngaz)**.

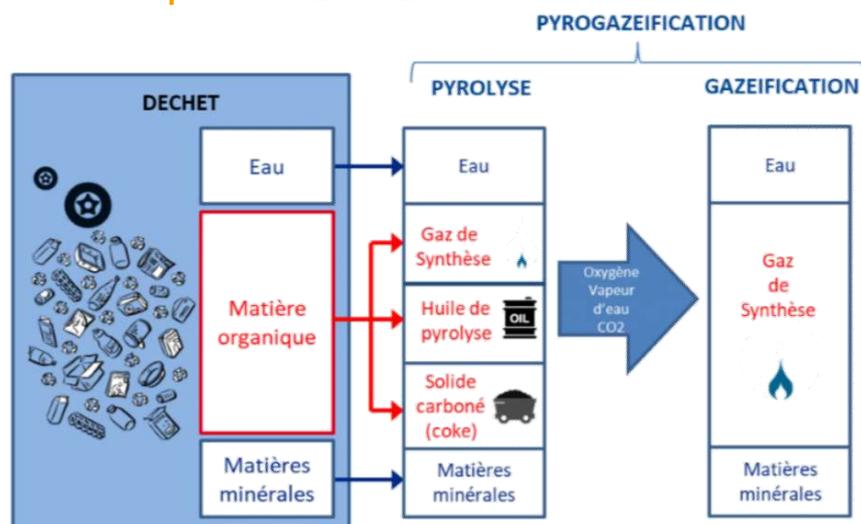
- La **pyrolyse** est le procédé de décomposition thermique de la matière carbonée relativement sèche, à haute température, en absence d'oxygène, et **permet d'obtenir trois phases** : une phase solide (charbon, char, ou coke), une phase liquide (huile de pyrolyse) et une phase gazeuse (**syngaz**). La proportion entre les trois phases dépend essentiellement des paramètres opératoires (température, temps de séjour, vitesse de chauffe).

La pyrolyse génère une proportion liquide plus importante. En conséquence, **elle est mieux adaptée à la production de biocarburants liquides et a suscité un intérêt moindre que la gazéification en ce qui concerne la production d'hydrogène**.

- La **gazéification** est le procédé de **transformation** de la partie carbonée solide et de la phase liquide produites par pyrolyse **en syngaz** par ajout d'une petite quantité d'un agent oxydant (air, oxygène, CO₂). **La composition du syngaz** est fonction de la nature de la ressource entrante et des conditions opératoires. Il est principalement composé **d'H₂, CO, CO₂**.

Au-delà de l'étape de gazéification, on notera les étapes de :

- Facultatif : **Enrichissement en H₂**, notamment par la réaction de « **water gas shift** », une réaction exothermique avec catalyseur et qui permet de réduire la teneur en CO et de produire du H₂ : $\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2$
- **L'épuration du syngaz**, notamment vis-à-vis du contrôle des rejets, de la purification des produits, **voire de la séparation H₂ / CO₂**



Production à partir de biomasse

Aspects techniques (Pyrogazéification, Thermolyse et Pyrolyse)

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.)

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.

Thermolyse

Une voie particulière permettant de produire de l'hydrogène à partir de déchets biologiques, coproduits forestiers, sciures, miscanthus et biomasse contenant de 10 à 35 % d'humidité est **la thermolyse**. Du biochar et du syngaz sont produits par chauffage de la biomasse en l'absence d'oxygène à 500 °C. Le syngaz est chauffé à 1000 °C dans un four de craquage pour obtenir **un hypergas** (syngas particulièrement riche en hydrogène). Après traitement (réaction de « water gas shift puis séparation et purification de l'H₂), de l'hydrogène de qualité mobilité est obtenu.



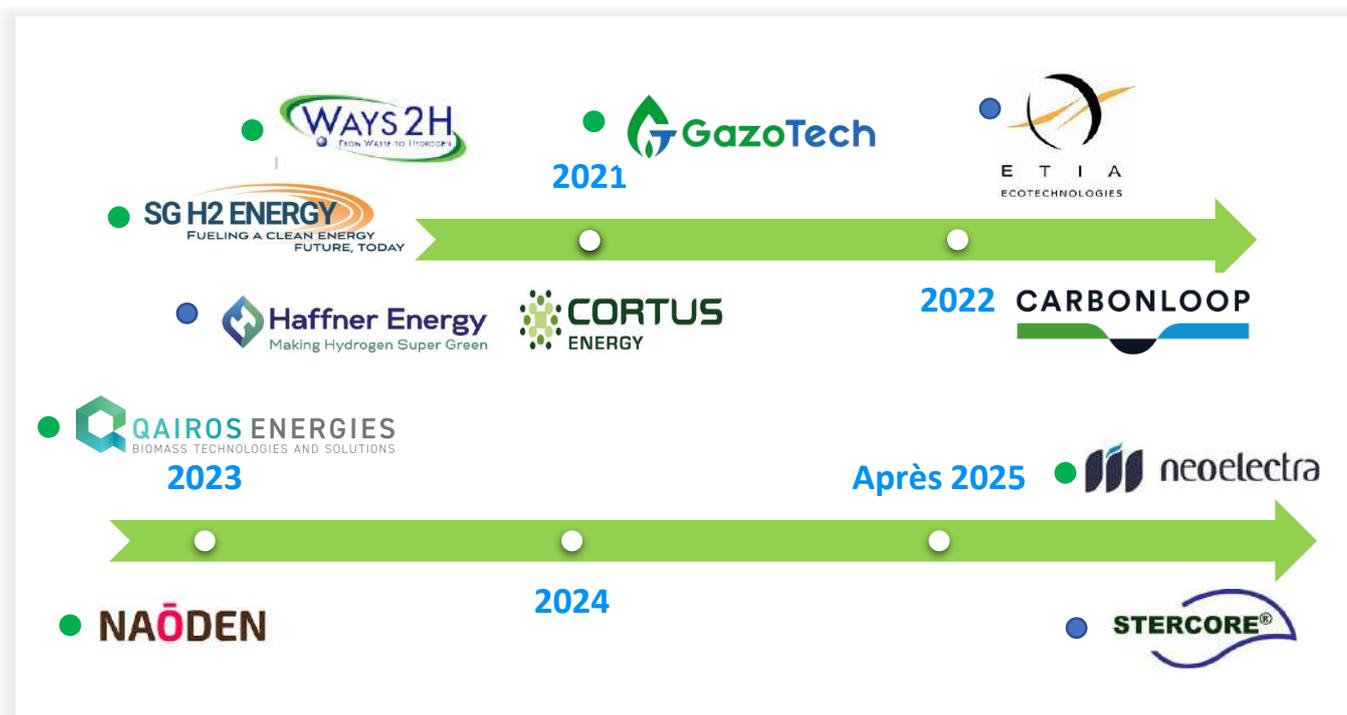
Production à partir de biomasse

Marché & aspects économiques

(Pyrogazéification, Thermolyse et Pyrolyse)

Pour limiter les CAPEX, 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 H₂ (rapport IEA 2019) ce qui permettrait d'atteindre l'objectif de 9 €/kg H₂ à la pompe dans le cas d'un usage mobilité.

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



Bibliographie:

Hydrogen from biomass gasification (rapport IEA 2019)

ATEE – Club pyrogazéification

ADEME – Dossier principes de la pyrolyse gazéification

Haffner Energy

Production à partir de biomasse

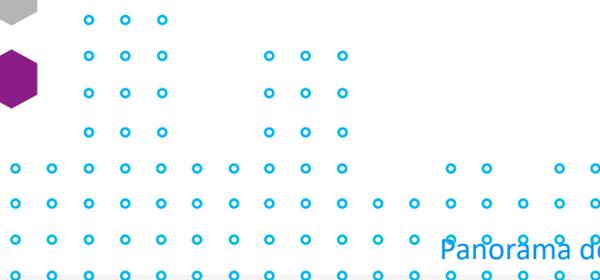
Acteurs de la filière (Pyrogazéification, Thermolyse et Pyrolyse)



Entreprises Européennes



Entreprises Hors Europe



Production à partir de biomasse



SGH2 (porté par Eco'R)

Typologie : Pyrogazéification

Production hydrogène : 4 000 t d'H₂/an

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



Source : SGH2

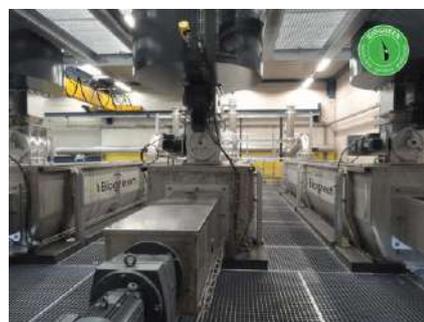


Typologie : Pyrogazéification

Consommation : Usine de 30 kt intrants/an et plus
En développement pour l'H₂

Nature de la biomasse : Variée

Maturité : En développement



Source : ETIA



Typologie : Pyrogazéification

Production hydrogène : 1000 Nm³/jour

Nature de la biomasse : Bois non traité



Source : Cortus

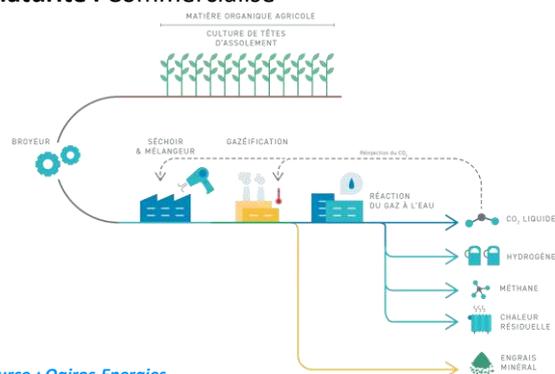


Typologie : Pyrogazéification

Production d'hydrogène: De 1 à 3,5 tonnes/jour
par unité pour l'industrie et la mobilité

Nature de la biomasse : Résidus de chanvre

Maturité : Commercialisé



Source : Qairos Energies



Entreprise française



Entreprise Européenne



Usine en France



Membre de France Hydrogène

Production à partir de biomasse



Typologie : Thermolyse

Production hydrogène :

360 kgH₂/jour soit 4000 Nm³/j par module standard

Nature de la biomasse : Co-produits et résidus ligneux issus de l'exploitation agricole, forestière et viticoles

Maturité : Commercialisation



Source : Haffner Energy

carbonloop



Typologie : Thermolyse

Production hydrogène : 360 kg H₂/jour/unité (possibilité d'installer plusieurs unités)

Nature de la biomasse : Bois non traité

Commercialisation : 2023

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



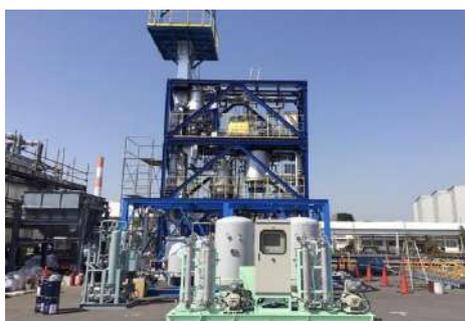
Source : Carbonloop



Typologie : Pyrolyse

Production hydrogène : 50kg H₂ par type d'intrants

Nature de la biomasse : Biomasse déchets



Source : Groupe Ways2H



Entreprise française



Entreprise Européenne



Usine en France



Membre de France Hydrogène

Production à partir de biomasse

Aspects techniques (Gazéification hydrothermale)

La **Gazéification Hydrothermale** est un procédé disruptif de conversion thermo-chimique de déchets organiques, seuls ou en mélange, en un **gaz renouvelable ou bas-carbone particulièrement riche en méthane et hydrogène**.

Les déchets adressables peuvent être **d'origine biomasse** (Déchets organiques industriels, biodéchets urbains, déchets et effluents agricoles, etc.) ou **d'origine fossile** (Déchets plastiques, déchets chimiques, etc.)

Il devient injectable dans le réseau de gaz après un traitement adapté et est utilisable au même titre que le gaz naturel pour tout type d'usage. Liés à l'existence d'une infrastructure dense et un marché de gaz naturel fluide en France et en Europe, les développeurs de la technologie privilégient, **dans un 1er temps, le méthane** comme le vecteur énergétique par défaut. **D'ici 2030/ 2035**, suivant la montée en puissance d'une infrastructure d'hydrogène, **la technologie sera adaptée pour produire prioritairement de l'hydrogène**.

Fonctionnant en présence obligatoire de l'eau à des conditions supercritiques, haute pression (210 à 350 bar) et haute température (360 à 700°C), elle est capable de **convertir au moins 85% et jusqu'à quasi 100% du carbone en gaz de synthèse**. En plus et en fonction du type d'intrant traité, elle permet de **récupérer de nombreux co-produits solides (métaux, minéraux, azote) et liquide (eau)** pouvant être revalorisés.



Production à partir de biomasse

Marché & aspects économiques

(Gazéification hydrothermale)

Deux grandes familles de technologie GH en développement

Deux types de technologies de Gazéification Hydrothermale existent aujourd'hui :

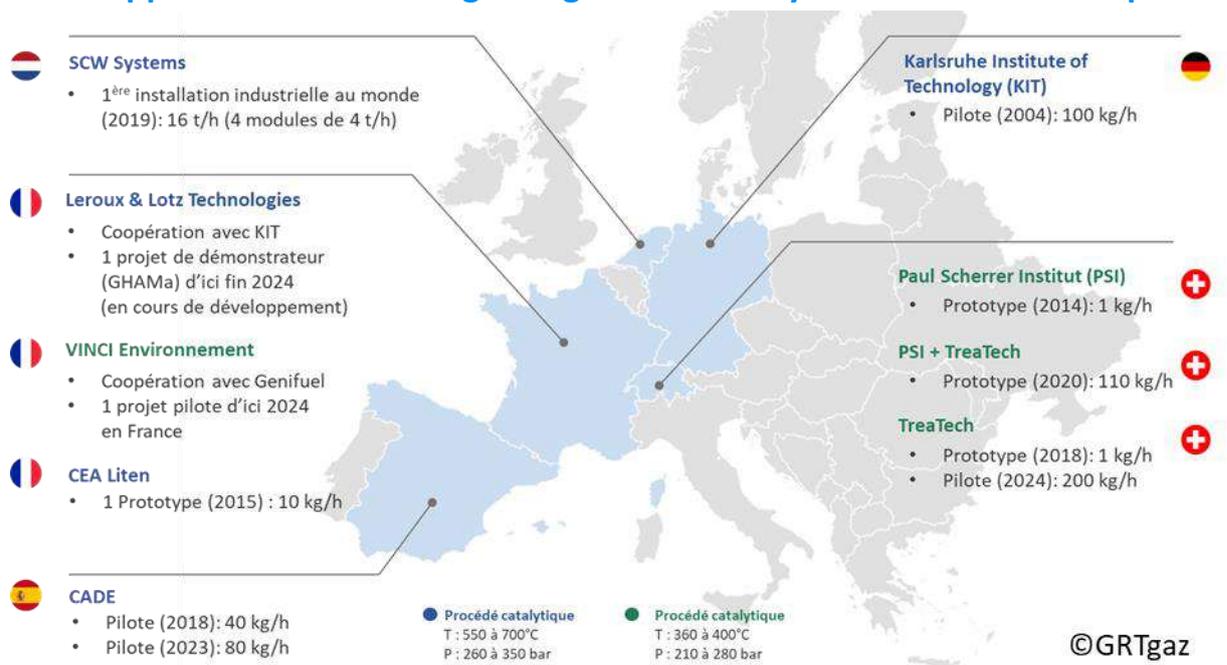
- la technologie dites « **haute température** » (550 à 700 °C) et
- la technologie dites « **avec catalyse** » à plus basse température (360 à 400 °C).

Bien qu'elles soient toutes les deux destinées à produire du gaz de synthèse pour valoriser énergétiquement au mieux des déchets, la composition du produit gazeux comme celles des co-produits solides et liquide peuvent différer de manière plus ou moins importante selon les types de déchets valorisés, seules ou en mélange, et les conditions opératoires du procédé.

Composition du syngaz*	CH4	H2	CO2	CxHy
GH avec catalyse	≤ 70%	0 à 10%	20 à 30%	-
GH à haute température	25 à 40%	30 à 50%	~ 30%	≤ 12%

(* Pour les 2 familles de technologies GH la production de méthane est privilégiée.
La composition des 2 types de syngaz sera différente si la production d'hydrogène est privilégiée.)

Développeurs de la technologie de gazéification hydrothermale en Europe

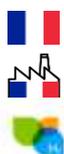


Bibliographie:

[Livre Blanc de la Gazéification Hydrothermale, GT GH, 2023](#)



Production à partir de biomasse



Facilitateur de projets

Typologie : Gazéification hydrothermale

- Pilote du Groupe de Travail national Gazéification Hydrothermale, regroupant une cinquantaine d'entités soutenant le développement de la technologie et l'émergence d'une véritable filière commerciale en France.



- GRTgaz, gestionnaire du plus grand réseau de transport (80% du territoire) de gaz naturel en France favorise l'injection de gaz renouvelable et bas-carbone dans son réseau et développe un réseau de transport dédié à l'hydrogène.

Source : GRTgaz



Typologie: Gazéification hydrothermale à haute température

- Conversion thermochimique de déchets +/- humides utilisant l'eau supercritique comme milieu réactionnel (P: 250 à 350 bar ; T : 550 à 700°C) et permettant de transformer la matière organique en gaz de synthèse (H_2 , CH_4 , CO_2)
- LLT est fournisseur clé en main de la technologie de gazéification hydrothermale à haute température

Maturité : En développement
(Objectif de commercialisation: 2026)

Source : Leroux & Lotz Technologies



Entreprise française



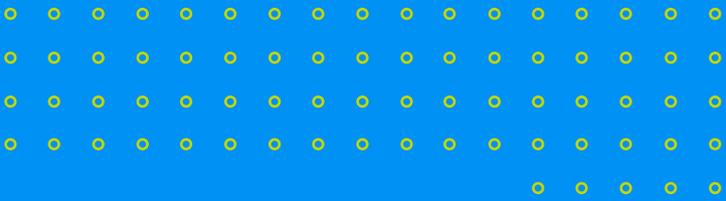
Entreprise Européenne



Usine en France

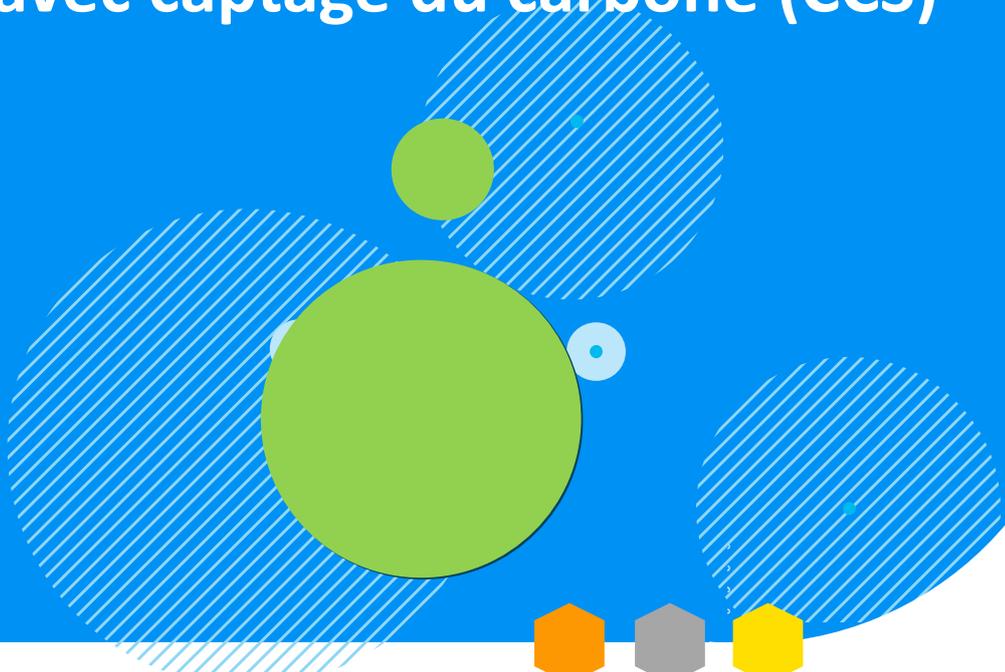


Membre de France Hydrogène



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 H_2 à pureté élevée.

L'hydrogène résultant est qualifié de carboné (ou d'hydrogène gris) car sa production émet une grande quantité de CO_2 et est issue d'énergies fossiles.

Aujourd'hui, l'hydrogène d'origine fossile représente 83% de la production mondiale.

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

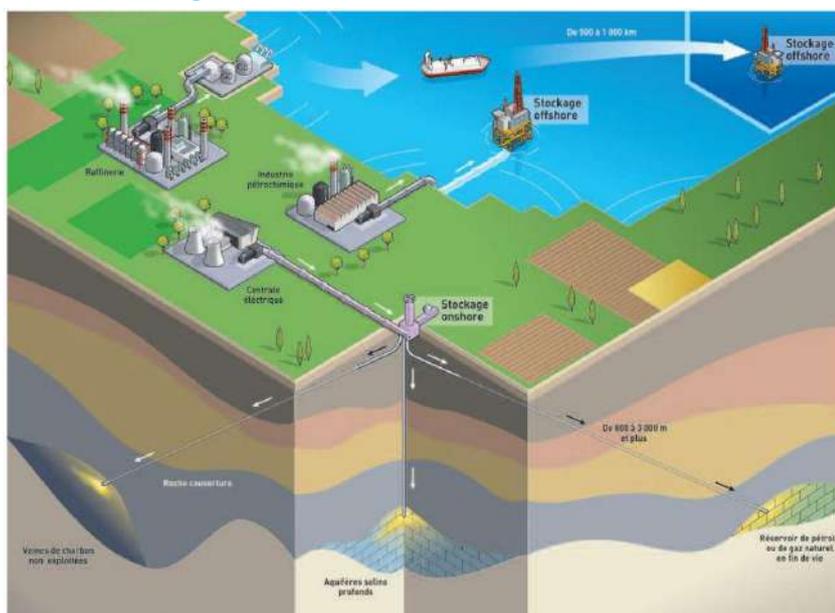
Le captage de CO_2 émis sur les unités de SMR, pour pouvoir produire un hydrogène bas carbone (ou hydrogène bleu).

Ce 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 CO₂ (CCS-Carbon Capture and Storage) consiste à capter le CO₂ 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 CO₂. 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 CO₂ dans les aquifères salins profonds, la maîtrise du confinement du CO₂ 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 CO₂ qui dépend majoritairement de la source CO₂, de la pureté de CO₂ souhaité et de la technologie de captage mise en œuvre ; les estimations varient entre **15 et 65 €/t CO₂**.
- 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 CO₂**.
- 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 CO₂** 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 CO₂ 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 CO₂ à un stade commercial :

- La récupération assistée des hydrocarbures (*EOR pour Enhanced Oil Recovery*)
- Dans diverses industries (pour la production de boissons gazeuses, comme CO₂ 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 des carburants synthétiques tels que l'e-methanol, l'e-kérosène, l'e-diesel, etc), obtenus en combinant du CO₂ avec de l'hydrogène (**Les détails se trouvent dans la section "Molécule de synthèse" à la page 102**)
- 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 CO₂ : sidérurgie, cimenterie, raffinage, chimie, pétrochimie.

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

Reformage du méthane avec captage du carbone

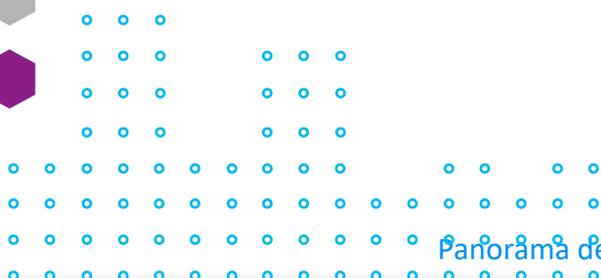
Acteurs de la filière

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)

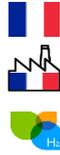


Unités de captage (production non incluse)



Reformage du méthane avec captage du carbone

Unités de production (avec captage du carbone)



Cryocap

Capacité (H₂) : Jusqu'à 200 000 Nm³/h soit 430 tonnes H₂/jour

Capacité (CO₂) : 500-2000 tonnes CO₂/jour

Produits : CO₂ et H₂ (co-produit), augmente la production d'H₂ de 13-20%

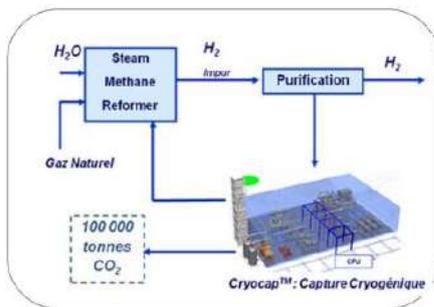


Schéma de principe du projet

Source : Ademe



Technologies SMR/ATR et CCS

- Technologies Steam Méthane Reforming (SMR) et Auto Thermal Reforming (ATR)
- Technologies de Capture et Séquestration du CO₂ (CCS)

• L'usine de Port Arthur (USA) produit de l'hydrogène bleu depuis 2014 et capte un million de tonnes de CO₂ par an

Capacité (H₂) : 600 tonnes /jour

Taux de capture : jusque 95% du CO₂



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 CO₂ 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



H₂ - 1000

Capacité (H₂) : Jusqu'à 470 Nm³/h soit 1000 kg/j

Capacité (CO₂) : environ 10 tonnes CO₂/jour

Taux de capture : 98 % du CO₂

Commercialisation: Disponible

L'unité de production d'H₂ combiné au captage de CO₂ est prévue pour S3 2023 avec la technologie Carbon Clean

Unité H₂ - Grande échelle

Capacité (H₂) : Jusqu'à 4700 Nm³/h soit 10 000 kg/j

Capacité (CO₂) : environ 50 tonnes CO₂/jour

Taux de capture : 98 % du CO₂

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 CO₂ du syngas

Usine à Coffeyville (USA)

Capacité (H₂) : 200 tonnes H₂/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 (CO₂).

Capacité (H₂) :

12-241 kg H₂/jour

Produits : H₂ et CO₂

(co-produit),

augmente la production

d'H₂ de 10-20%



Source : GTI

HYGEAR
THE GLOBAL HYDROGEN SOURCE

Hy.GEN Grand

Produit: H₂ et CO₂ (coproduit)

Capacité (H₂): Jusqu'à 300 Nm³/h soit 643 kg/j

Capacité (CO₂): 3,5 tonnes CO₂/jour

Taux de capture: 85%

Maturité: En développement



Source : HYGEAR

VERDEMIBIL
BIOH₂

Production d'hydrogène renouvelable par vaporeformage de biogaz ou de biométhane

Produit: H₂ et CO₂ (coproduit)

Capacité H₂: De 300 à plus de 1000 kg/j

Capacité CO₂ associée : De 1000 à plus de 3500 tonnes CO₂/an

Taux de capture: 100% du CO₂

Maturité: Commercialisé



Source : VERDEMIBIL

Reformage du méthane avec captage du carbone

Unités de captage (production non incluse)



PCC « Post-Combustion Capture »

Capacité standard (H₂) :

50 000 Nm³/h soit 107t H₂/jour

Capacité (CO₂) :

- Usage dans la chimie : 200-2000 t (CO₂)/jour
- Usage dans l'agroalimentaire : < 500 t (CO₂)/jour
- Usage pour EOR (Enhanced Oil Recovery) : > 1000 t (CO₂)/jour

Produits : CO₂ et H₂ (co-produit)



Source : Linde



Shell Canslov® « CO₂ Capture system »

Shell Catalysts & Technologies a mis au point une technologie brevetée de capture du CO₂ utilisant un solvant à base d'une amine régénérable.

Usine à Alberta (Canada) – Projet Quest

Capacité (H₂) : 900 tonnes H₂/jour

Capacité (CO₂) : 1,128 million de tonnes CO₂/an

Taux de capture : récupère 80% du CO₂ du syngaz



Source : Shell



Carbon Capture System

Produit : H₂ (coproduit) et CO₂

Capacité (H₂) : Jusqu'à 2000 Nm³/h soit 2500kg/h

Capacité (CO₂) : 10,4 tonnes CO₂/jour

Taux de capture : 85 % du CO₂

Maturité : Commercialisé



Source : HYGEAR



TOMCO Turnkey CCUS

Applications : Capture du CO₂ et purification

Capacité (CO₂) : De 20 à 600 tonnes CO₂/jour

Taux de capture : > 98% du CO₂

Maturité : Commercialisé



Source : Air Water/ TOMCO Systems



Entreprise française



Entreprise Européenne



Usine en France



Membre de France Hydrogène

Reformage du méthane avec captage du carbone

Unités de captage (production non incluse)



VERDEMOBIL
BIOCO2

Captage et valorisation de BioCO2

Applications: méthanisation, installations de stockage de déchets non dangereux, STEP, installations de vaporeformage de biogaz, chaudières, chaufferies biomasse...

Capacité (CO2): De 1000 à plus de 15 000 tonnes BioCO2/an

Taux de capture: 100% du CO2

Maturité: Commercialisé



Source : VERDEMOBIL



Entreprise française



Entreprise Européenne



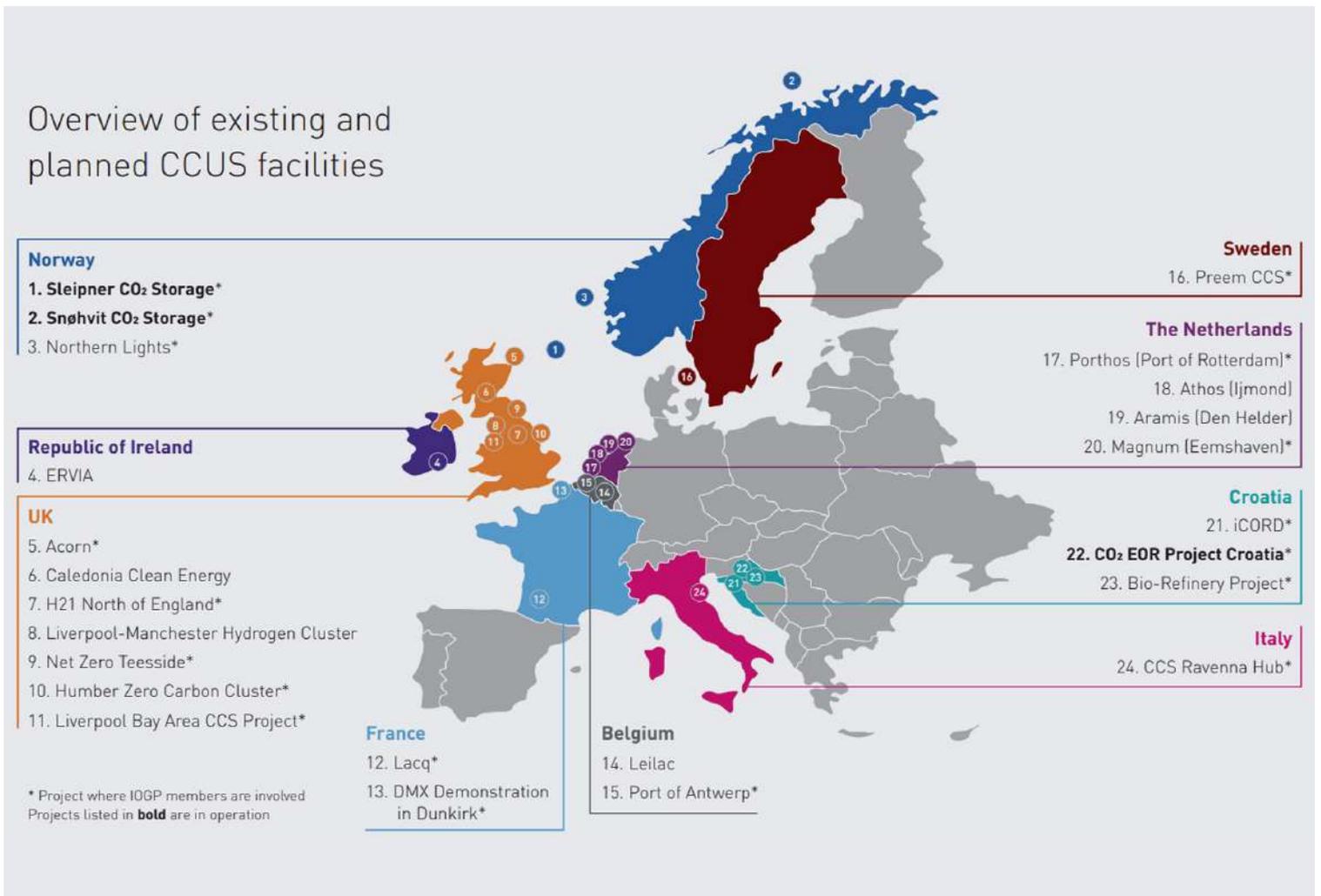
Usine en France



Membre de France Hydrogène

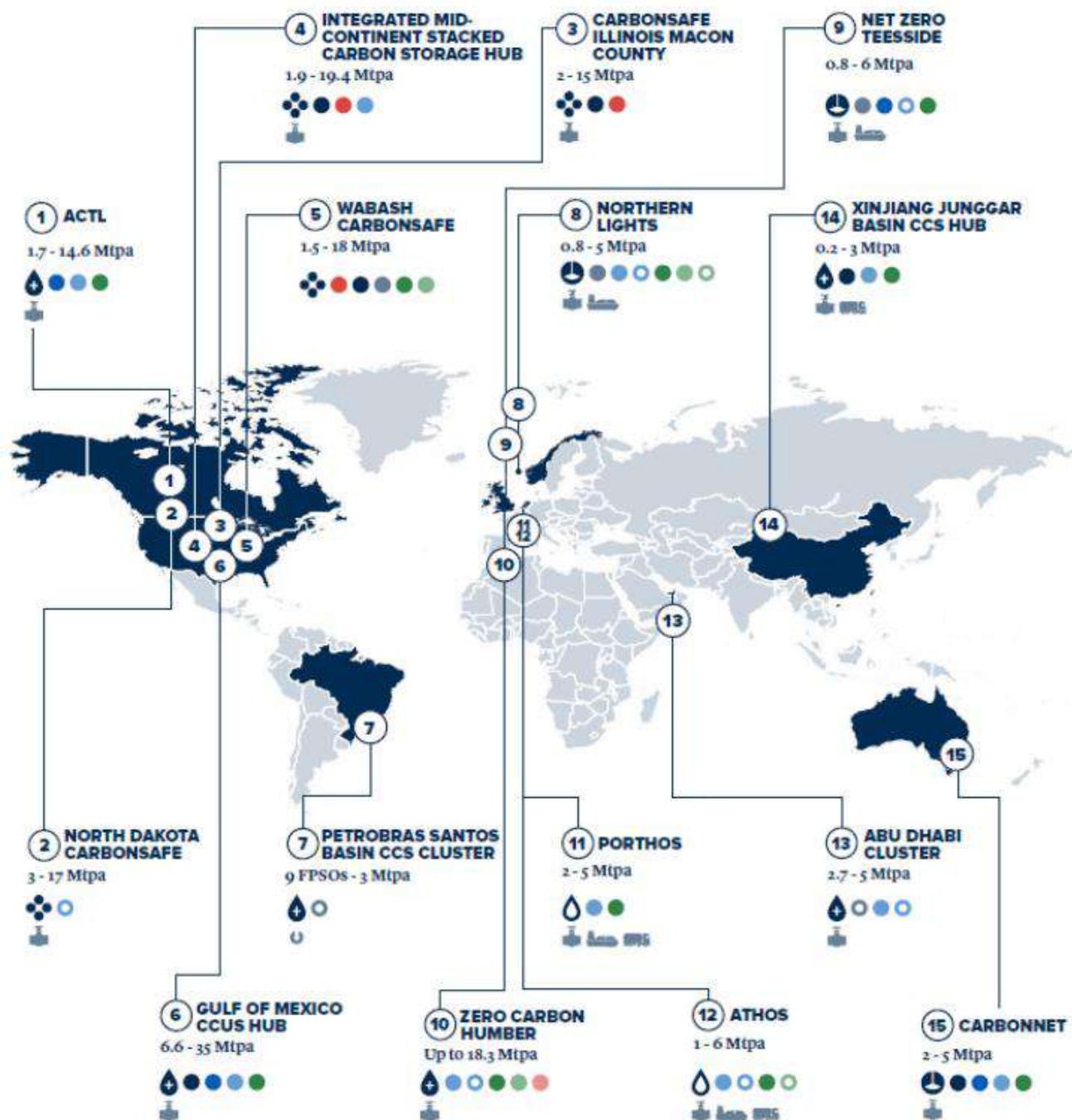
Reformage du méthane avec captage du carbone

Projets de CCUS en cours et à venir en Europe



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

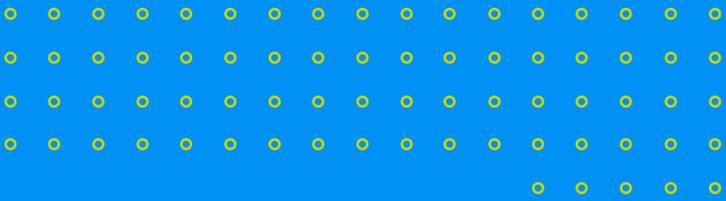
STORAGE TYPE

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

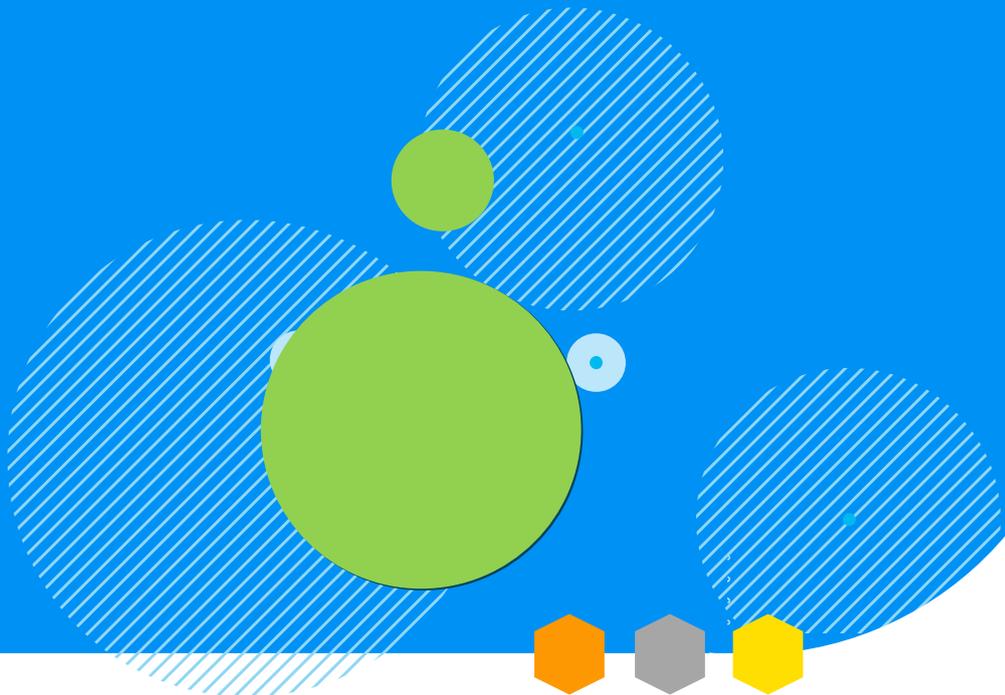
DELIVERY

- 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 :

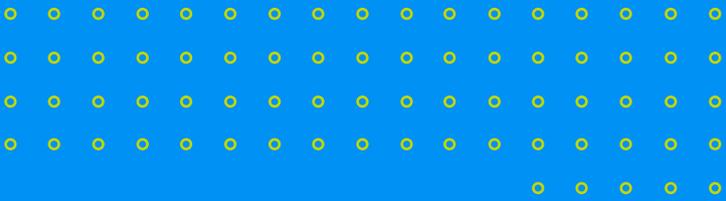


Le principal avantage de cette méthode est qu'elle est **thermodynamiquement beaucoup moins énergivore que la dissociation de l'eau**, car elle nécessite environ six fois moins d'énergie par kilo d'hydrogène produit (10-20 kWh_{el}/kgH₂ contre 55-60 kWh_{el}/kgH₂ **d'après le retour des acteurs de la pyrolyse du méthane**). Un autre avantage est **qu'elle permet la coproduction de deux produits valorisables**, respectivement le carbone solide et l'hydrogène.

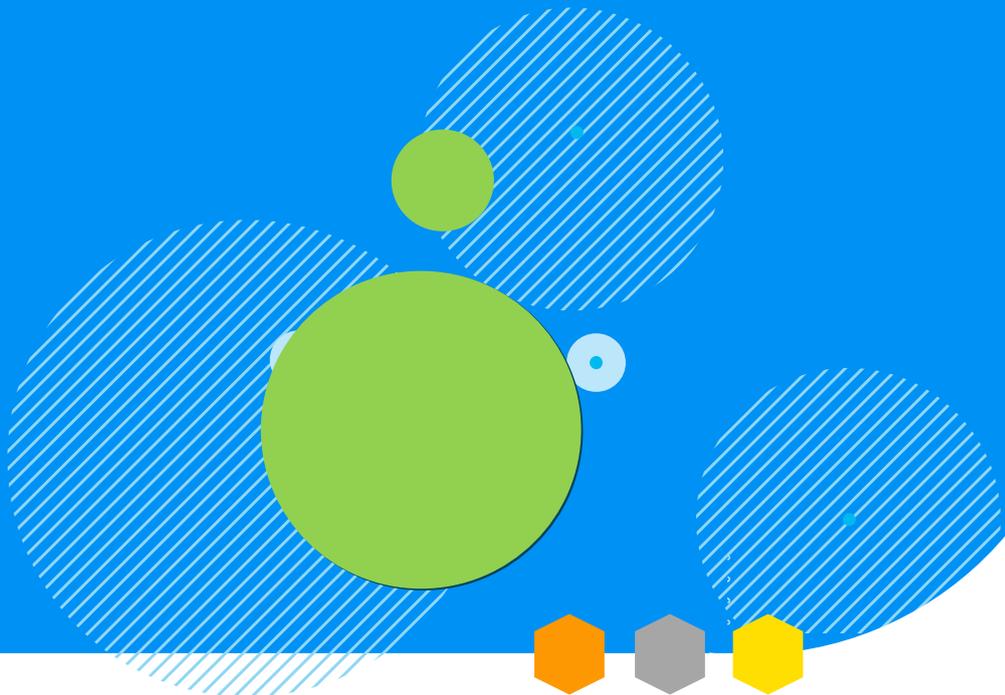
Il existe plusieurs procédés de pyrolyse du méthane envisagés à ce jour pouvant être classés en 4 grandes familles :



- 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)



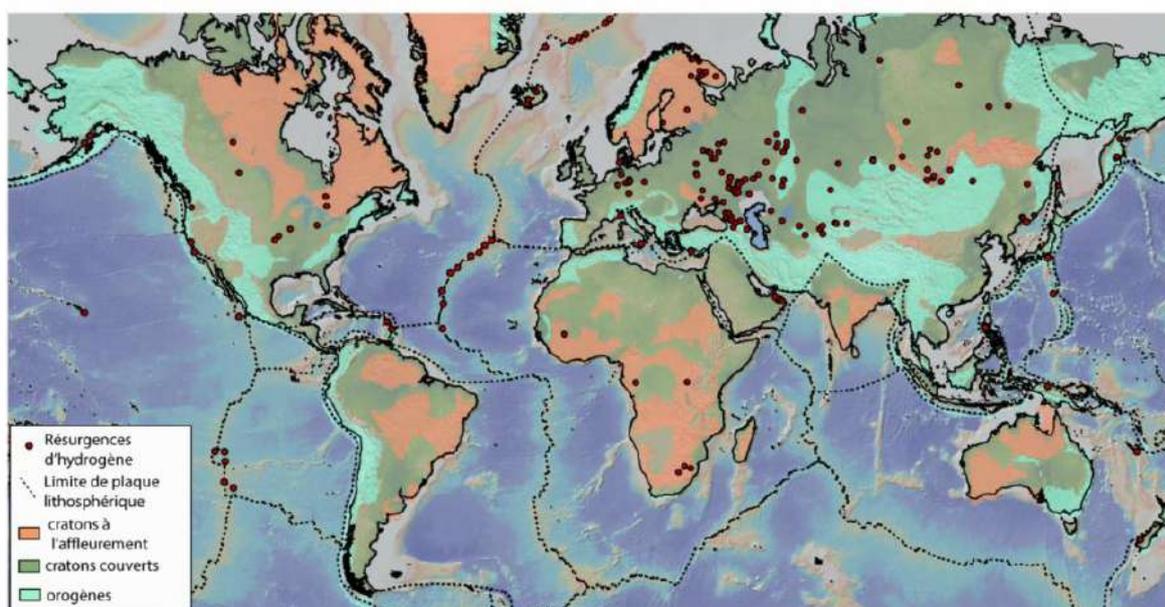
Hydrogène géologique



Hydrogène géologique

Les premières mises en évidence de gisements d'hydrogène naturel ont eu lieu dans les années 1970 sur les systèmes hydrothermaux océaniques, suivies par la suite de découvertes sur terres émergées. Jusqu'à il y a peu, les gisements d'hydrogène naturel ont constitué une curiosité géologique mais des investigations récentes laissent entrevoir un potentiel d'exploitation significatif, compte tenu d'estimations quantitatives élevées.

Selon les études scientifiques en cours, il ne s'agit pas d'hydrogène fossile, mais d'une production continue, renouvelable et native. Un gisement reposant sur la réaction de l'eau avec l'olivine a été découvert en France en 2021.



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 estimés inférieurs à ceux d'autres technologies (de l'ordre de 0,5 à 1€/kg H₂ selon les acteurs du secteur). Cependant, une évaluation plus précise des coûts est actuellement en cours pour en déterminer les valeurs exactes,
- 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 (10 à 20 ans) passant par différentes étapes (études, obtention de permis, forages exploratoires, forages de production) visant à réduire les risques.
- 1^{ère} conférence mondiale « **H₂nat 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^{ère} mondiale), source Hydroma inc

Hydrogène géologique

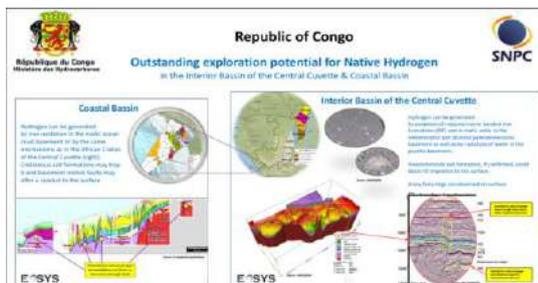


Solution :

- Prospection en vue de l'acquisition de permis miniers
- Mise en évidence de ressources H₂ naturel, exploration géologique de la ressource H₂ naturel + évaluation ressources/réserves via de la géophysique et des forages exploratoires

Projets :

- France et export, Confidentiel



Source : Eosys



Solution :

- Exploration d'H₂ natif en Europe avec des méthodes géophysiques internes
- Développement d'une sonde IoT - SurfMoG H₂ - pour monitorer l'hydrogène dans le sous-sol, disponible à la location
- Opérateur de projets d'hydrogène natif en Europe

Caractéristique:

45-8 ENERGY ambitionne de produire l'hydrogène naturel au plus proche des foyers de consommation européens.

Projets:

- PER Grand Rieu (France) - en cours d'instruction (en collaboration avec Storengy)
- PER Marensin (France) - en cours d'instruction (en collaboration avec Storengy).
- Banja Vuca (Kosovo) - en cours d'instruction
- H₂NA - Projet de recherche en Nouvelle-Aquitaine

Source : 45-8 Energy



Solution :

Services pour l'exploration géologique de la ressource H₂ naturel + évaluation ressources/réserves via de la géophysique et des forages exploratoires

Projets :

- H₂NA labellisé Pole Avenia (avec Engie, BRGM, UPPA, 45-8Energy)
- [DjiboutHy](#) (avec 45-8Energy, Infogeo, UPPA, IFPEN)



Bloc 25

Solution :

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

Projets :

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



Entreprise française



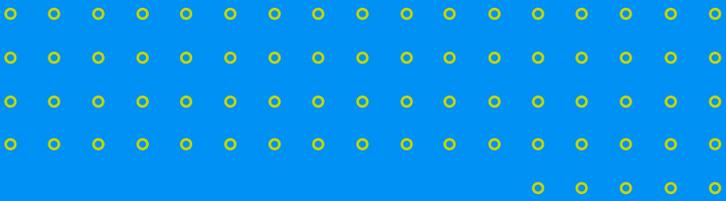
Entreprise Européenne



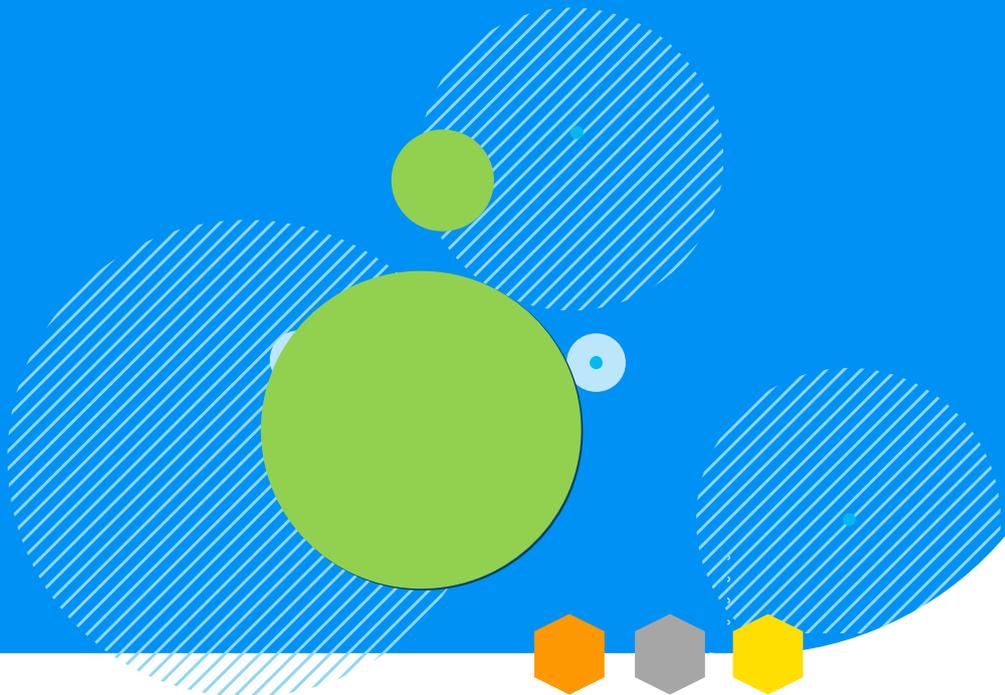
Usine en France



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.



Générateur mobile chimique GIP3

Production d'H₂ 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 m³ en moins de 10 min

Commercialisation: Disponible



Source : SAGIM



Photocatalyse

Solution:

Valorisation de déchets organiques en phase liquide par l'utilisation de textiles luminescents photocatalytiques.

Caractéristique:

Production d'hydrogène par reformage photocatalytique.

Projets/références:

- H2TEX PIA3 2020 Région AURA

Maturité : En développement (TRL 4)



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 tous 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



Entreprise française



Entreprise Européenne



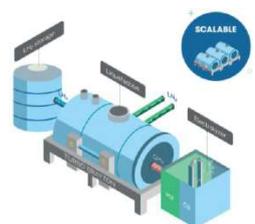
Usine en France



Membre de France Hydrogène

Liquéfaction

H₂



Liquéfaction

Principes généraux

L'hydrogène est largement utilisé sous forme gazeuse dans diverses applications, notamment en tant que matière première pour l'industrie chimique, combustible propre pour la mobilité ou le chauffage, et autant que vecteur énergétique.

Cependant, pour des applications spécifiques telles que le spatial (propulsion des lanceurs) ou encore la mobilité lourde, il est nécessaire de liquéfier l'hydrogène. Ceci afin d'accroître les densités massique et volumique de son stockage et ainsi obtenir des performances compatibles de « l'embarquer » en termes de densité énergétique. Le transport sous forme liquide cryogénique est par ailleurs l'une des solutions les plus adaptées aux flux logistiques importants.

Le processus de liquéfaction de l'hydrogène consiste à refroidir l'hydrogène jusqu'à ce qu'il atteigne sa température de liquéfaction : environ 20K (-253°C) à pression atmosphérique standard, soit seulement 20°C au-dessus du zéro absolu. Dans ces conditions la masse volumique de l'hydrogène liquide est de 71 kg/m³, soit :

- Environ 800 fois plus dense que l'hydrogène gaz à pression atmosphérique,
- Respectivement 1,7 à 3,3 fois plus dense que la compression à 700 et 350 bar,

Le processus de liquéfaction de l'hydrogène est réalisé au moyen d'un liquéfacteur. Ce dispositif met en œuvre des techniques de réfrigération avancées et des briques technologiques telles que la compression et la détente de gaz, ainsi que des échangeurs de chaleur.

Afin d'éviter une vaporisation excessive d'hydrogène (boil-off d'hydrogène) liée à des pertes thermiques avec l'environnement extérieur, il est crucial d'isoler efficacement le liquéfacteur et le réservoir de stockage de l'hydrogène liquide.

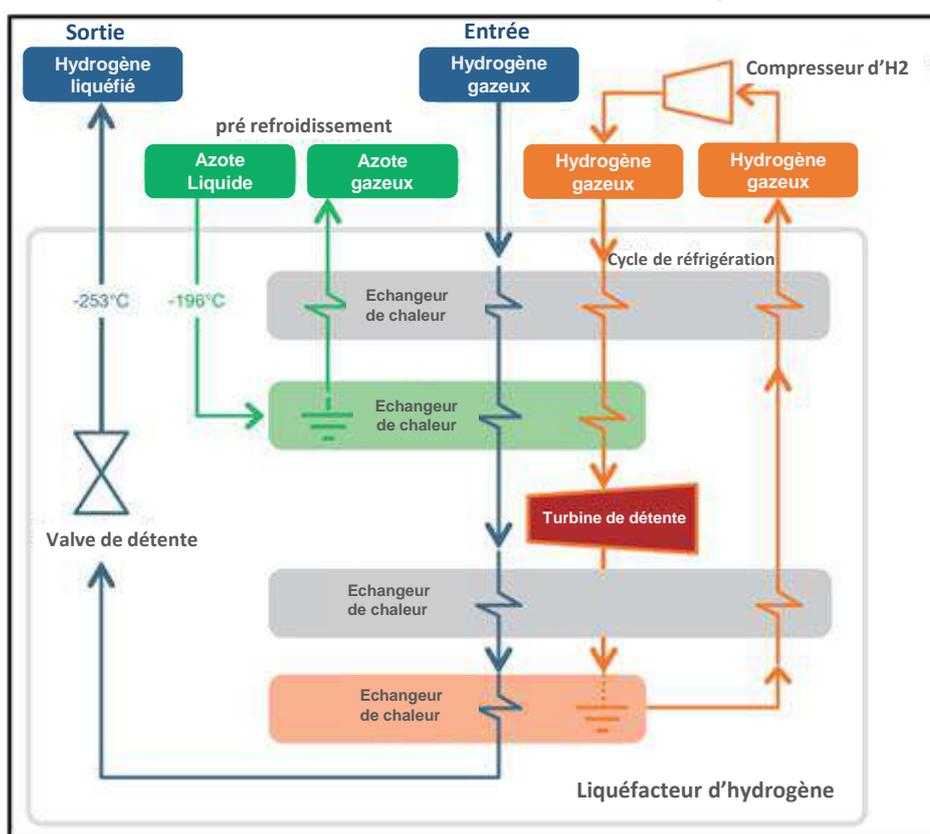
Les principaux procédés de liquéfaction de l'hydrogène sont le cycle hélium et le cycle hydrogène :

- Le cycle hélium est un cycle de Brayton, plus souvent utilisé pour des liquéfacteurs de petite taille (production inférieure à 1 t/j). Un plus faible investissement est privilégié vis-à-vis de la consommation d'énergie.
- Le cycle hydrogène est un cycle Claude, plutôt utilisé pour des liquéfacteurs de grande capacité (production entre 1 et 60 t/j).

Liquéfaction

Principes généraux

Schéma du processus de liquéfaction de l'H2 Cycle Claude



Source: Kawasaki Technical Review No.182

L'énergie consommée par kilogramme d'hydrogène liquéfié est l'un des indicateurs de performance principaux des liquéfacteurs hydrogène. Elle dépend de plusieurs facteurs dont en particulier la capacité de l'unité de liquéfaction que l'on exprime en t/j (tonne par jour). Plus la capacité de production est élevée, plus la consommation électrique au kilogramme est réduite. Lorsqu'une brique de pré-refroidissement à l'azote liquide est intégrée à l'unité de liquéfaction, la consommation électrique du liquéfacteur peut être réduite de 40%, même si naturellement il faut tenir compte dans le bilan complet de l'énergie consommée indirectement pour liquéfier l'azote utilisé. Les ordres de grandeur classiques de consommation d'énergie de liquéfaction varient de 10 à 15 kWh/kg, et l'industrie cible 7 kWh/kg à terme sur les plus grosses unités.

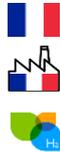
Il est important de noter que les liquéfacteurs à petite échelle ne parviennent pas à atteindre le même degré d'efficacité que les grands modèles de liquéfacteur.

Au besoin, des informations techniques plus détaillées sont par ailleurs disponibles sur la fiche « L'hydrogène liquide » disponible sur le site de France Hydrogène.

Source : Techniques de l'Ingénieur, Liquéfaction de l'hydrogène, Jean GALLARDA, 2001.

Liquéfacteur

Les acteurs du secteur



Petite à Moyenne échelle

Capacité de liquéfaction: Jusqu'à 100 t/j

Efficacité: De 7 à 10 kWh/kg LH2

Maturité: Commercialisé

Grande échelle

Capacité de liquéfaction: > 60 t/j

Efficacité: < 7 kWh/kg LH2

Maturité : En développement



Source : Air Liquide



Applications: Production d'énergie, Transportation, Stockage, Maritime, Aéronautique

Capacité de liquéfaction: De 5 à 50 t/j

Efficacité: de 8 à 12 kWh/kg

Consommation électrique : NC

Maturité : Commercialisé



Source : Chart



Applications : Aéronautique, Maritime, Stockage embarqué, Production d'énergie

LIQHYD 1000

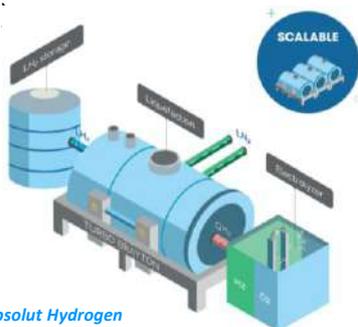
Capacité de liquéfaction: 1 t/j

Utilisation en séries pour atteindre 10 à 20 t/j

Efficacité: 12 kWh/kg

Consommation électrique: < 500 kW

Maturité : En développement (commercialisation en 2025)



Source : Absolut Hydrogen



Applications : Aéronautique, Maritime, Stockage embarqué, Production d'énergie

LIQHYD 50

Capacité de liquéfaction: De 11 à 50 kg/j

Efficacité: 25 kWh/kg

Maturité: Commercialisé (à la commande)

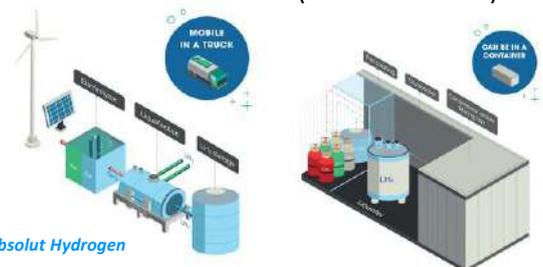
LIQHYD 100

Capacité de liquéfaction: De 30 à 100 kg/j

Efficacité: 20 kWh/kg

Consommation électrique: 85 kW

Maturité : Commercialisé (à la commande)



Source : Absolut Hydrogen

Liquéfacteur

Les acteurs du secteur



Applications: Equipement de liquéfaction (échangeurs & boîtes froides)

Capacité de liquéfaction: de 1 t / j à 50 t / j

Efficacité: < 10 kWh / kg LH2 (en fonction des choix des systémiers)

Maturité : Commercialisé



Source : Fives

Stockage

H₂



Sommaire



Stockage

Stockage : Principes généraux	62
Stockage sous forme gazeuse	63
Stockage sous forme liquide	76
Stockage sous forme solide	83
Stockage géologique	86



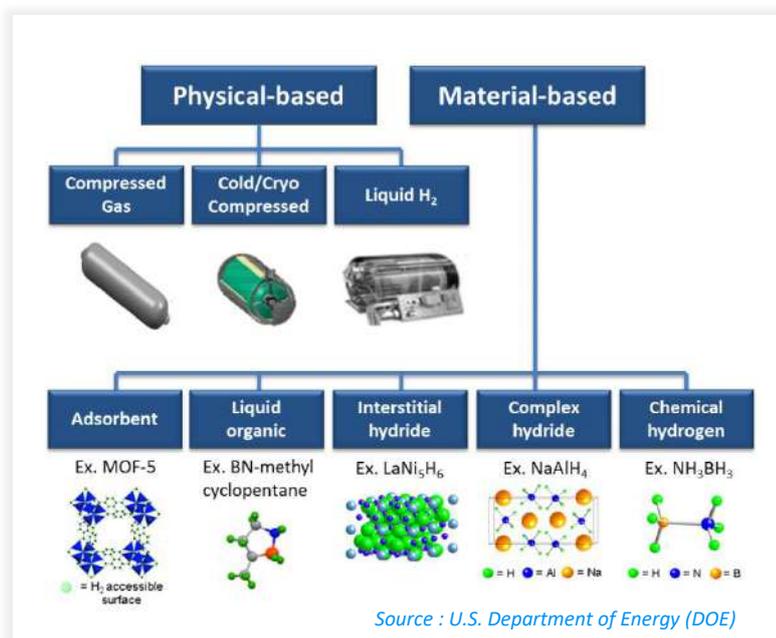
Le stockage de l'hydrogène

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 m³, 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>Avantages : Technologie mature, prix accessibles</p> <p>Inconvénients : Besoin de comprimer à fortes pressions et stockage volumineux</p> <p>Applications : Pour mobilité et industrie</p>
Stockage solide	<p>Avantages : Pression faible et densité de stockage plus importante qu'en gazeux</p> <p>Inconvénients : Apport de chaleur nécessaire au fonctionnement et maturité technologique faible, poids</p> <p>Applications : Transports de grandes quantités d'hydrogène et/ou mobilité avec un besoin fort d'autonomie</p>
Stockage liquide	<p>Avantages : Transport de grandes quantités d'hydrogène</p> <p>Inconvénients : Boil off (évaporation due au réchauffement de l'hydrogène = pertes), coûts élevés de l'équipement, rendement énergétique</p> <p>Applications : Usage avec besoins fort d'autonomie et petite consommation et/ou contrainte d'intégration (réservoir cubique par exemple)</p>

Vue d'ensemble des réservoirs



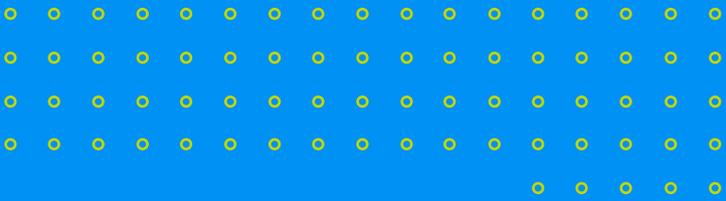
Densité de l'hydrogène

Gazeux :

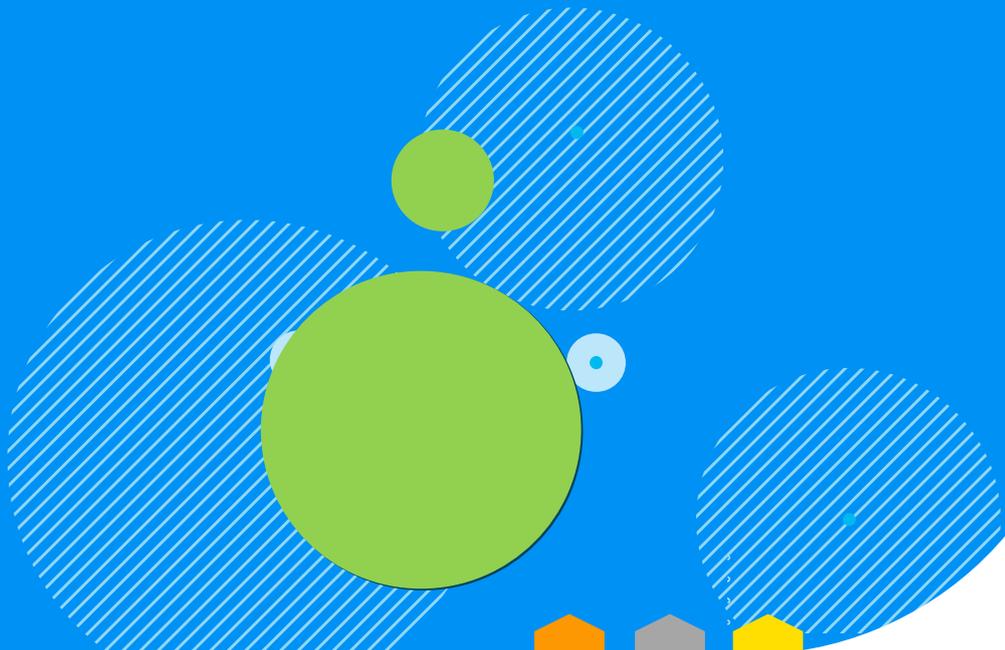
- CNTP : **0,0898 kg/m³**
- 220 bar : **14,885 kg/m³**
- 700 bar : **39,6 kg/m³**

Liquide :

- A pression atmosphérique : **70,9 kg/m³**
- Cryo compressé à 350 bar : **80 kg/m³**



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 ₂ associée	Applications recommandées
Type I	Mature	++	-	14,7 kg/m ³ à 200 bar	Transport et livraison d'H ₂ , stationnaire
Type II	Mature	+	0	14,7 kg/m ³ à 200 bar	Transport et livraison d'H ₂ , stationnaire
Type III	Mature pour P < 450 bar	-	+		Applications mobiles (stockage embarqué)
Type IV	Premières séries de commercialisations pour 700 bar	-	++	42 kg/m ³ 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'H₂
- 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

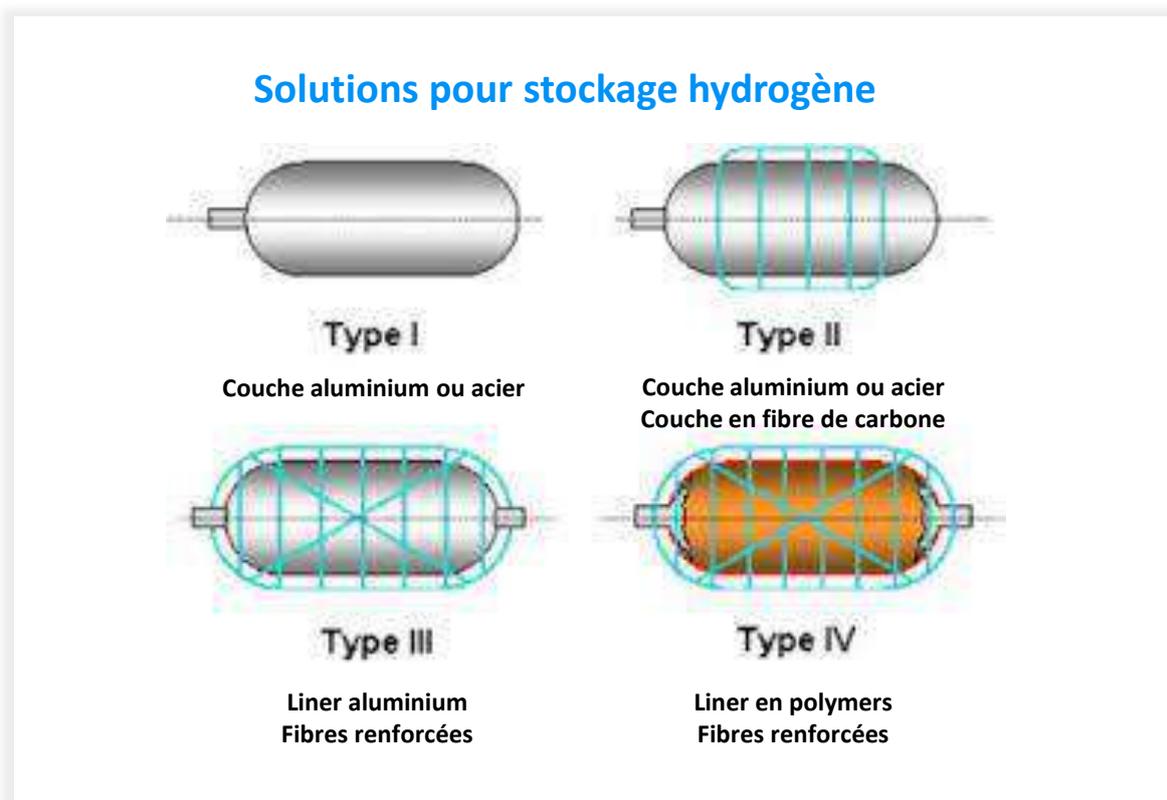
Durée de vie

La durée de vie d'un réservoir de stockage d'hydrogène dépend principalement des facteurs tels que **le matériau de fabrication** (résine utilisée), **la pression et la température** de stockage, **la fréquence d'utilisation et d'entretien**. **La qualité de l'hydrogène stocké** est également un facteur important à prendre en compte.

Il est prévu une durée de vie entre 10 et 20 ans (5 000 à 10 000 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)

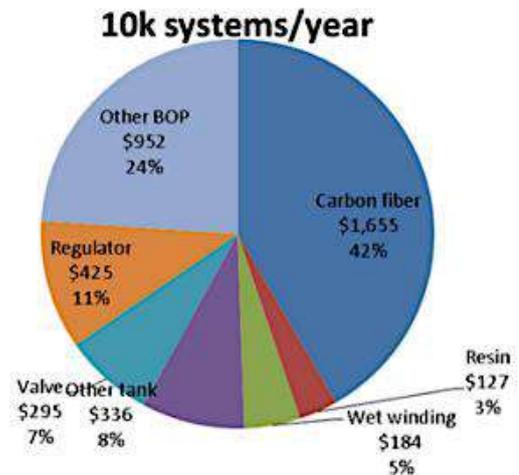
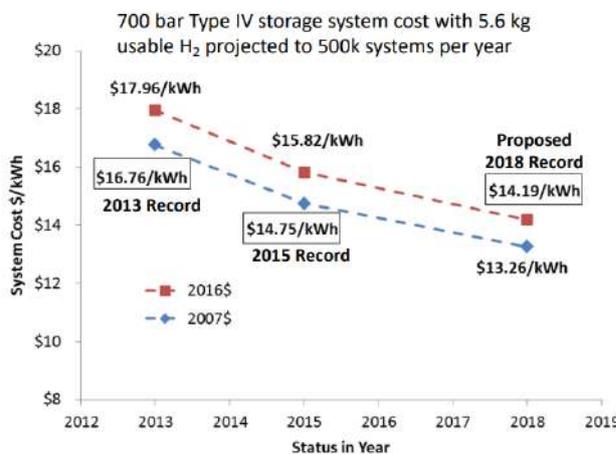
Type I : 200 bar : 380-450 €/kg

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

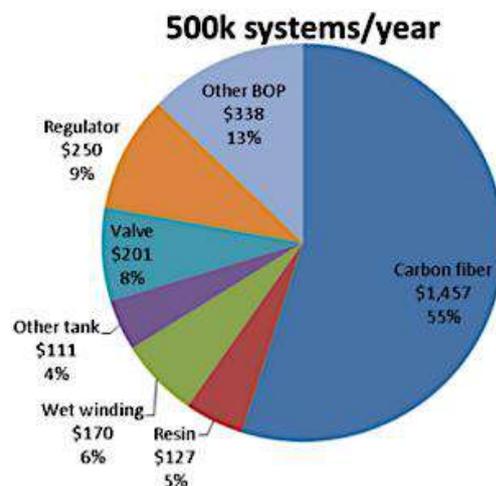
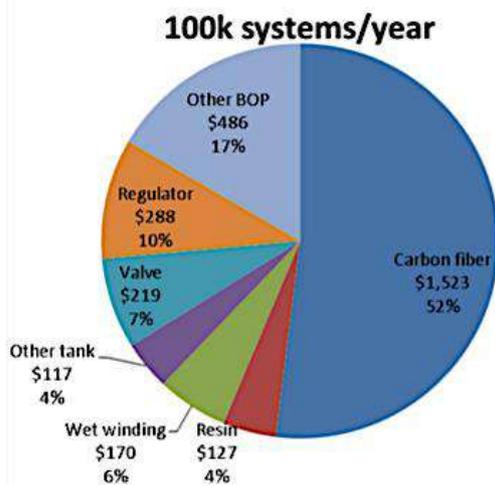
Type II ou III : 300-500 bar : Environ 500-700 €/kg

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 de la production 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 pour la mobilité – Réservoir pour le transport d'hydrogène

Typologie : Type IV, III and I

Pression nominale : 350 bar - 700 bar

Poids vide : Dépend de l'application et du type de réservoir

Poids H₂ embarqué : De 0,7 kg H₂ pour un véhicule léger ou un chariot élévateur. Au-delà de 20 kg H₂ pour un poids lourd

Maturité : Commercialisé



Source : FORVIA Faurecia

MAHYTEC
A Hensoldt Company



Applications : Tampon pour stations H₂, transport mobilité maritime

Typologie : Type IV

Pression : De 60 à 500 bar

Volume en eau : De 160 à 850 L

Poids vide : De 215 à 260 kg

Poids H₂ embarqué : Jusqu'à 9,5 kg

Maturité : Commercialisé



Source : Mahytec

ILJIN
Composites

Applications : Applications embarquées

Typologie : Type IV

Pression nominale : 700 bar

Poids vide : NC

Poids H₂ 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 H₂ : De 4,7 à 32 kg

Maturité : Commercialisé



Source : Hexagon Purus

Stockage gazeux (réservoirs)

Les acteurs du secteur



Application : Stockage embarqué
Typologie : Type IV
Pression nominale : 350 et 700 bar
Poids vide : Dépendant de l'application
Poids H₂ embarqué (par réservoir) :

- À partir de 0,5 kg H₂ pour un véhicule léger
- Jusqu'à 32 kg H₂ pour un poids lourd

Maturité : Commercialisé



Source : OPmobility



Applications : Haute pression
Typologie : Type I
Pression nominale : 450 bar
Poids vide : NC
Poids H₂ : 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 H₂ embarqué : De 16 à 76 kg H₂ /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 H₂ embarqué : Max 425 kg H₂



Source : Reuther



Entreprise française



Entreprise Européenne



Usine en France



Membre de France Hydrogène

Stockage gazeux (réservoirs)

Les acteurs du secteur



Applications : Stockage Embarqué

Poids H2 embarqué/unité	Poids à vide/ unité	Volume en eau/unité	Type	Pression
kg	kg	L	-	bar
2,55	47	62	IV	700
3,12/5,2	NC	130	IV	350/700
0,3	5	11	IV	350

Maturité :

- Réservoirs T IV : commercialisé

Raigi propose 3 réservoirs en développement:

- Stockage gazeux: réservoir type V recyclable et réservoir conformable
- Stockage liquide: réservoir cryogénique



Source : Raigi



Type de stockage : Stationnaire

Poids H2 embarqué/unité	Poids à vide/ unité	Volume en eau/unité	Type	Pression
kg	kg	L	-	bar
1,8	150	57	I	500
2,5	180	50	II	1000

Maturité :

- Réservoir à 500 bar: Commercialisé
- Réservoir à 1000 bar: En développement, objectif de commercialisation Q2 2024



Source : ROTH2



Applications : Stockage embarqué

Typologie : Type IV

Pression nominale : 350 bar et 700 bar

Poids vide max 245 kg

Poids H₂ embarqué : max 24 kgH₂

Source : Quantum



Applications : Drone

Typologie : Type IV

Pression nominale : 350 bar

Poids vide : NC

Poids H₂ : NC



Source : Doosan



Entreprise française



Entreprise Européenne



Usine en France



Membre de France Hydrogène

Stockage gazeux (réservoirs)

Les acteurs du secteur



H2X T700

Applications : Stationnaire, mobilité

Typologie : NC

Pression nominale : 350 bar

Volume en eau : 30 L

Poids vide : 25 kg

Poids H₂ : 0,7 kg

Commercialisation : disponible



Source H2X Ecosystems



Applications : Stockage stationnaire

Réservoirs adaptés aux solutions d'alimentation en énergie

Typologie : Type I

Pression nominale : 300 bar

Poids vide : 1600 kg

Poids H₂ embarqué : 17,8 kgH₂



Source : Solenco Power

STELIA



Aerospace Composites

Applications : Aéronautique, automobile, camions, et vélo

Typologie : Type IV

Pression nominale : 700 bar

Poids vide : NC

Poids H₂ : NC



Source : STELIA



LUXFER
GAS CYLINDERS

G-Stor Pro H2 Cylinders

Application : Bouteilles d'hydrogène comprimé pour la mobilité et la distribution

Typologie : Type III

Pression du design : 350 bar

Poids H₂ embarqué : De 1 à 7,8 kg

Poids vide : De 25 à 141,6 kg

Volume en eau : De 42 à 322l

Maturité : Commercialisé



Source : Luxfer



Entreprise française



Entreprise Européenne



Usine en France



Membre de France Hydrogène

Stockage gazeux (containers)

Les acteurs du secteur



UM
OE



Applications : Transport
Typologie : Type IV
Pression nominale : 350 bar
Poids vide : NC
Poids H₂ : Max 46 kg pour type IV
et max 1000 kgH₂ pour le module de transport
Délais de livraison : Dépend des options
demandées



Source : UMOE



EUROPE
TECHNOLOGIES

CIAM®



MHY 500®

Applications : Conteneur de multiples réservoirs,
stockage et distribution mobile
Typologie : Type IV
Pression nominale : 500 bar
Poids vide : 13 500 kg pour un conteneur de 20
ft
Poids H₂ : 430 kg H₂
Maturité : Commercialisé



Source Europe Technologies



HEXAGON
PURUS



Wystrach
Customized solutions in high pressure



Applications : Stockage stationnaire ou mobile
Typologie : Type IV
Pression nominale : 500 bar
Poids à vide : Jusqu'à 32 000 kg
Poids H₂ : Jusqu'à 1270 kg
Maturité : Commercialisé



Source : Wystrach & Hexagon Purus

 Entreprise française

 Entreprise Européenne

 Usine en France

 Membre de France Hydrogène

Stockage gazeux (containers)

Les acteurs du secteur



Applications : Stockage stationnaire
Typologie : Type I, II, III, et IV
Pression nominale : Jusqu'à 1000 bar
Poids vide : NC
Poids H2 : Jusqu'à > 3000 kg
Maturité : Commercialisé



Source Calvera



Applications : Stockage transportable (Tube-trailers, Conteneurs gaz, cadre de bouteilles)
Typologie : Type I, II, III et IV
Pression nominale : Jusqu'à 500 bar
Poids vide : NC
Poids H2 embarqué : Jusqu'à 1200 kg
Maturité : Commercialisé

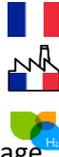


Source : Calvera

Stockage gazeux (containers)

Les acteurs du secteur

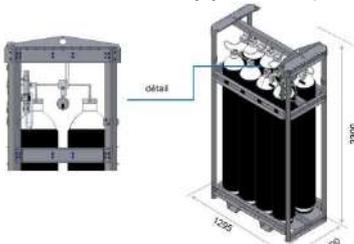
ROTH₂



Applications : Rack de multiples réservoirs stockage stationnaire

Poids H2 embarqué	Poids à vide	Nbre unités	Volume en eau/unité	Type	Pression
kg	kg	-	L	-	bar
62	5400	36	57	I	500
20,2	1650	8	50	II	1000

Maturité : Commercialisé (Sauf pour 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'H₂

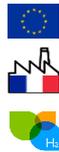
Poids H2 embarqué	Poids à vide	Nbre unités	Type	Pression
kg	kg	unités	-	bar
293	9 976	60	III	250
390	13 407	60	III	350

Maturité : Commercialisé



Source : BayoTech

AIR PRODUCTS



Applications : Stationnaire ou mobile (pour le transport)

Industriels & mobilité

Pression : Jusqu'à 1000 barg

Volume en eau : 10 000 à 50 000 L

Maturité : Commercialisé



Source : Air Products

MAHYTEC

A Hensoldt Company.



Applications : Rack de multiples réservoirs pour stockage stationnaire et transportable

Poids H2 embarqué	Poids à vide	Nbre unités	Volume en eau/unité	Type	Pression
kg	kg	-	L	-	bar
60	2400	6	1800	IV	500
90	3000	9	2700	IV	500
160	5000	16	4800	IV	500

Maturité : Commercialisé



Source : Mahytec

Stockage gazeux (destiné au transport)

Les acteurs du secteur

BayoTech™

Applications : Remorque de transport d'H2 gazeux

Typologie : 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 H₂ 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)

Maturité : Commercialisé



Source : BayoTech

CHART



Applications :

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)

Maturité : Commercialisé



Source : Chart

HEXAGON PURUS

Wystrachli

Customized solutions in high pressure



Applications:

- 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

AIR FLOW

HYDROGEN SERVICES



Applications : Transport d'H₂ gazeux dans des conteneurs, ISO tubes trailers sur châssis, Bouteilles/Racks de bouteilles

Poids H ₂ embarqué	Poids à vide	Dimension Conteneur (nb unités)	Volume en eau/unité	Type	Pression
kg	kg	ft (unités)	L	-	bar
302	25 840	40 (8)	2 250	I	200
550	26 947	40 (12)	2 340	II	250
340	3 150	20 (9)	1 666	IV	350

- Racks de 12 bouteilles (50 L/unité) d'une capacité de stockage totale d' H₂ de **42,6 kg @ 200 bar** destinée aux petites applications comme l'événementiel

Maturité : Commercialisé



Source : Air Flow



Entreprise française



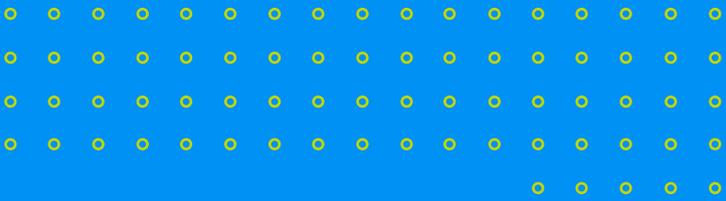
Entreprise Européenne



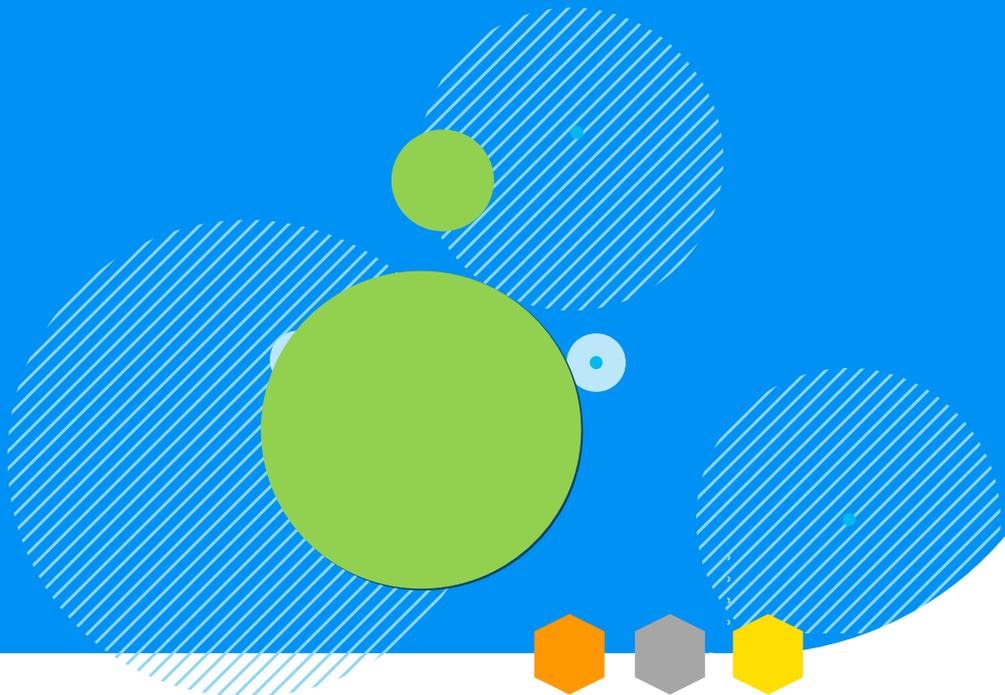
Usine en France



Membre de France Hydrogène



Stockage sous forme liquide

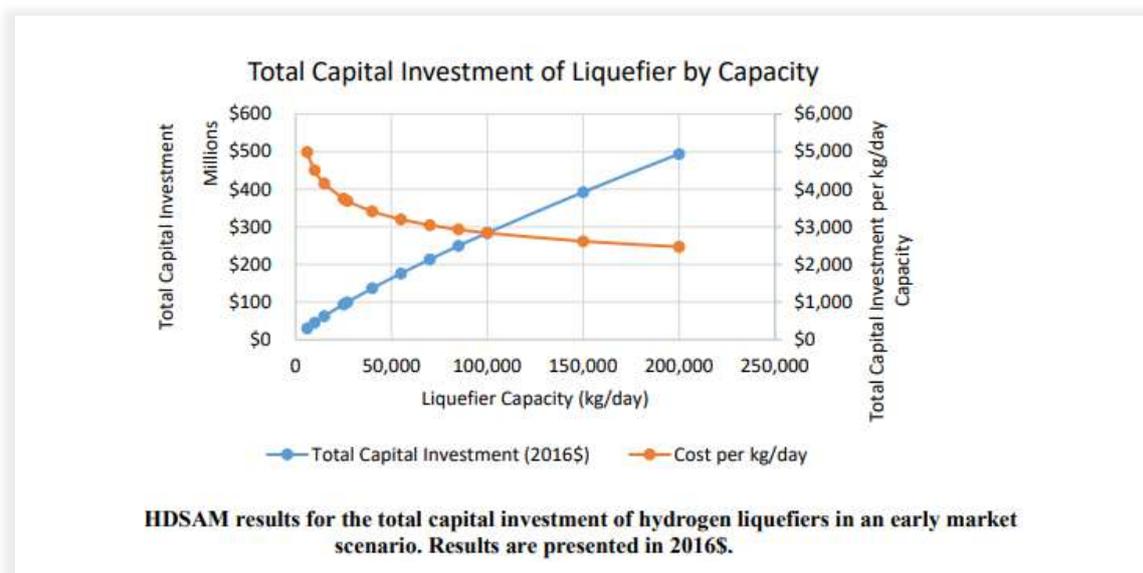


Stockage liquide

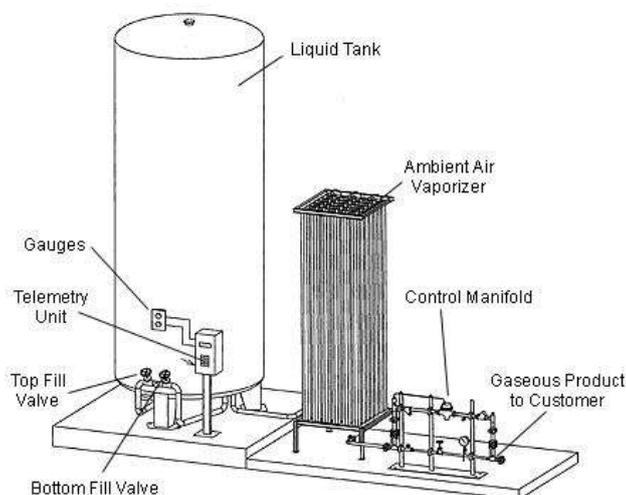
Principes généraux

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 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



Entreprises Hors Europe



Taylor-Wharton
Equipping the Hydrogen Infrastructure



Stockage liquide

Les acteurs du secteur



Applications : Aéronautique, Maritime, Ferroviaire, Stockage embarqué

Solution:

- Stockage d'hydrogène sous forme liquide
- Solution clé en main jusqu'à la distribution à pression et température d'utilisation
- Solution zéro boil-off : Gestion des évaporations possible par cycle de reliquéfaction ou isolation active

Pression de design : < 20 bar

Maturité : En développement (commercialisation en 2024)

Source : Absolut Hydrogen



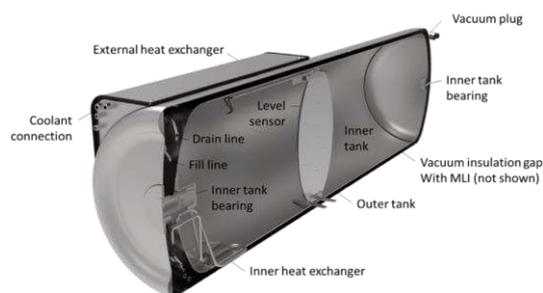
Progress in Aluminium

Applications : Véhicule (voiture, camion, remorques)

Volume réservoir : 400 L

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

Maturité : En développement (Pilote)



Source : SAG



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

Volume du réservoir : De 10 à 1 500 m³

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

Maturité : Commercialisé



Source : Chart Industries



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

Typologie : Type I (réservoir cryogénique)

Pression de design: 10 barg max

Poids à vide : 300 kg

Poids H₂ embarqué : 35 kg LH₂

Maturité : Commercialisé



Source : Chart Industries



Entreprise française



Entreprise Européenne



Usine en France



Membre de France Hydrogène

Stockage liquide

Les acteurs du secteur



Réservoirs isolés sous vide à double paroi pour hydrogène liquide.

Applications : Mobilité et Industrie

Volume réservoirs : 20 – 75 m3 (horizontaux et verticaux)

Pression de design : 9,9 barg à 12 barg

Maturité : Commercialisé



Source : Air Liquide



Applications : Industries électroniques, aéronautiques, métallurgiques, verrières

Volume en eau : 10 000 à 74 000 L

Maturité : Commercialisé



Source : Air Products



Applications :

Stockage et le transport dans la recherche et l'industrie

Volume du réservoir : 202 L

Pression de design : 6 barg max



Source : Cryotherm



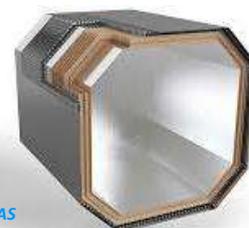
Application : Maritime

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



Entreprise française



Entreprise Européenne



Usine en France



Membre de France Hydrogène

Stockage liquide

Les acteurs du secteur



Applications : Aéronautique, Maritime, Ferroviaire, Stockage embarqué

Solution:

- Stockage d'hydrogène sous forme liquide
- Solution clé en main jusqu'à la distribution à pression et température d'utilisation
- Solution zéro boil-off : Gestion des évaporations possible par cycle de reliquéfaction ou isolation active

Pression de design : < 20 bar

Maturité : En développement (commercialisation en 2024)

Source : Absolut Hydrogen



Applications :

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

Volume du réservoir : Jusqu'à 39 m³

Pression de design : 12 barg max



Source : Hylium Industries



Taylor-Wharton
Equipping the Hydrogen Infrastructure

Applications : Stockage stationnaire

Volume du réservoir : De 20 à 120 m³

Pression de design : 10 bar

Maturité : Commercialisé



Source : Air Water/ Taylor-Wharton



Entreprise française



Entreprise Européenne



Usine en France



Membre de France Hydrogène

Stockage liquide (destiné au transport)

Les acteurs du secteur



Taylor-Wharton
Equipping the Hydrogen Infrastructure

Liquid hydrogen trailer

Applications: Citerne mobile dédiée au transport routier

Volume du réservoir : 35 et 67 m³

Pression de design : 11 bar

Maturité : Commercialisé



Source : Air Water/ Taylor-Wharton



Taylor-Wharton
Equipping the Hydrogen Infrastructure

Liquid hydrogen ISO container

Applications: ISO container dédiée au transport routier

Volume du réservoir : 40 pieds

Pression de design : 13,6 bar

Maturité : En développement



Source : Air Water/ Taylor-Wharton



engineering your competitive edge

Applications: Citerne mobile dédiée au transport routier

Volume du réservoir : 35, 67 et 78 m³

Pression de design : 11 bar

Maturité : En développement



Source : Air Water/ M1 ENGINEERING



Entreprise française



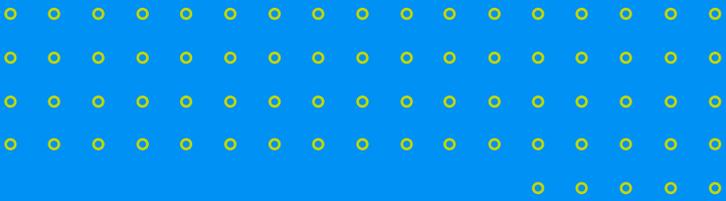
Entreprise Européenne



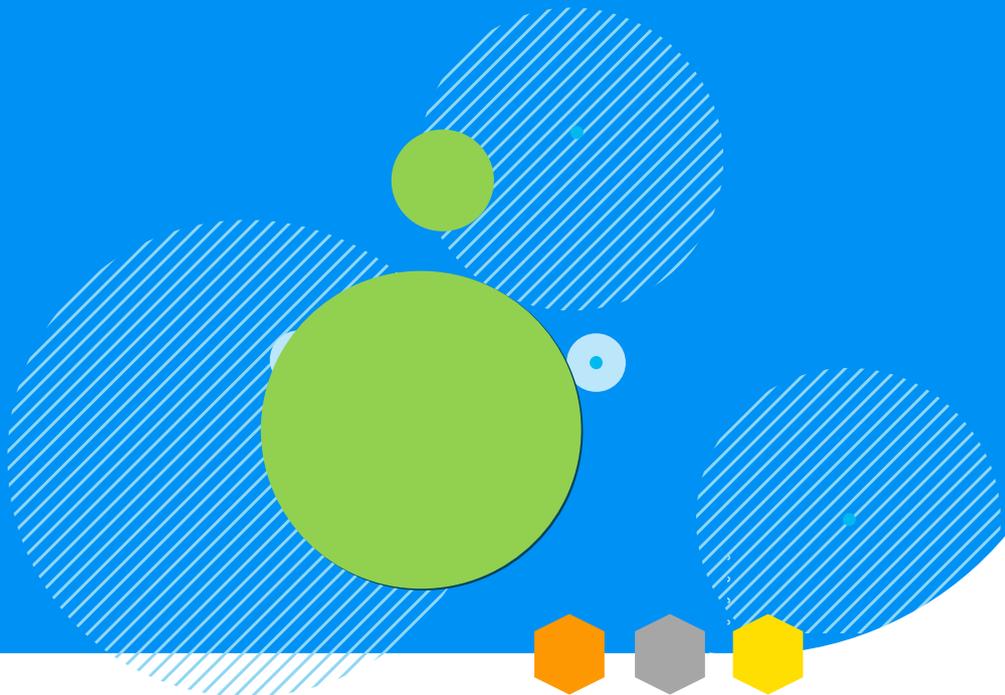
Usine en France



Membre de France Hydrogène



Stockage sous forme solide

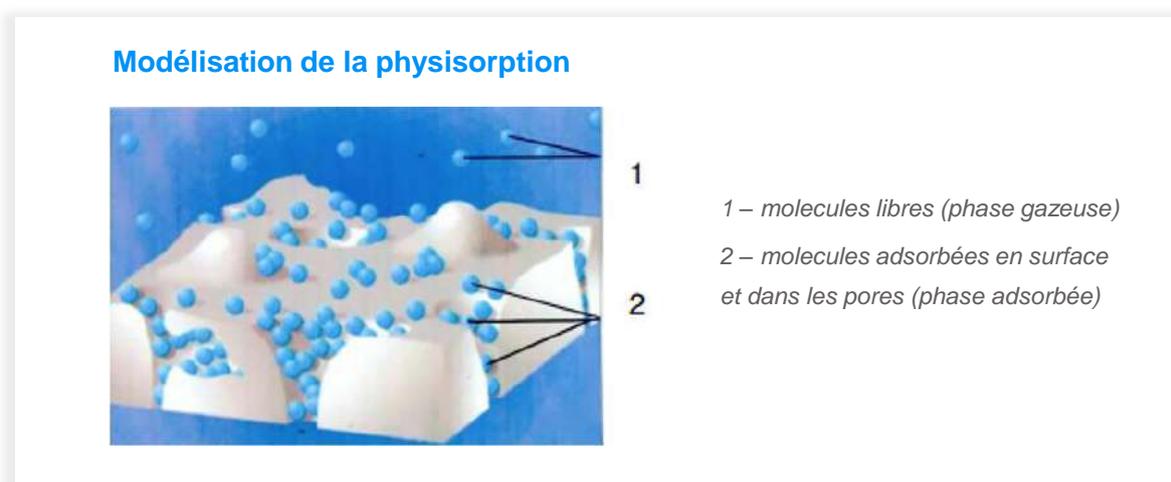


Stockage solide

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.

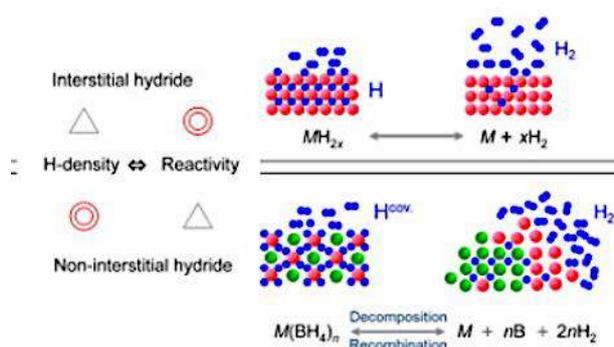


Caractéristiques (Données ACER 2021)

- 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) principalement

Caractéristiques :

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

Applications : Stationnaire, transport ou mobilité spéciale

Maturité : Commercialisé



Source Mahytec



Solution : stockage hydrogène sous forme solide

Caractéristiques :

- De 1 kg à plusieurs tonnes
- Sécurité : 10 bar à 20°C / non ATEX
- Débits d'absorption et désorption élevés
- Forte densité volumique / grande modularité

Applications :

- Stationnaires : stockage EnR, décarbonation industrie, autoconsommation, groupe électrogène
- Mobiles : machines off-road, bateaux maritimes & fluviaux, mobilité légère, ferroviaire

Maturité : commercialisé à partir de S2 2024



Source : Mincatec Energy



GKN Hydrogen

Solution :

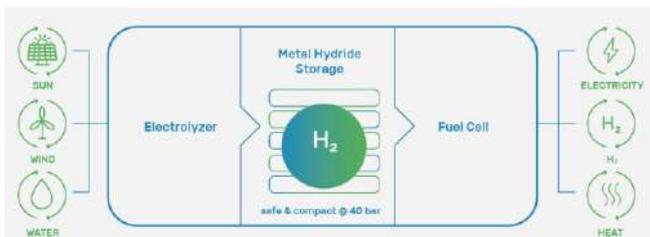
Solution complète génération d'hydrogène et stockage solide

Caractéristique :

- Poids hydrogène stocké : 10 à 260 kg

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

Disponibilité : NC



Source : GKN Hydrogen



Entreprise française



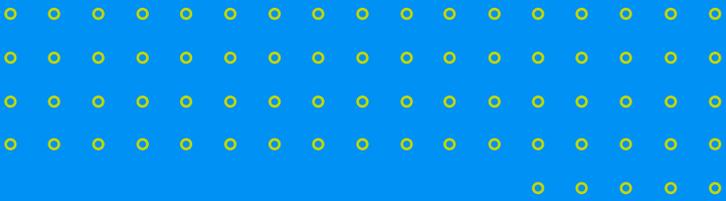
Entreprise Européenne



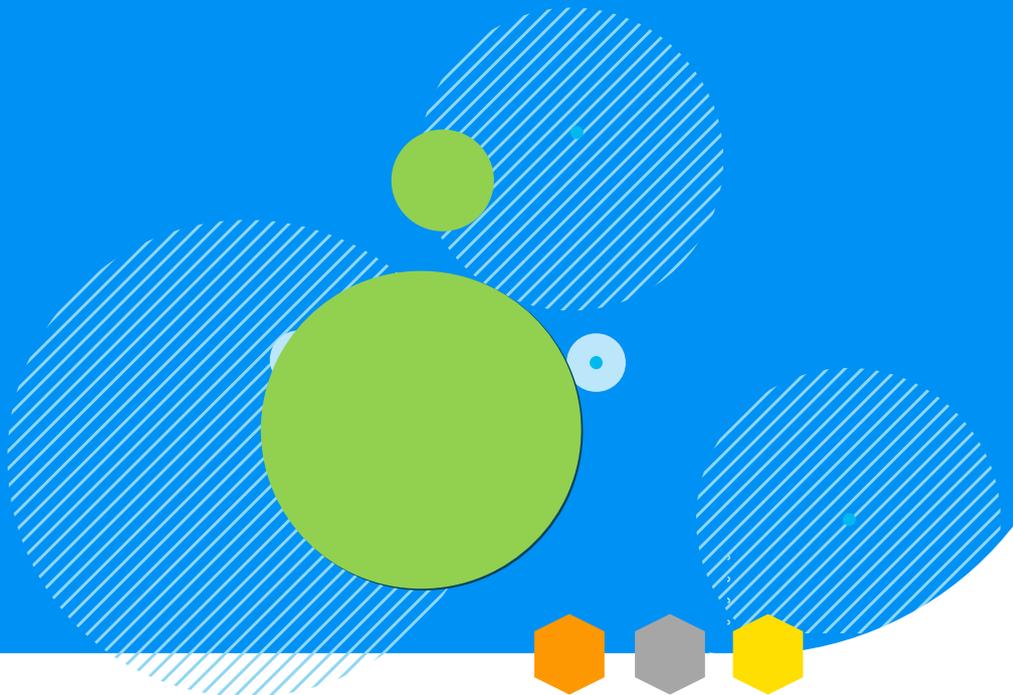
Usine en France



Membre de France Hydrogène



Stockage géologique



Stockage géologique

Stockage souterrain

Le stockage souterrain est envisagé dans les infrastructures H₂ 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 :

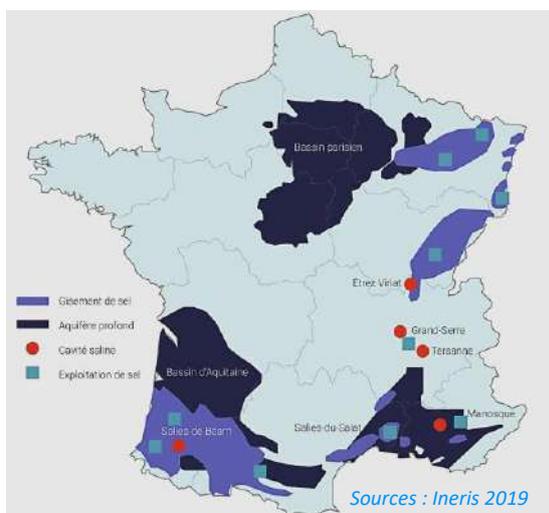
- Cavité saline : En développement avec premiers pilotes
- Champs déplété ou aquifère : premiers pilotes d'ici 3 ans – 5 ans (Données fournisseurs)
- Cavités minées revêtues : ~ 10 ans (Données fournisseurs)

Caractéristiques (Données ACER 2021)

- Volume type par cavité : **100 000 m³**
- Capacité / cyclage : **1 semaine à 1 mois**
- Masse utile : **2 000 à 4 000 tonnes de H₂ par cavité saline.**
- Pression haute : 100 bar (typique)
- Coûts : 0,18 à 1,34 €/kg H₂



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



Sources : Ineris 2019



H₂ storage potential (repurposed only):

- ▲ Potential H₂ storage: Salt cavern
- ▼ Potential H₂ 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

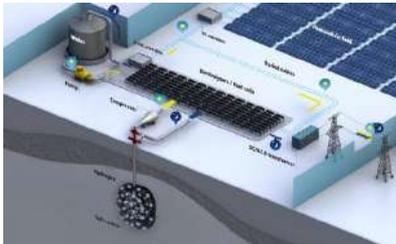
Cavités et milieux poreux



Solution : Services pour le stockage souterrain H₂, ingénierie, supervision construction, assistance à l'exploitation ou exploitation, R&D. Souterrain et installations de surface associées.

Caractéristiques : cavité saline, cavité minée revêtue, milieux poreux.

Projets : nombreux projets commerciaux pour clients tiers dans le monde entier ; R&D cofinancée (Hystories, FrHyGe, etc.)



Source : Geostock



Solution :

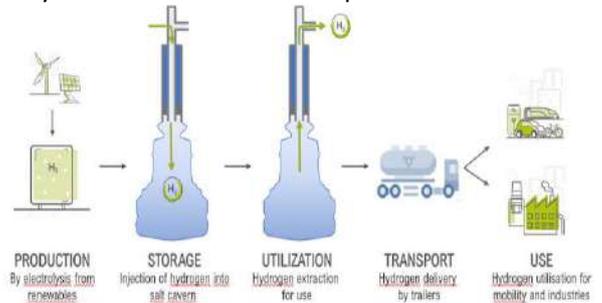
Opérateur / investisseur de stockage sous-terrain H₂
Services pour le stockage sous-terrain H₂ pour tiers

Caractéristiques : Cavité saline

Projets : R&D et démonstrateurs industriels :

HypSTER : 1er démonstrateur de stockage vert de H₂, capacité totale de la cavité : 44 t

FrHyGe : Sur le site de Manosque



Source : Storengy



Solution :

Opérateur / investisseur de stockage sous-terrain H₂

Caractéristique : Cavité saline

Projets : R&D et démonstrateurs industriels :

[Hygeo](#), Lacq H₂

Transport

H₂



Sommaire



Transport

Transport : Principes généraux	88
Transport par voie routière	93
Transport par hydrogénoducs	98
Transport par voie maritime	102



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 cylindre 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 H₂
- **Périmètre** : Pour 0 à 10 t H₂ transporté / jour dans un rayon de 150 km

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

- **Prix** : 0,64 € à 2,23 €/kg H₂
- **Périmètre** : Pour 0 à 10 t H₂ transporté / jour à partir d'un rayon de 300 km

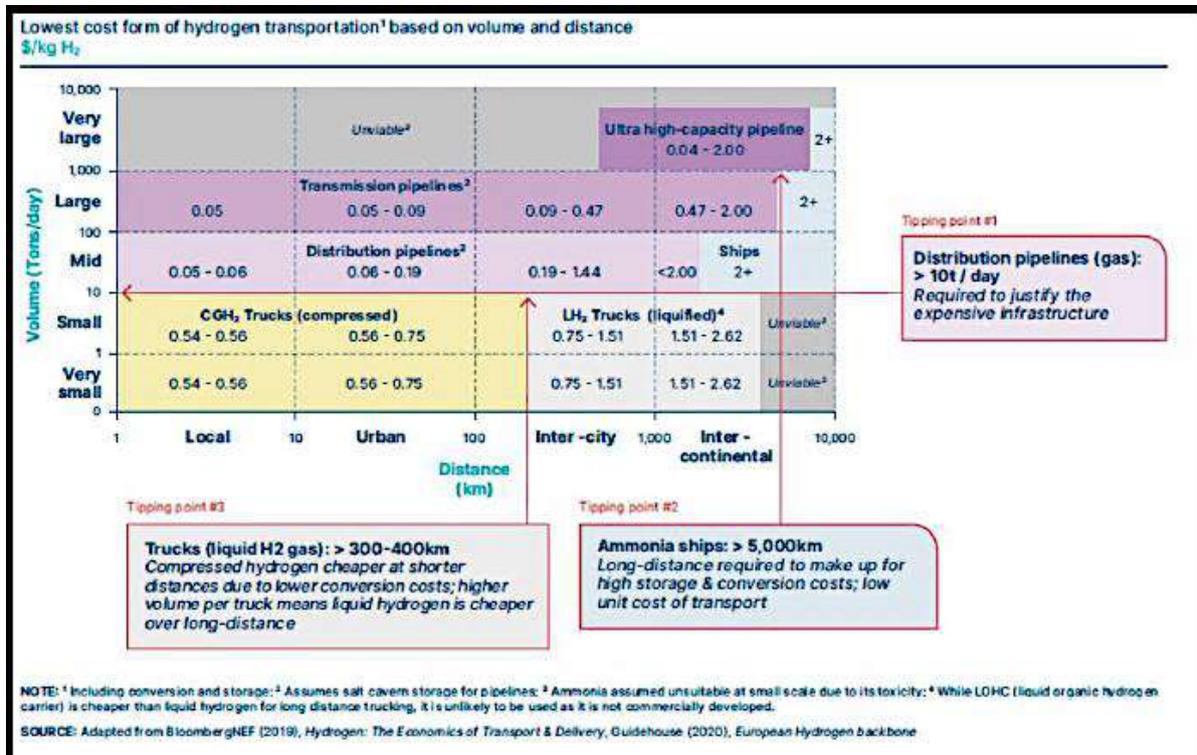
Transport par pipeline *(Source Bloomberg 2019 et Hydrogen Backbone)*

- **Prix** : 0,04 € à 1,7 €/kg H₂
- **Périmètre** : A partir de 10 t H₂ transporté / jour afin de justifier les coûts élevés des infrastructures

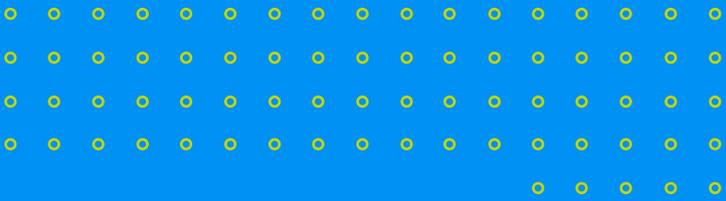
Transport par voie maritime *(Source Bloomberg 2019)*

- **Prix** : > 1,7€ /kg H₂
- **Périmètre** : Transport sur plus de 5 000 km à plus de 10 t H₂ transporté / jour

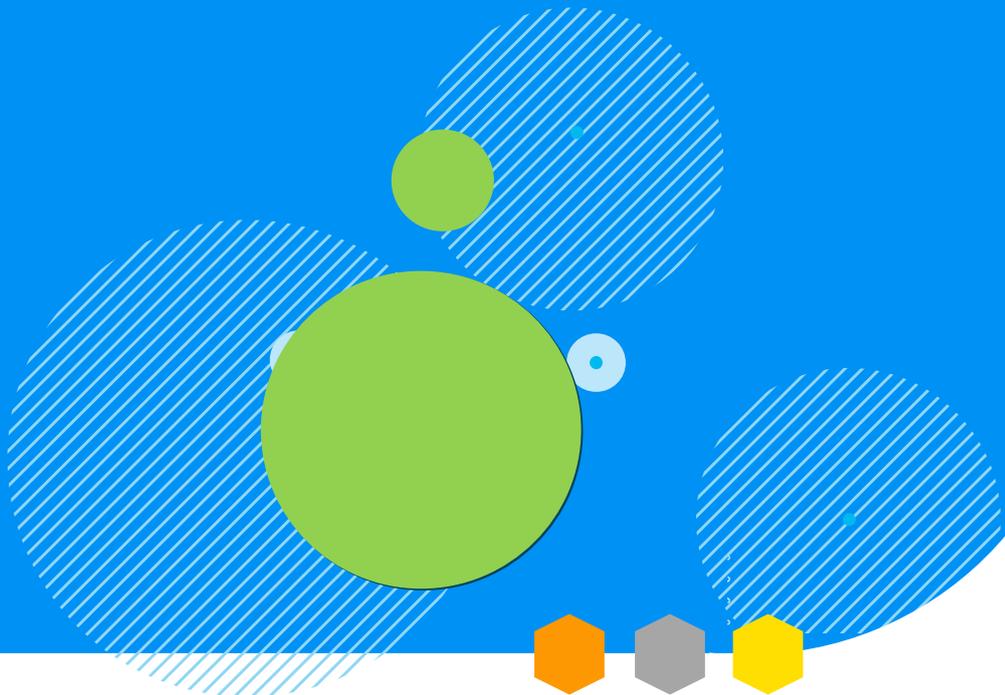
Coût du transport de l'hydrogène basé sur le volume et la distance



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

L'hydrogène peut être **transporté du point de production au point d'utilisation** dans des réservoirs spéciaux sur des **camions, par voie routière**, soit sous forme gazeuse et comprimée, soit sous forme liquide.

L'hydrogène **gazeux** est transporté comprimé à des pressions allant de **200 à 500-600 bar** dans des **conteneurs à gaz à éléments multiples** (MEGC) de 10 à 40 pieds, des **cadres de bouteilles** ou des remorques **tubes trailers**.

La quantité d'hydrogène que l'on peut transporter dépend du **type de réservoir utilisé** et de **la pression au sein du réservoir**. En respectant la réglementation ADR, qui inclut le poids des conteneurs d'hydrogène, la quantité d'hydrogène transportée sous pression est généralement inférieure à une tonne, souvent entre **600 et 700 kg d'hydrogène**, tout en restant conforme à une limite ADR totale de 44 tonnes pour le poids du réservoir et de son contenu;

L'hydrogène **liquide** est transporté à des températures cryogéniques : **-253°C** à pression atmosphérique, dans des **camions citernes cryogéniques**. Au point d'utilisation, l'hydrogène est transféré du camion-citerne au réservoir de stockage d'hydrogène liquide. Un camion-citerne peut contenir jusqu'à 4 tonnes d'hydrogène liquide.

Actuellement, les **applications cryogéniques** restent destinées au transport de longue distance (**rayon logistique de 500 km minimum**), pour des applications dans le spatial. Tandis que le **transport gazeux** est plus compétitif sur des **courtes-moyennes distances** (400-500 km maximum).

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.

Plusieurs acteurs interviennent dans le cadre du transport de l'hydrogène : les experts-gaziers qui assurent le transport de leur molécule en interne, les transporteurs qui peuvent être indépendants (Geodis, etc.) agréés en transports de matières dangereuses et les acteurs qui proposent des équipements pour le transport.

Typologie :

Gazeux

- Cadre de bouteilles
- Tubes trailer
- Conteneur

Cryogénique

- Camion-citerne



Source : cadre de bouteilles Linde



Source : Tubes trailer CYE energy



Source : Camion-citerne cryogénique Chart Industries

Bibliographie utile

- Hydrogen Council – « Hydrogen insight 2021 »

Transport par voie routière

Acteurs de la filière



Entreprises Européennes



Entreprises Hors Europe



Transport par voie routière

AIR PRODUCTS



Distributeur d'H2 par camion sous forme:

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

Maturité : Commercialisé



Source : Air Products

Air Liquide



Type de stockage :

- Gazeux (inférieur à 5 000 m³/mois, cadre de 9, 18, 28 bouteilles, tube trailers)
- Cryogénique (Solution de mini vrac si besoin entre 400 à 4 000 m³/mois)

Source : Air Liquide

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

Maturité : Commercialisé



Source : Air Liquide

MESSER
Gases for Life



Type de stockage :

- Gazeux (bouteilles et cadre de bouteilles) @ 200 bar
- Tube trailer @ 200 bar
- Camion équipé d'un système de stockage composite @ 300 bar

Usages

Hydrogène destiné pour des applications industrielles et pour de la mobilité

Maturité : Commercialisé



Source : Messer



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 : NIPPON GASES

brun invest



Application:

- Transporteur
- Organisateur de transport multi-clients (exploitation centralisée)
- Loueur de moyen de transport (semi-remorque)
- Maintenance des moyens de transport

Maturité : Commercialisé



Source : Brun Invest



Entreprise française



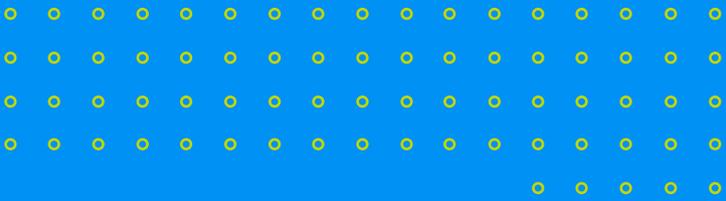
Entreprise Européenne



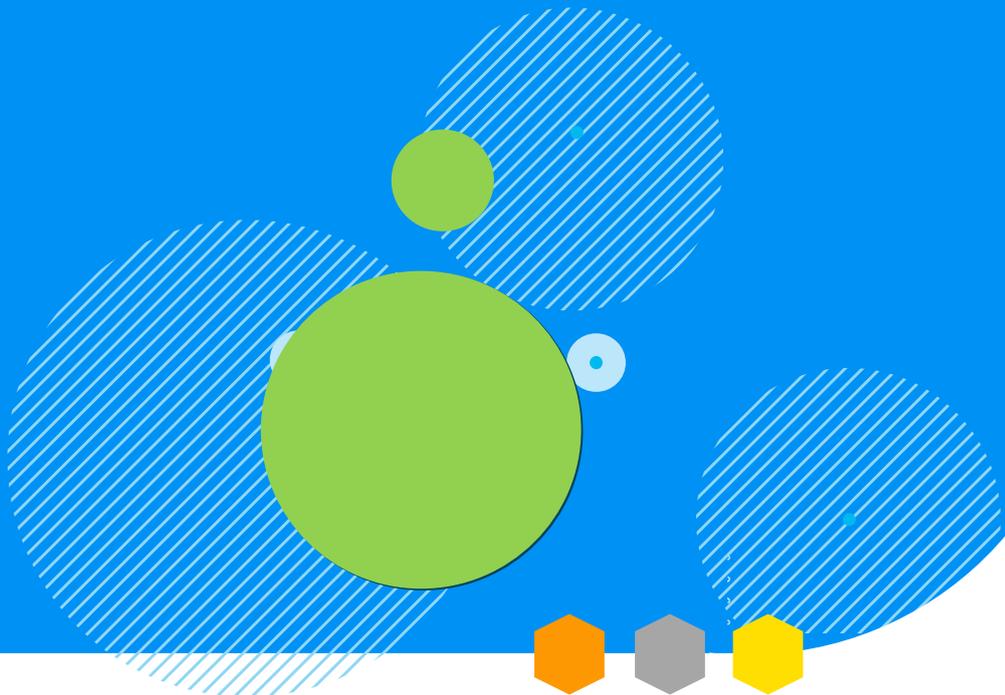
Usine en France



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.

En Europe, l'initiative "European Hydrogen Backbone" regroupe **33 opérateurs d'infrastructures gazières** issus de **25 États membres** de l'UE, ainsi que de la Norvège, de la Suisse et du Royaume-Uni.

D'ici 2040, cette initiative vise à déployer **53 000 km** de pipelines hydrogène, dont **60 % issus d'infrastructures gazières existantes reconverties**, tandis que les **40 %** restantes seront de **nouvelles canalisations** nécessaires

pour connecter de nouveaux consommateurs, notamment dans des pays où les réseaux gaziers existants sont de tailles limitées.. (Source : European Hydrogen Backbone)



Ex. Pipelines d'hydrogène aux États-Unis.

Caractéristiques :

- Pression : Les grands pipelines fonctionnent à 80 bar, tandis que les moyens et petits fonctionnent à 50 bar.
- Quantité d'H₂ adressée : Intérêt du pipeline pour un transport supérieur à 10 tonnes/jour afin d'amortir les investissements.
- Diamètre du pipeline: Les diamètres des pipelines varient de **50 à 120 cm**. Plus le diamètre est grand, plus les coûts de transport sont bas. Pour un diamètre de 120 cm, les coûts se situent entre **0,09 et 0,17 €/kg H2**, tandis que pour les diamètres de 50 à 100 cm, les coûts sont d'environ **0,11 à 0,21 €/kg H2**.

Enjeux:

- Les reconversions des canalisations existantes nécessiteront des adaptations importantes.
- Fragilisation des aciers sous hydrogène et risque de fuites
- Les hydrogénoducs, comme les gazoducs, peuvent être enfouis.
- Dimensionnement adapté au futur volume croissant

Hydrogénoducs



Solution :

Développement/Investissement/Construction/Exploitation de réseaux de transport d'H2 en France

Projets :

- MosaHYc - Moselle vers la Sarre
- RHYn - Alsace du Sud vers l'Allemagne et la Suisse
- Hynframed - De Fos-sur-Mer à Manosque
- DHUNE - Dans le port de Dunkerque
- WHHYn - Hub Franco-Belge
- BarMar – la liaison Espagne-France
- HY-FEN – le trait d'union entre Fos-sur-Mer, Nancy vers l'Allemagne



Source : GRTgaz

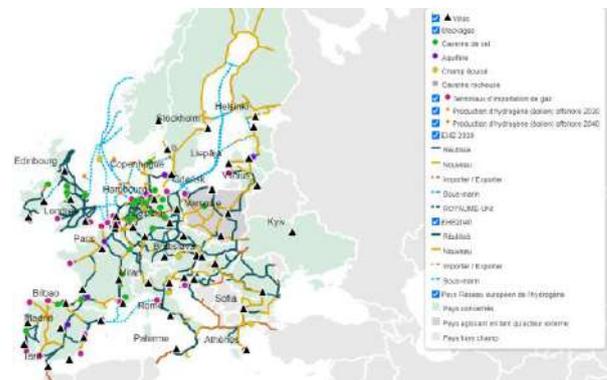


Solution :

- Opérateur / investisseur de réseaux de transport et de stockage d'H2 dans le grand Sud-Ouest
- Services pour le transport et le stockage H2 pour les industriels et les réseaux transfrontaliers

Projets:

- Dorsale Européenne de l'hydrogène (European Hydrogen Backbone), H2eart for Europe,
- H2Med-BarMar, HySoW



Source : Teréga



Solution : Opérateur / investisseur de réseaux de transport de H₂ sur son domaine géographique (nord ouest de l'Europe)

- Services pour le transport H₂ sur 3 espaces géographiques



Source : Air Liquide



Solution : Opérateur / investisseur de réseaux de transport de H₂ (Nord de l'Europe)

- Services pour le transport H₂
- 2900 km de pipeline dans le monde



Source : Air Products



Entreprise française



Entreprise Européenne



Usine en France



Membre de France Hydrogène

Hydrogénoducs



Solution :

Architecte intégrateur / investisseur et opérateur de la logistique H2 et CO2 sur toute la France

Projets/Réalisations :

FIA ETCR, Armor Hydrogène, Hy'Touraine, e-CHO (Elyse Energy), PHARE 2 (Airbus, Aéroport Toulouse)



Source : Teréga Solutions



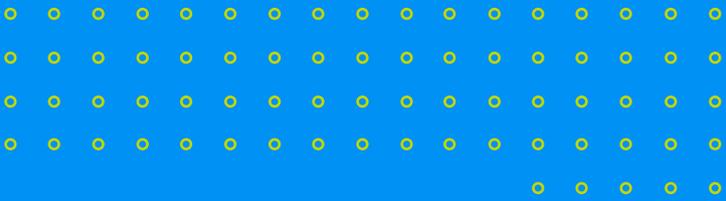
Solution : Fourniture de composants pour le transport et la distribution d'hydrogène

Caractéristiques :

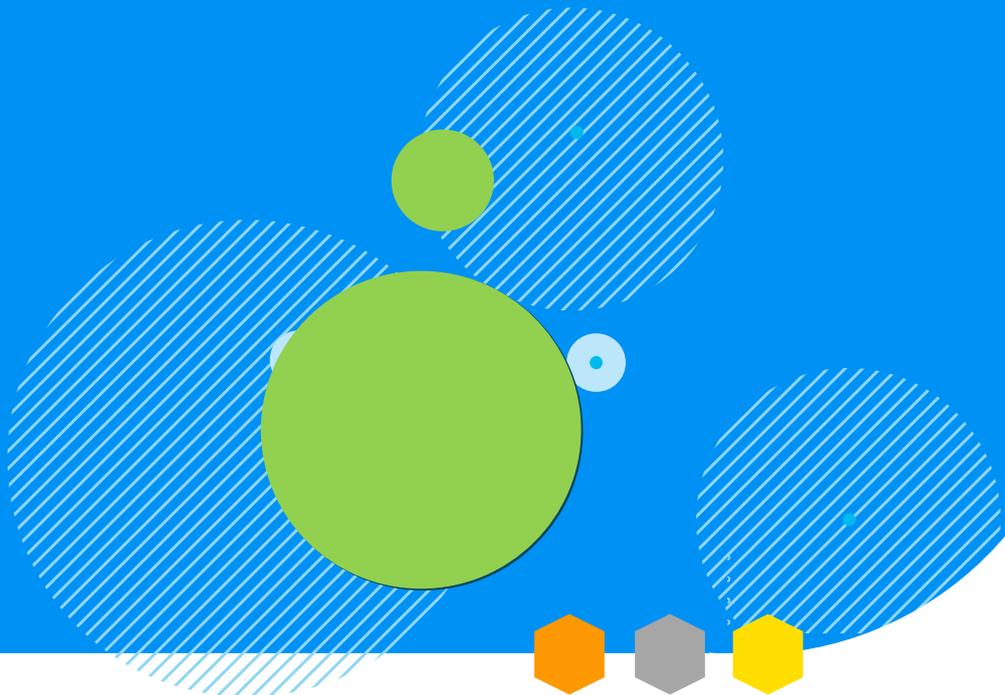
Composants 20-100% Hydrogène
Régulateurs de pression, compteurs, filtres, vannes à boules, Postes complets



Source : Gazfio



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 (cf. catégorie “Molécules d’intérêt”) 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 :

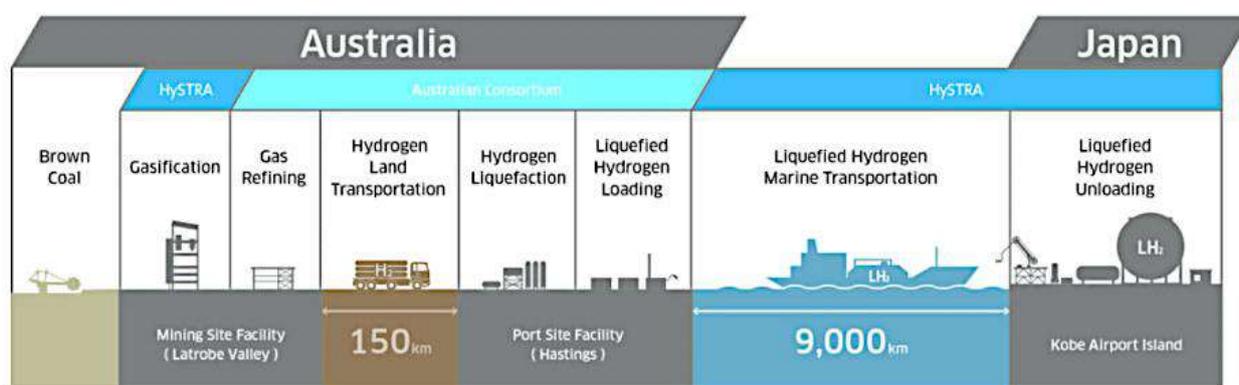
Peu d’export aujourd’hui mais de grands corridors vont naître avec de grands hubs internationaux avec la nécessité de transporter beaucoup d’hydrogène d’un pays à un autre.

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 m³ d’hydrogène à l’état liquide et un tonnage brut du navire de 8 000 tonnes.



LH2 tanker « Suiso Frontier » de Kawasaki



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

AIR FLOW
HYDROGEN SERVICES



Type de stockage : Conteneurs ISO tubes trailers, Bouteilles/Racks de bouteilles

Poids H2 embarqué	Poids à vide	Dimension Conteneur (nb unités)	Volume en eau/unité	Type	Pression
kg	kg	ft (unités)	L	-	bar
302	25 840	40 (8)	2 250	I	200
550	26 947	40 (12)	2 340	II	250

- Racks de 12 bouteilles (50 L/unité) d'une capacité de stockage totale d' H2 de **42,6 kg @ 200 bar** destinée aux petites applications comme l'événementiel

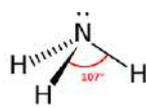
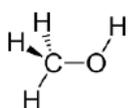
Maturité : Commercialisé



Source : Air Flow

Molécules de synthèse

H₂



Sommaire

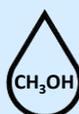


Molécules de synthèse

Molécules de synthèse : Principes généraux 109

Méthane 112

L(O)HC : Liquid (Organic) Hydrogen Carrier 116



***NB : Cette section est actuellement en cours de construction.
D'autres fiches seront ajoutées prochainement.***

Molécules de synthèse

Principes généraux

L'hydrogène, gazeux à pression atmosphérique, possède une **forte densité énergétique massique**, mais une **très faible densité énergétique volumique** (3,00 kWh/Nm³) ; de ce fait, pour être stocké dans des réservoirs de taille raisonnable et pour faciliter son transport, il doit être **comprimé à très haute pression**, entre **300 et 700 bars**, ou bien **liquéfié à -252°C**, ce qui soumet les équipements embarqués à des défis techniques et technologiques importants.

Pour répondre à ces défis, une approche alternative implique la conversion chimique de l'hydrogène renouvelable/bas carbone en **molécules de synthèse**, par réaction avec du **CO₂** ou de l'**azote**.

Les molécules de synthèses sont majoritairement liquides (méthanol, carburant paraffiniques, liquid (organic) hydrogen carriers (L(O)HC)) ou facilement liquéfiables (ammoniac) à l'exception du méthane qui reste un gaz aux conditions de pression et température normales. Elles sont **plus faciles à transporter, à stocker** que l'hydrogène. Selon les cas, ces dérivés de l'hydrogène peuvent ainsi servir:

- au transport de l'hydrogène moyennant une opération de déshydrogénation à destination (notamment les L(O)HC)
- à la substitution de molécules d'origine fossile (notamment le kérosène, le méthanol et le méthane),
- ou au transport et à la substitution à la fois ou alternativement (cas de l'ammoniac).

Elles représentent une voie d'avenir très prometteuse notamment pour la décarbonation transport lourd dont **l'aérien, le maritime ou le fluvial**. Les molécules de synthèse durables sont également utilisées comme **matières premières** pour décarboner **l'industrie**.

La production des molécules de synthèse nécessite une consommation d'hydrogène importante et, selon les molécules, de CO₂ également. À cet égard, on peut distinguer deux catégories de **molécules de synthèse durables** en fonction de la source d'hydrogène utilisée :

- La première catégorie comprend les molécules de synthèse dérivées de l'hydrogène généré par **électrolyse de l'eau** utilisant **l'électricité renouvelable/bas carbone**, et du CO₂ capté dans les procédés industriels ou dans l'air ambiant ou d'origine biogénique, ou l'azote de l'air dans le cas de la synthèse de l'ammoniac. Cette catégorie nommée électro-carburants (« e- ») comprend l'e-méthanol, l'e-méthane, les e-carburants paraffiniques et l'e-ammoniac ainsi que les L(O)HC (Liquid (Organic) Hydrogen Carrier).
- La deuxième catégorie comprend les molécules de synthèse issues de l'hydrogène et du CO₂, produits à partir de la **biomasse** comme **les biocarburants** tels que le biométhanol, le biojet ou le bio-GNL. Dans ces procédés, l'hydrogène et le CO₂ sont directement issus de la biomasse au sein même des réacteurs et sont donc produits et consommés sans apports extérieur. Cependant, de l'hydrogène renouvelable ou bas carbone d'origine non biogénique peut y être adjoind, dans le but d'augmenter leur « rendement biomasse ». Dans ce cas précis, les biocarburants constituent également un débouché de la filière hydrogène. Dans la suite de cette section, la notion d'e-carburants est étendue à cette dernière modalité de production.

Molécules de synthèse

Principes généraux

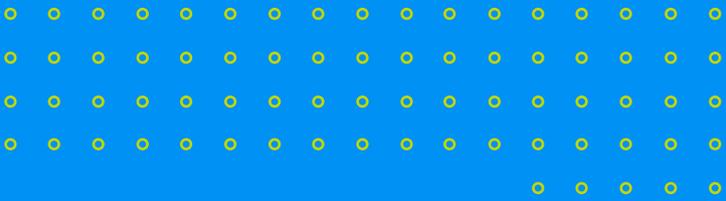
- **L'e-méthanol (e-MeOH)** dont la production est déjà industrialisée et devenue une réalité en Europe, en Amérique du Nord et en Asie. Ce composé est utilisé comme combustible ou matière première pour décarboner divers processus industriels, tels que la production de produits chimiques (formaldéhyde, l'acide acétique, etc.) et d'oléfines (éthylène, propylène). L'e-méthanol est également envisagé comme carburant alternatif pour le secteur **maritime**, et peut être facilement incorporé à l'essence pour l'alimentation des moteurs automobiles thermiques conventionnels. Actuellement, il existe environ soixante projets de production d'e-méthanol dans le monde, à différents stades de déploiement.
- **L'e-méthane (e-CH₄) ou SNG (Synthetic Natural Gas)** offre des avantages distincts selon son état physico-chimique. Sous sa forme liquide, il peut être incorporé au GNL (gaz naturel liquéfié), permettant ainsi de bénéficier des infrastructures existantes et des réglementations en vigueur. À l'état gazeux, il bénéficie également de l'infrastructure existante et peut être injecté dans les réseaux de gaz; il est aussi compatible des usages traditionnels du gaz naturel (chauffage, électricité) et peut être utilisé comme carburant dans les transports routier (GNV) et maritime. 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 plusieurs technologies de méthanation catalytique, biologique ou hybride ; chacune ayant ses spécificités.
- **L'e-ammoniac (e-NH₃)** peut répondre à plusieurs finalités. En premier lieu, dans **la fabrication d'engrais**, l'e-ammoniac peut remplacer l'ammoniac produit classiquement avec du gaz naturel, ceci afin de décarboner le secteur agroalimentaire. Dans une logique de **transport international massif d'hydrogène**, l'e-ammoniac est également un bon candidat comme vecteur de transport d'hydrogène. L'hydrogène est ensuite récupéré par craquage une fois l'ammoniac livré près des points de consommation d'hydrogène. L'avantage majeur de ce choix pour le transport longue distance est l'usage des infrastructures existantes de transport de l'ammoniac (bateaux, équipages, installations portuaires). Dans cette application l'e-ammoniac n'est pas utilisé pour la motorisation du bateau mais uniquement comme une marchandise à transporter. Enfin, l'e-ammoniac peut être utilisé comme **carburant** pour réduire les émissions de CO₂ dans les transports lourds, les turbines, les fours ou les groupes électrogènes. Comparé aux autres combustibles comme le gaz naturel, le méthanol, l'essence, l'hydrogène ou le GPL, l'ammoniac est moins inflammable et présente un risque d'explosion moindre. Cependant, sa toxicité est avérée et plus élevée que celle d'autres combustibles classiques. Les préoccupations concernant les risques pour l'environnement peuvent constituer un obstacle à son adoption comme carburant, surtout dans des espaces confinés comme les navires.
- **Les électro-carburants paraffiniques (e-essence, e-kérosène et e-gazole)** sont des alternatives proches de leurs homologues conventionnels, avec des densités énergétiques élevées, les rendant pertinents pour la motorisation des **transports routiers, maritimes et aériens**. Ils sont facilement stockables et transportables sous forme liquide à température ambiante. De plus, ces électro-carburants présentent l'avantage de ne pas contenir de polluants tels que le soufre ou les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP). Par exemple, le gazole paraffinique de synthèse est totalement transparent et génère beaucoup moins de particules fines lors de la combustion (réduction de 23 à 33 %), ainsi que moins de NO_x (réduction de 5 à 37 %) par rapport à son homologue fossile (source: EVOLEN, IFPEN).

Molécules de synthèse

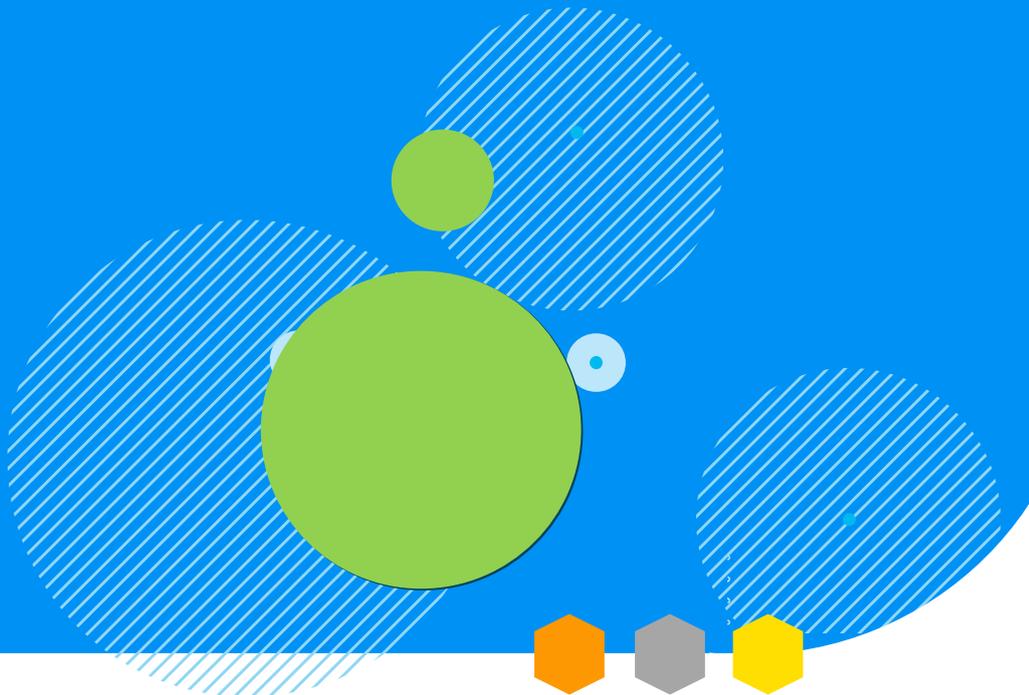
Principes généraux

- **Les L(O)HC - Liquid (Organic) Hydrogen Carrier** - sont une avancée majeure dans le domaine de transport et de stockage de l'hydrogène. Ils réduisent les risques liés à la haute inflammabilité et à la pression de l'hydrogène. Le **processus réversible d'absorption et de désorption de l'hydrogène** par les LO(H)C permet une utilisation efficace et durable de ce vecteur énergétique. L'avenir des L(O)HC est prometteur, cependant la diversité des technologies et des infrastructures nécessaires à leur production et usage est un frein à la standardisation du procédé, et donc à son déploiement. Cette diversité stimule néanmoins l'innovation et la concurrence, contribuant ainsi à l'émergence de solutions plus efficaces et adaptées aux besoins du marché.

En conclusion, ces électro-carburant sont des **relais importants pour la croissance du secteur hydrogène**, qu'il s'agisse de faciliter transport longue distance de l'hydrogène, ou bien d'adresser de nouveaux marchés d'usages pour la décarbonation des carburants existants. Pour le transport longue distance, l'e-ammoniac est le vecteur le mieux placé à ce jour mais la diversité des usages des dérivés de l'hydrogène tels que l'aviation ou l'e-méthanol industriel induit nécessairement la coexistence de plusieurs vecteurs de transport. Cette dernière constituera sans aucun doute un défi et un enjeu majeur pour l'adaptation des infrastructures de transport associées, aux échelles internationale, européenne et nationale.



Méthane



***NB : Cette section est actuellement en cours de construction.
D'autres fiches seront ajoutées prochainement.***

Molécules de synthèse

Méthane

La méthanation permet la conversion de CO₂ et de H₂ 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 Nm³ / jour / m³ 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)

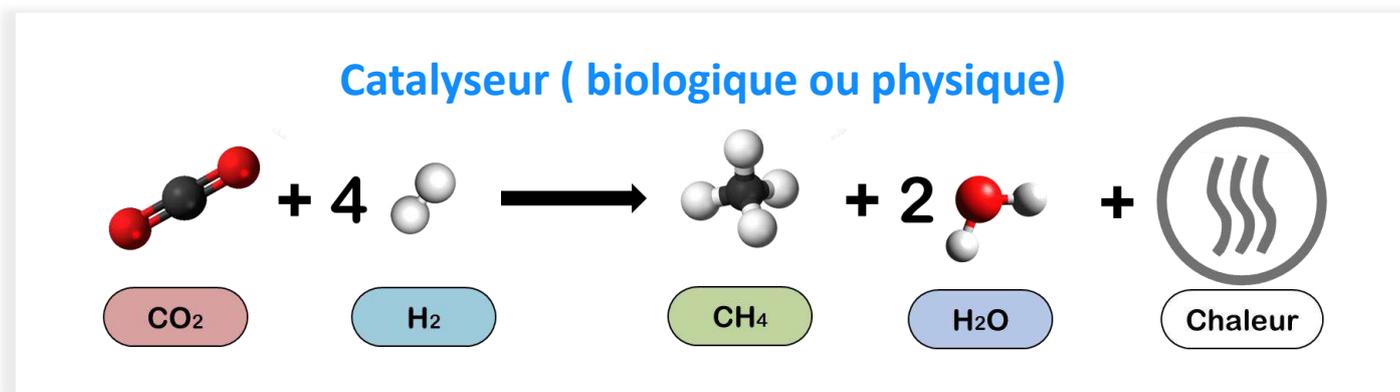
Projets :

Il existe une quinzaine de projets de démonstration (>250 kW_e d'électrolyse), essentiellement en Europe.

Parmi les plus connus, il y a en France les projets Jupiter 1000 (cat., 1MW_e), Methycentre (cat., 250 kW_e) et Hycaunais (biol, 1 MW_e) et à l'étranger le projet Audi (6,3 MW_e)

Maturité :

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



Molécules de synthèse

Méthane Biologique

enos



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 Nm³/h, 50kWe électrolyse), avec Tryfil et Terega
- Occitanie (traitement direct de biogaz de boues de station d'épuration, 80 Nm³/h)
- Plainénergie (traitement du syngaz, 10 Nm³/h)



Source : Enosis

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 CO₂ 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 Nm³ SNG/h)



Source : Electrochaea

Gazfio



Solution : Méthanation Biologique



Utilisation de microorganismes biologiques

Débit Hydrogène consommé : De 4 à 4000 Nm³/h

Débit e-méthane produit : De 1 à 1000 Nm³/h

Projets : SynBios, Italie



Source : Gazfio



Entreprise française



Entreprise Européenne



Usine en France



Membre de France Hydrogène

Molécules de synthèse

Méthane Catalytique



MAN Energy Solutions



Usines Power to Gas clef en main

Solution :

- Fournisseur de systèmes de méthanation catalytique industriels
- Réalisation de projets de Power to Gas complet (capture, Electrolyse PEM, Méthanation, Injection ou Liquéfaction...)
- Solutions 50 MWe, 100 MWe et 200 MWe

Caractéristiques :

- Réacteur catalytique tubulaire à lit fixe refroidi à l'eau/vapeur

Maturité : Commercialisé

Projets :

- E-gas plant Audi 6,3 MWe (325 Nm³/h SNG) à Werlte, Allemagne, en service depuis 2013
- Projet Pau'wer 1,2 MWe à Pau-Lescar, mise en service prévue en 2024

Source : Man Energy & Solutions



Solution:

- Fournisseur de solution de méthanation, à partir de CO₂ et de H₂, ou à partir de syngaz (H₂/CO) issu de gazéification

Caractéristiques :

- Réacteur de plasma catalyse.
- Technologie compacte: faible quantité de catalyseur/ Conditions opératoires: 200°C, Patm / Forte résistance aux polluants (N₂, O₂, H₂O, BTX, COV...) /-40% de LCOE (CAPEX/OPEX) par rapport aux technologies conventionnelles

Maturité:

- Démonstrateur mobile (0,5 kW de CH₄)
- Démonstrateur semi-industriel (30 kW de CH₄)
- Projet unité industrielle en cours (1MW de CH₄)



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 Nm³/h de SNG)
- Store&Go Troia (10 Nm³/h de SNG)
- Methycentre (12,5 Nm³/h de SNG)
- Démonstrateurs WGS et reformage syngas pour la production d'H₂.



Source : Khimod



Entreprise française



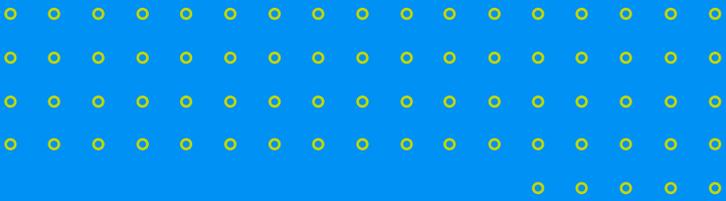
Entreprise Européenne



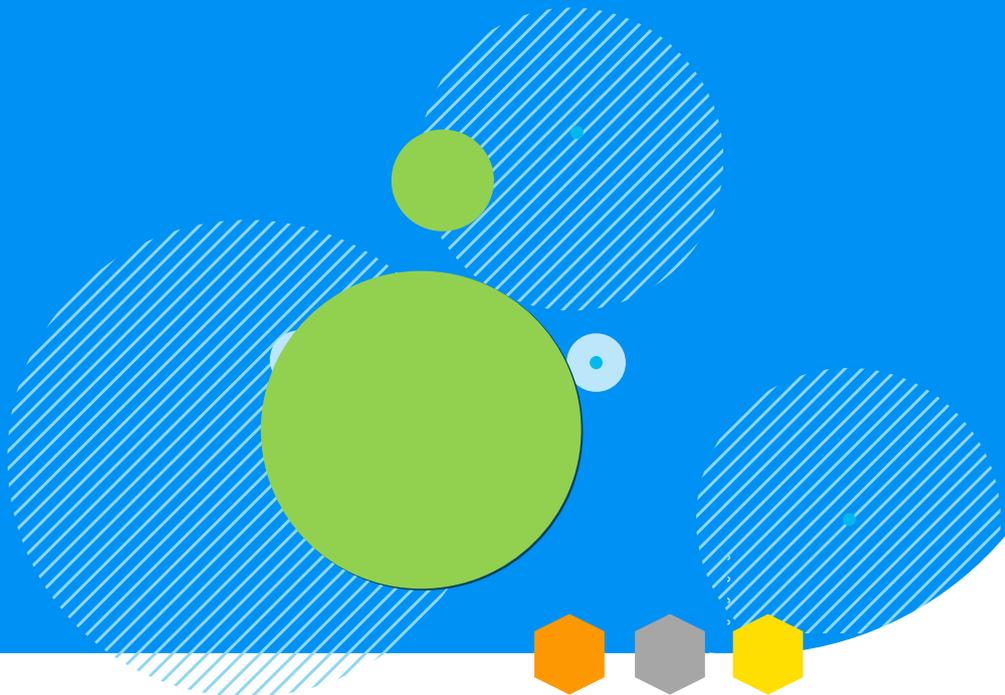
Usine en France



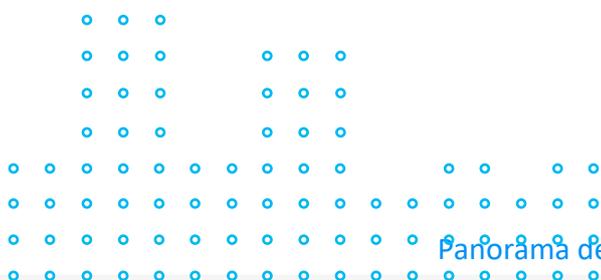
Membre de France Hydrogène



L(O)HC



***NB : Cette section est actuellement en cours de construction.
D'autres fiches seront ajoutées prochainement.***



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 (HSL Technologies)

Densité :

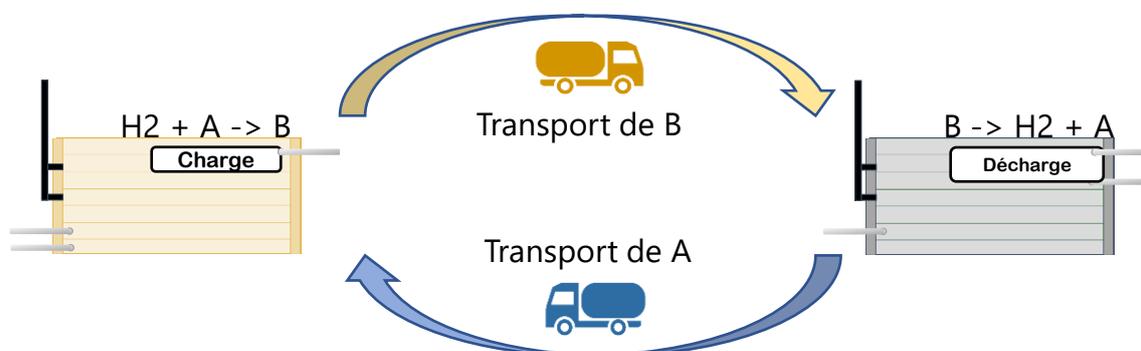
- **LOHC** : A pression atmosphérique à 20 °C : **57 kg/m³**
- **Hydrosil** : A pression atmosphérique à 20 °C : **100 kg/m³**

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'H₂

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 H₂.
- La déshydrogénation (décharge de H₂) génère de la chaleur excédentaire
- Unité d'une capacité d'1 Mt H₂ sur un an sur le port d'Amsterdam
- Hydrosil est liquide à pression et température ambiante
- Non inflammable

Projets :

- [H₂ Gate](#) : (Port d'Amsterdam)
- [Sun-to-X](#) : développement d'un système permettant de convertir l'énergie solaire en HydroSil.



Source : HSL Technologies



Fournisseur de technologie de stockage

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

Caractéristiques :

- 6,2% en masse de H₂.
- L'hydrogénation (charge en H₂) génère de la chaleur excédentaire
- Unité de 5 à 12 tonnes H₂/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

H₂

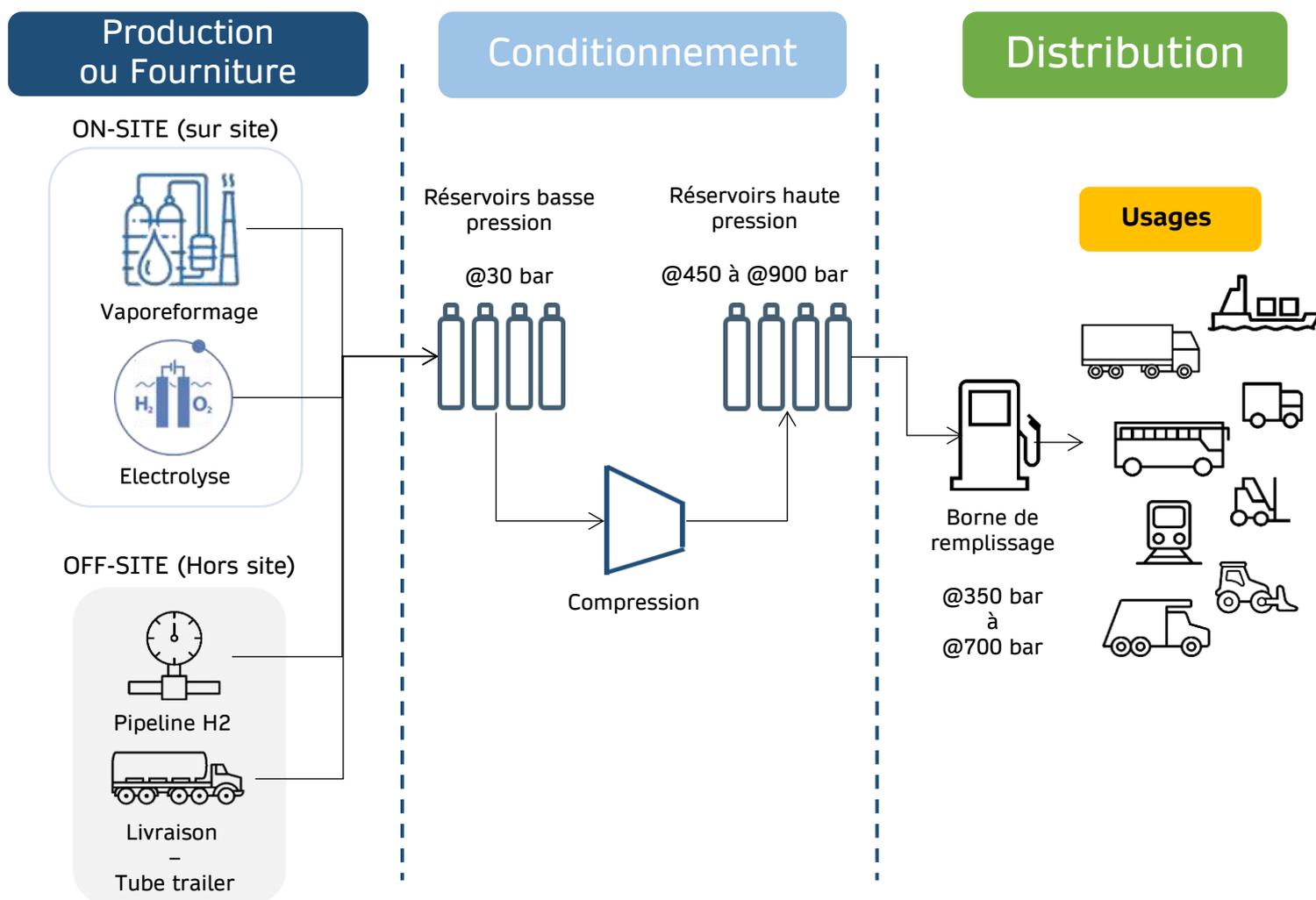


Distribution

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 près de quatre-vingts 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

Il existe divers types de stations de distribution d'hydrogène, adaptées en fonction des marchés ciblés. Les stations de distribution fixes sont les plus connues, cependant, il existe désormais des stations mobiles et des stations déplaçables proposées par plusieurs acteurs pour répondre aux besoins temporaires de marchés particuliers comme l'évènementiel, le dépannage, ou les marchés de l'off-road.

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
Production d'H₂ (si nécessaire)	Equipement de production (si nécessaire)	Electricité
Compression/liquéfaction	Réservoir H₂	Main d'œuvre
Logistique	Compresseur	Location du terrain
Taxes de vente	Pompe et évaporateur	Assurance
Prix de transaction	Refroidissement	Taxe de propriété
	Etudes et ingénierie	
	Génie civil	

Bibliographie utile

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

Stations hydrogène

Acteurs de la filière



Entreprises Européennes



NEUMAN & ESSER



Entreprises Hors Europe



Taylor-Wharton
Equipping the Hydrogen Infrastructure

Stations hydrogène

Les acteurs du secteur (stations fixes)



Station modulaire

Applications : Véhicules légers & lourds

Capacité de remplissage : De 200 kg à 1200 kg/j

Pression adressée : 350 et 700 bar

Maturité : Commercialisé



Source : Air liquide



Station modulaire "Heavy Duty"

Applications : Véhicules lourds

Capacité de remplissage : De 1400 kg à 3800 kg/j

Pression adressée : 350 et 700 bar

Maturité : Commercialisé



Source : Air liquide



HYDROGEN REFUELING SOLUTIONS



Station modulaire

Application :

- Véhicules légers, chariots élévateurs, poids lourds, bus, trains, bateaux, BOM, engins spéciaux...
- Export d'Hydrogène (Hub H2) : Chargement de Tube Trailers / conteneurs mobiles

Capacité de remplissage : De 100 à 2000 kg/jour

Pressions adressées : 350 bar, 350 bar HF, 700 bar

Maturité : Commercialisé



Source : HRS - Hydrogen Refueling Solutions



Driving clean energy forward



McFilling®

Application :

- Distribution aux véhicules : Bus/Cars, VL/VUL, PL, bateaux, engins spéciaux et trains
- Export d'Hydrogène (Hub H2) : Chargement de Tube Trailers / conteneurs mobiles

Capacité de remplissage : De 20 à 2800 kg/j (jusqu'à 8 bornes de distribution)

Pressions adressées : 350 et 700 bar (véhicules) / 200 à 500 bar (export d'H2)

Maturité : Commercialisé



Source : McPhy



Entreprise française



Entreprise Européenne



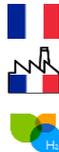
Usine en France



Membre de France Hydrogène

Stations hydrogène

Les acteurs du secteur (stations fixes)



Applications : Poids lourds, bus, BOM, véhicules légers, engins spéciaux, ferroviaire, bateau
Capacité de remplissage : De 300 kg/j à 2t/j et plus
Pression adressée : 350 et 700 bar
Maturité : Commercialisé



Source : Ataway



Station stationnaire HRS

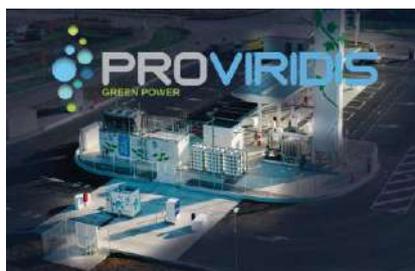
Application : Tout type de véhicules terrestre et maritime
Capacité de remplissage : Jusqu'à 5 t/j
Pression adressée : 350 et 700 bar
Maturité : Commercialisé



Source : Air Products



Applications : Tout type de véhicules terrestres et maritimes avec stations multi énergies (H₂, BioGNV, Electricité)
Capacité de remplissage : De 10 à 200 kg H₂/j selon les stations
Maturité : Commercialisé



Source : Proviris



Entreprise française



Entreprise Européenne



Usine en France



Membre de France Hydrogène

Stations hydrogène

Les acteurs du secteur (stations fixes)

nel



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

Capacité de remplissage : Jusqu'à 120 kg/h

Pression adressée : 350, 700 bar

Maturité : Commercialisé



Source : NEL

TOSHIBA

H2One™ Station Unit

Application : Mobilité

Capacité de remplissage : 40 kg/j

Pression adressée : 700 bar max



Source Toshiba

plug



Applications : Véhicules légers, Chariots élévateurs

Capacité de remplissage : De 10 à 150 kg/j

Pression adressée : 350 bar

Maturité : Commercialisé



Source : Plug



NEUMAN & ESSER



Application: Véhicules légers, poids lourd, bus

Capacité de remplissage : NC

Pression : 350 et 700 bar

Maturité : Commercialisé



Source : Neuman & Esser

Stations hydrogène

Les acteurs du secteur (stations fixes)



Horizon de commercialisation : 2022



Source : Hynion



Application : Poids lourds, bus, véhicules légers
Capacité de remplissage : Selon les besoins
Pression adressée : 350, 700 bar



Source : H2B2



HRS GENO

Application : Poids lourds, bus, véhicules légers et engins spéciaux
Capacité de remplissage : > 3000 kg/j
Pression adressée : 350 et 700 bar
Maturité : Commercialisé



Source : Haskel



Applications : Tout type de véhicules terrestres, ferroviaires, et maritimes.
Capacité de remplissage :
• Station compact/Modulaire: jusqu'à 1760 kg/jour
• Station grande capacité: jusqu'à 5220 kg/jour
Pression adressée : 350 et 700 bar
Maturité : Commercialisé



Source : Calvera



Entreprise française



Entreprise Européenne



Usine en France



Membre de France Hydrogène

Stations hydrogène

Les acteurs du secteur (stations fixes)



Application : Mobilité terrestre (Véhicules légers, poids lourds, bus et ferroviaire)
Capacité de remplissage : De 100 à 2000 kg/j
Pression adressée : 350 et/ou 700 bar - livraisons simultanées
Maturité : Commercialisé



Source : Dover Fueling Solutions



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
Maturité : Commercialisé



Source : Resato



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 bar
Maturité : Commercialisé



Source : MADIC group



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 bar



Source : sera Group



Entreprise française



Entreprise Européenne



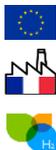
Usine en France



Membre de France Hydrogène

Stations hydrogène

Les acteurs du secteur (stations fixes)



Applications : Tout types de transport: Bus, bennes à Ordures, trains, véhicules de chantiers, poids lourds, véhicules légers, bateaux

Capacité de remplissage : De 620 kg/j à 4 t/j (Modulable selon les besoins Client)

Pression : 350 et/ou 700 bar

Maturité : Commercialisé



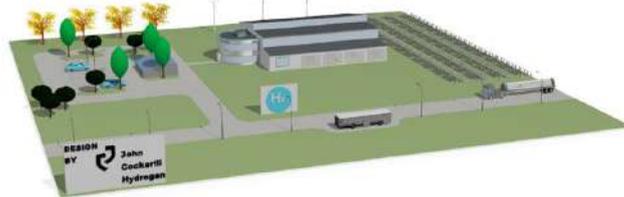
Source : Maximator Hydrogène France



Application: Mobilité

Capacité de remplissage : De 200 à 2000 kg /j

Pression adressée : Jusqu'à 700 bar



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

Maturité : Commercialisé

PDC Machines HRS

Application : VUL, VU, chariots élévateurs

Capacité remplissage : De 1 kg/j à 2000 kg/j

Pression adressée : 350 bar, 700 bar

Maturité : Commercialisé



Source : PDC Machines



Entreprise française



Entreprise Européenne



Usine en France



Membre de France Hydrogène

Stations hydrogène

Les acteurs du secteur (stations fixes)



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



Source : Chart Industries



Applications: Mobilité lourde
Stockage d'hydrogène liquide (de 1 t à 5 t)
Capacité de remplissage: De 300 à 4 800 kg/j
Maturité : En développement
Distribution : H2 liquide



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
Distribution : H2 liquide



Source : Linde



Applications: Mobilité lourde, aérospace, maritime
Capacité de remplissage: De 100 à 10 000 kg/j
Maturité : Commercialisé
Distribution : H2 liquide



Source : Air Products



Entreprise française



Entreprise Européenne



Usine en France

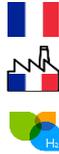


Membre de France Hydrogène

Stations hydrogène

Les acteurs du secteur (stations fixes)

HYVIA
Joint-venture Renault
Group & Plug



Station HYVIA HYWELL

Applications : Véhicules Utilitaires Légers, Véhicule Légers

Capacité de remplissage : 100 kg/j (20+ VUL/jour)

Pression adressée: 350 et 700 bar

Maturité : Commercialisé



Source : HYVIA

energy
GROUPE GCK



Applications : Tout type de véhicules : véhicules légers, chariots élévateurs, poids lourds, bus, cars, trains

Capacité de remplissage : De 20 à 240 kg/j

Pression adressée: 350 et 700 bar

Maturité: Commercialisé



Source : Groupe GCK



Entreprise française



Entreprise Européenne



Usine en France



Membre de France Hydrogène

Stations hydrogène

Les acteurs du secteur (stations déplaçables/mobiles)



Station mobile

Applications : Événementiel

Capacité de remplissage : 10 kg/j

Pression adressée: 350 bar, 700 bar

Station déplaçable

Applications : Mobilité légère, mobilité lourde

Capacité de remplissage : 200 kg/j

Pression adressée: 350 bar, 700 bar

Station – Système conteneurisé

Applications : Mobilité légère, mobilité lourde

Capacité de remplissage : 80 kg/j

Pression adressée: 700 bar

Maturité : Commercialisé



Source : groupe GCK



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

Maturité : Commercialisé



Source : Air Products



Applications : Poids lourds, bus, BOM, véhicules légers, engins spéciaux, ferroviaire, bateau

Capacité de remplissage : Jusqu'à 150 kg/j

Pression adressée : 350 et 700 bar

Maturité : Commercialisé



Source : Ataway



PRF
GÁS, TECNOLOGIA E CONSTRUÇÃO, SA

PRF Solution

Station portable

Capacité de remplissage : NC

Pression : NC



Source : PRF Solution

Stations hydrogène

Les acteurs du secteur (stations déplaçables/mobiles)



Station-mobile

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

Capacité de remplissage : 360 kg/j

Pression : 350 bar

Maturité : Commercialisé



Source : Hexagon Purus & Wystrach



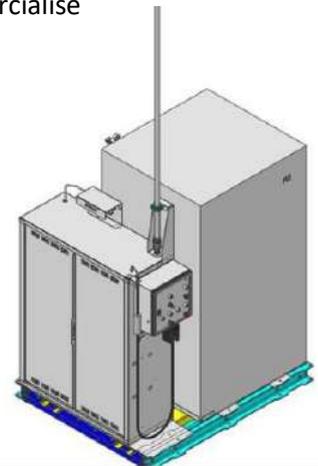
Station déplaçable

Applications : Véhicules utilitaires

Capacité de remplissage : Jusqu'à 2 kg/j

Pression adressée : 300 bar, 350 bar

Maturité : Commercialisé



Source : ROTH2

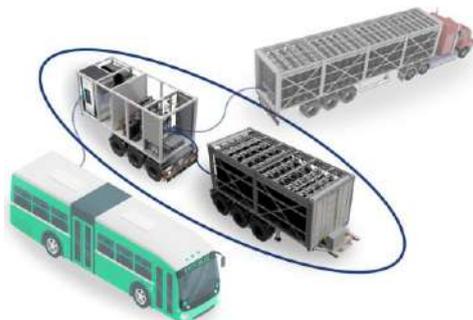


Applications : Tout type de véhicules terrestres, ferroviaires, et maritimes.

Capacité de remplissage : Jusqu'à 400 kg/jour

Pression adressée : 350 bar

Maturité : Commercialisé



Source : Calvera



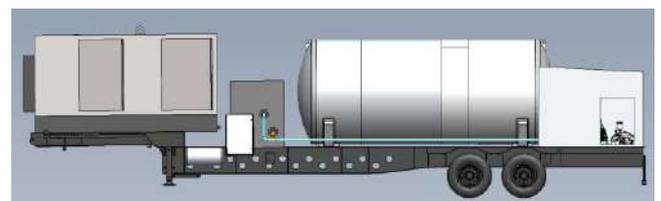
Mobile Hydrogen Refueler (MHR)

Applications : Tous type de véhicules terrestres.

Capacité de remplissage : 1000 kg/j

Pression adressée : 350 et 700 bar

Maturité : En développement



Source : Air Water/ M1 ENGINEERING

Stations hydrogène

Les acteurs du secteur (stations déplaçables/mobiles)



Taylor-Wharton
Equipping the Hydrogen Infrastructure

Applications : Tous type de véhicules terrestres.

Capacité de remplissage : 1004 kg/j

Pression adressée : 350 et 700 bar

Maturité : Commercialisé



Source : Air Water/ Taylor-Wharton



Taylor-Wharton
Equipping the Hydrogen Infrastructure

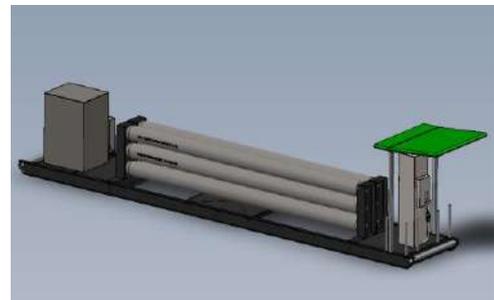
Skid Refueler

Applications : Tous type de véhicules terrestres.

Capacité de remplissage : 172 kg/j

Pression adressée : 350 et 700 bar

Maturité : En développement



Source : Air Water/ Taylor-Wharton



HYDROGEN REFUELING SOLUTIONS



Application : Tout type de véhicules : véhicules légers, chariots élévateurs, poids lourds, bus, trains, bateaux, BOM, engins spéciaux

Capacité de remplissage : 14 à 80 kg/heure

Pression adressée : 350 bar, 700 bar

Maturité : Commercialisé



Source : HRS - Hydrogen Refueling Solutions

Usages

H₂



Sommaire



Usages

Piles à combustible

- Principes généraux
- PEM

136

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

145

Applications portuaires

- Equipements portuaires
- Equipements flottants

176

Aéronautique

- Avions et taxis volants
- Drones

185

Ferroviaire

189

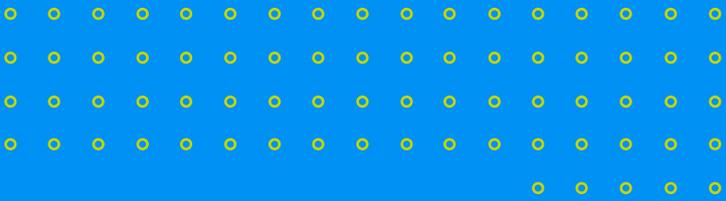
Engins spéciaux

191

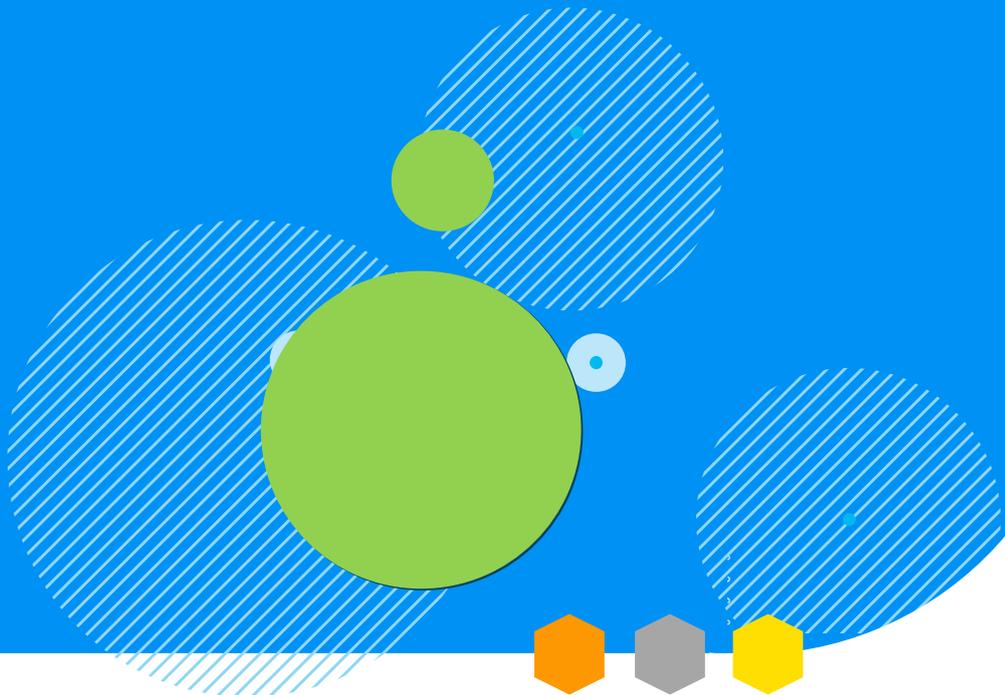
Usages stationnaires

- Système de chauffage
- Flexibilité des énergies
- Groupe électrogène

200



Piles à combustible

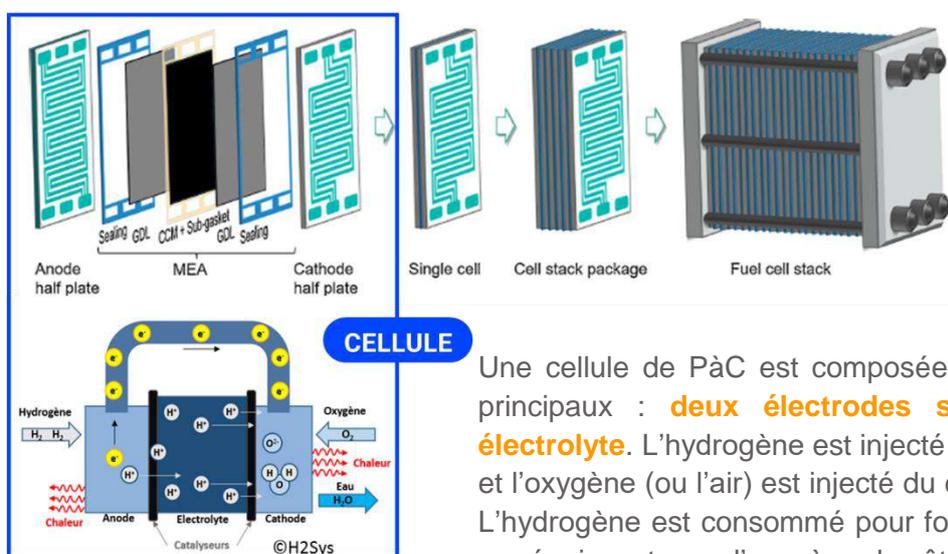


Piles à combustible

Principes généraux

Une pile à combustible (PàC) est **un convertisseur d'énergie chimique contenue dans l'hydrogène en énergie électrique et thermique**. Une PàC est constituée d'un assemblage de cellules électrochimiques, d'où l'appellation « pile ».

Architecture d'une pile à combustible

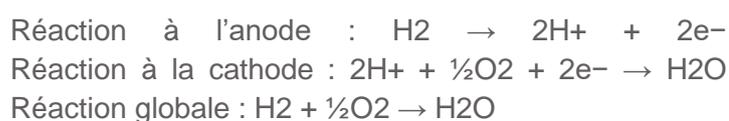


Une cellule de PàC est composée de trois éléments principaux : **deux électrodes séparées par un électrolyte**. L'hydrogène est injecté du côté de l'anode et l'oxygène (ou l'air) est injecté du côté de la cathode. L'hydrogène est consommé pour former de l'eau pure en réagissant avec l'oxygène du côté de la cathode.

Sources: H2Sys
Journal of Manufacturing Processes 60 (2020)
366–383

MEA: Membrane Electrode Assembly
GDL: Gas Diffusion Layers
CCM: Catalyst coated membrane

Dans la technologie principale de PàC (PEM, voir ci-après), les réactions mises en jeu sont les suivantes :

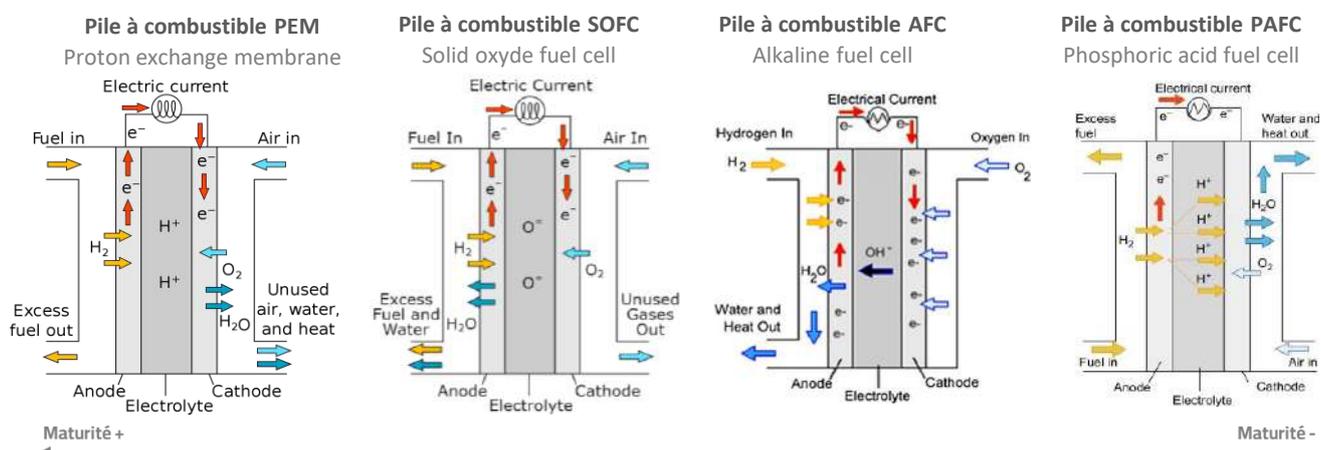


Il existe **4 principales technologies de pile à combustible**, chacune étant caractérisée par l'électrolyte mis en jeu :

- **Proton exchange membrane (PEM)**
- **Solid oxide fuel cell (SOFC)**
- **Alkaline fuel cell (AFC)**
- **Phosphoric acid fuel cell (PAFC)**

Piles à combustible

Principes généraux



Source : AFHYPAC Mémento de l'Hydrogène FICHE 5.2.3

Les piles à combustibles offrent une gamme diversifiée de technologies adaptées à une variété d'applications (transports, systèmes de cogénération, applications stationnaires...). Chaque type de pile à combustible présente des spécificités qui le rend idéal pour répondre à des besoins particuliers.

La pile à **membrane échangeuse de protons (PEM)** domine le marché actuel du fait de sa **maturité** et de sa **capacité de fonctionner** de manière fiable dans une plage de températures variée allant des basses aux hautes températures. Toutefois, l'utilisation du platine entraîne un coût légèrement supérieur, comparé aux autres technologies.

Il est également essentiel de noter que le **rendement** d'une PàC PEM avoisine un rendement intéressant de **55% en début de vie** pour légèrement diminuer avec le temps. Cette baisse relative de rendement est principalement due aux arrêts/démarrages et va définir la durée de vie de la pile à combustible. Par exemple, **un bus fonctionnant 15 ans nécessite tout de même un remplacement de la pile au bout de sa demi-vie.**

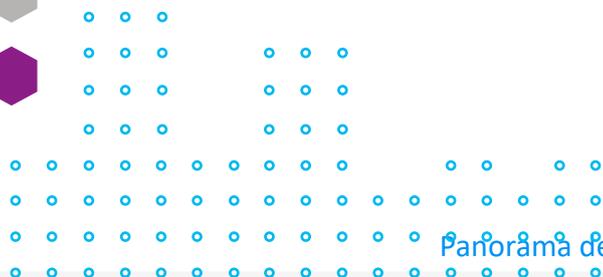
les piles à combustibles se caractérisent par leur **densité énergétique élevée**, ce qui les distingue comme une option prometteuse pour les applications à **forte demande énergétique.**

Puissance & marché

	Puissance	Applications
Petite échelle	10 W à 5 kW	Drone, Vélo
Moyenne échelle	10-150 kW	Mobilité, Stationnaire
Grande échelle	>100 kW	Ferroviaire, Maritime, Stationnaire

Piles à combustible

Acteurs de la filière



Piles à combustible PEM

BALLARD™



Application : Mobilité routière (Camions légers, Camions et bus de moyen tonnage, Camions et autocars de gros tonnage)

Production: Electricité

Technologie : PEM

Puissance : De 45 à 240 kW

Durée de vie stack: >25 000 heures

Maturité: Commercialisé



Source : Ballard

BALLARD™



Application : Mobilité maritime et ferroviaire

Production: Electricité

Technologie : PEM

Puissance : 100 et 200kW

Durée de vie stack: >25 000 heures

Maturité: Commercialisé



Source : Ballard

BALLARD™



Application : Alimentation stationnaire

Production: Electricité

Technologie : PEM

Puissance : De 200 kW à 1,5 MW

Durée de vie stack: >25 000 heures

Maturité: Commercialisé



Source : Ballard



Pile à combustible H2X FO05

Application : Stationnaire, mobilité

Production : Electricité

Technologie : PEM

Puissance : 5kW de puissance

Consommation d'hydrogène: 0,058 kgH₂/kWh

Maturité: Commercialisé



Source H2X Ecosystems



Entreprise française



Entreprise Européenne



Usine en France



Membre de France Hydrogène

Piles à combustible PEM



AIRCELL Rack version

Application : Site isolé, data center, télécoms

Production: Electricité

Technologie : PEM

Puissance : Jusqu'à 3200 kW

Consommation d'hydrogène : 66 g/kWh

Maturité: Commercialisé



Source : H2SYS



AIRCELL

Application : Site isolé, data center, mobilité urbaine, industrie

Production: Electricité

Technologie : PEM

Puissance : De 680 à 3600 kW

Consommation d'hydrogène : 65 g/kWh

Maturité: Commercialisé



Source : H2SYS



FC RACK™ Marine:

Application : Propulsion zéro émission, activités de bord « hotel-load »

Technologie : PEM

Puissance: De 100 kW à quelques MW

Durée de vie stack: De 20 000 à 30 000 heures

Maturité : Commercialisé en 2022



Source : Helion Hydrogen Power



FC RACK™ Rail:

Application: Propulsion de trains hydrogène, d'engins de chantier, d'engins miniers

Technologie : PEM

Puissance : De 100 kW à quelques MW

Durée de vie stack: De 20 000 à 30 000 heures

Maturité: En développement



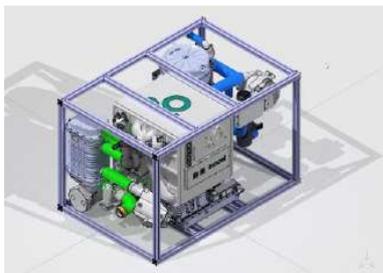
Source : Helion Hydrogen Power

Piles à combustible PEM



INOCEL Z300 – S

Application : Alimentation de secours et de réserve, alimentation résidentielle et télécommunication
Service de régulation du réseau, alimentation Hors Réseau (type chantier de construction), micro-grid.
Technologie : PEM basse température
Puissance : De 200 kW à plusieurs MW containérisés
Durée de vie stack: NC
Maturité : Commercialisé 2024

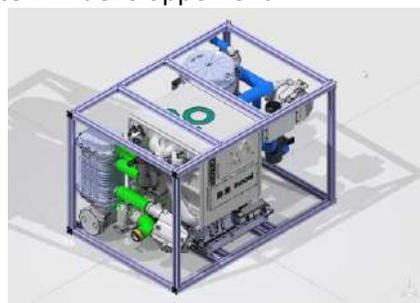


Source : INOCEL



INOCEL Z300 – R

Application : Véhicules de chantier et machines agricoles, bus & camion cargo, Equipement portuaire et ferroviaire, bus urbains et régionaux, trains à hydrogène, Véhicule de services au sol
Technologie : PEM basse température
Puissance : De 200 kW à plusieurs MW
Durée de vie stack: NC
Maturité : En développement

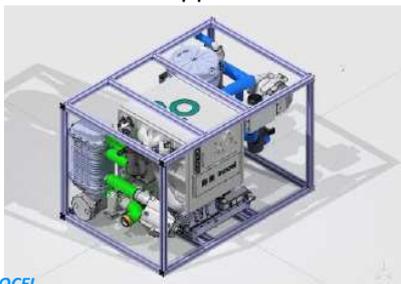


Source : INOCEL



INOCEL Z300 – M

Application : Propulsion principale, propulsion auxiliaire, génération d'énergie à bord, Génération pour ports et infrastructure maritime, soutien aux Operations Offshore et navire Zéro-Emission
Technologie : PEM basse température
Puissance : De 200 kW à plusieurs MW
Durée de vie stack: NC
Maturité : En développement



Source : INOCEL



Gendrive

Application : Chariots élévateurs : préparateurs de commandes, rétractables, frontaux
Technologie : PEM

Numéro de référence	Puissance	Tension	Poids	Capacité réservoir H2
-	kW	V	kg	kg
3210-24FCE	1,5	24	225	0,5
22-48CEA	10	48	1155	1,78
1600-80HCE	15	80	2070	1,78

Maturité : Commercialisé



Source : Plug Power



Entreprise française



Entreprise Européenne



Usine en France



Membre de France Hydrogène

Piles à combustible PEM



Système PàC (FCM50/FCM150)

Application : Mobilité

Production: Electricité

Technologie : PEM

Puissance : De 50 à 150 kW en mono-système
puissances supérieures en multi-systèmes

Maturité: Commercialisé



Source : OPmobility



Stack PàC (NM5evo/NM12/NM12Twin)

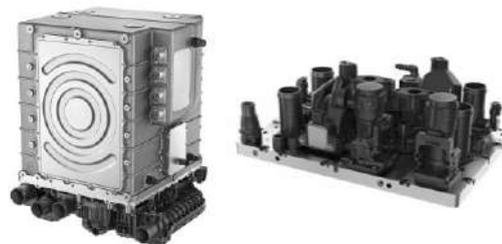
Application : Mobilité et Stationnaire

Production: Electricité

Technologie : PEM

Puissance : De 50 à 205kW

Maturité: Commercialisé



Source : EKPO



EFOY Hydrogen 2.5

Application : Mobilité et applications stationnaires: alimentation de secours pour des sites isolés, data center, télécommunication

Production : Electricité

Technologie : PEM

Puissance : 2,5 kW

Maturité : Commercialisé



Source : SFC Energy



Gamme H2Motive (StackPack 40/75/150/300)

Application : Mobilité

Production: Electricité

Technologie : PEM

Puissance : De 40 à 300 kW

Maturité: Commercialisé



Source : Symbio



Entreprise française



Entreprise Européenne



Usine en France



Membre de France Hydrogène

Piles à combustible PEM



Application : Alimentation stationnaire, mobilité

Production : Electricité

Technologie : PEM

OCS34-10

Puissance : 0,1 kW

Consommation d'hydrogène : 1,08g/kWh

Durée de vie stack : 2000heures

OCS34-25

Puissance : 0,25 kW

Consommation d'hydrogène : 1,08g/kWh

Durée de vie stack : 2000heures

Maturité : Commercialisé



Source : Pragma industries



Application : Alimentation stationnaire, mobilité

Production : Electricité

Technologie : PEM

OCS64-24

Puissance : 0,46 kW

Consommation d'hydrogène : 0,97g/kWh

Durée de vie stack : 2000heures

OCS34-50

Puissance : 0,96 kW

Consommation d'hydrogène : 1g/kWh

Durée de vie stack : 2000heures

Maturité : Commercialisé



Source : Pragma industries



Entreprise française



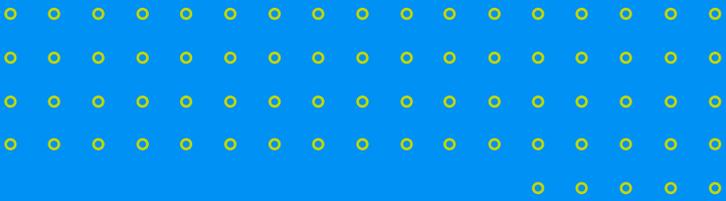
Entreprise Européenne



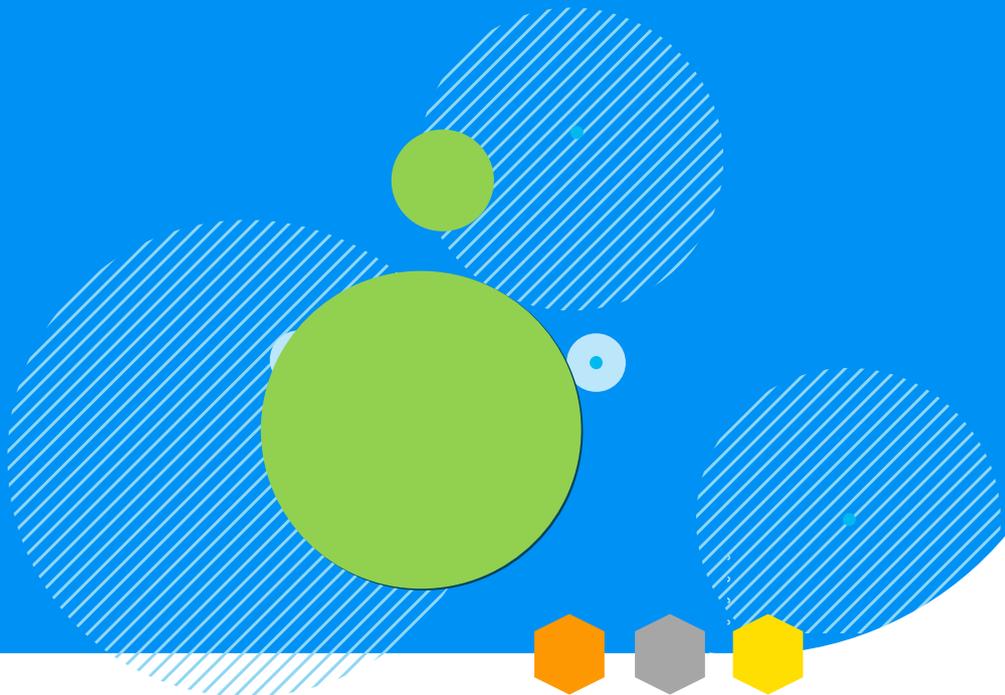
Usine en France



Membre de France Hydrogène



Mobilité



Mobilité

Principes généraux

L'hydrogène peut être utilisé pour différents usages dans le secteur de la mobilité. Aujourd'hui sont privilégiées 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.

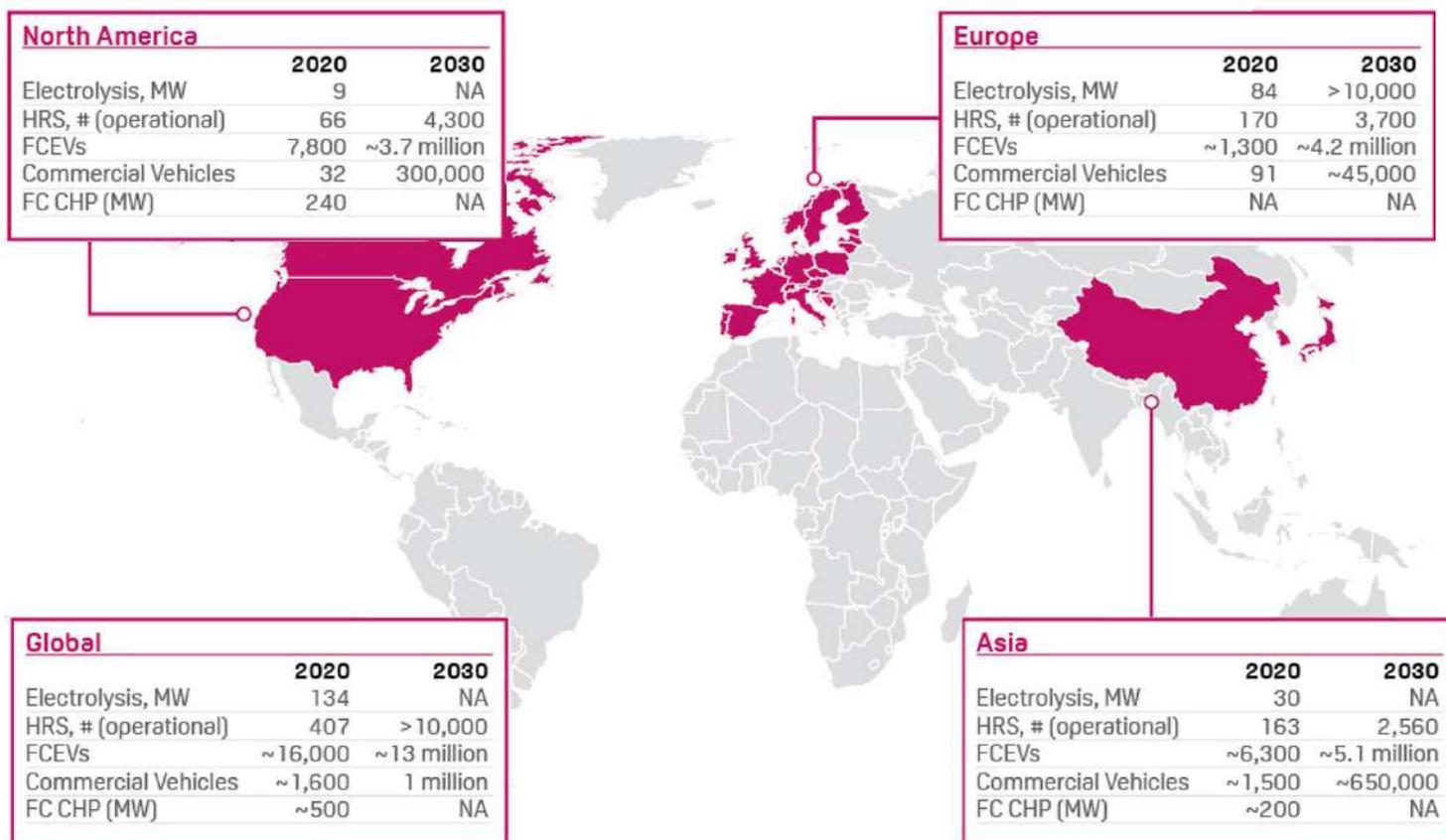
Une autre voie technologique, néanmoins qui n'est pas zéro émission, consiste à utiliser un **moteur à combustion interne** (MCI). Comme un moteur fonctionnant au GNV, l'hydrogène est injecté puis **brûlé** au sein du moteur. Il s'agit alors d'un **véhicule thermique**. En comparaison à une motorisation diesel, les MCI H₂ n'émettent pas de CO₂ 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, H₂ 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 H₂ / 100 km

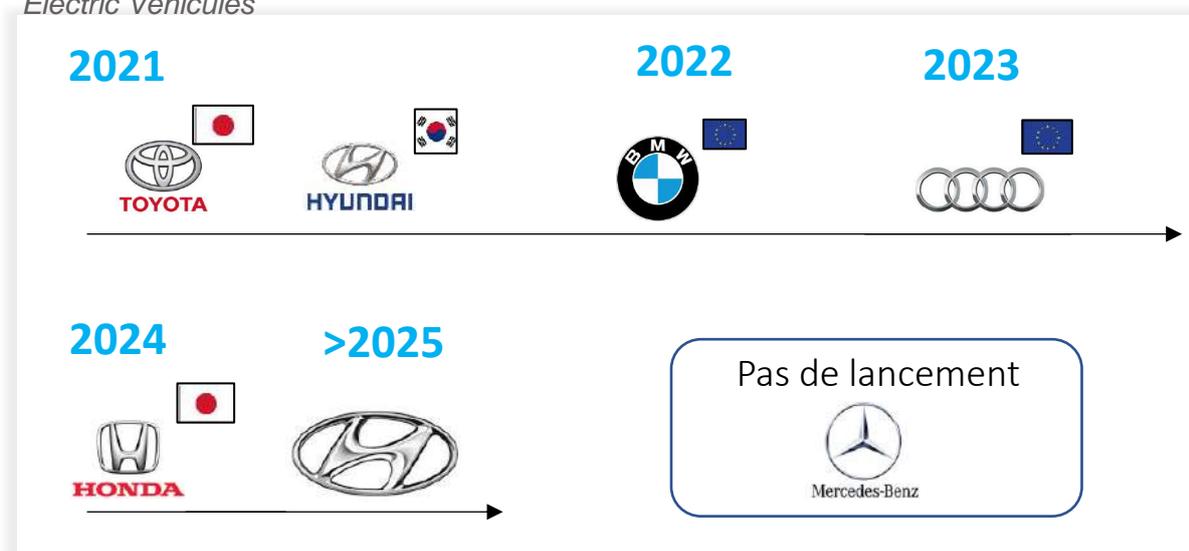
Avantage sur la batterie : Autonomie supérieure et temps de recharge réduit (5 min)

Avantage sur le GNV (Gaz Naturel Véhicule) :

Absence de polluants (CO₂, particules fines) à l'usage, silencieux

Notions de coûts : prévision d'un coût similaire aux hybrides sur la 3^e 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



Mirai

Autonomie : 500 à 650 km

Typologie : Véhicule PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cell)

Date de commercialisation : 2018

2^{ème} génération de Mirai commercialisée en 2021

Prius et Corolla annoncées en 2023

Prius à moteur thermique H₂ 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

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 H₂

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 kgH₂/ 100 km en fonction du type de technologie (range extender, mid power batteries/H₂, 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_x, CO₂, particules fines)

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

Ci-après les informations sur les véhicules proposés par quelques acteurs :

STELLANTIS (France)

ULEMCO (UK) - ultra low emission mileage company limited

HYVIA (France)

OPEL PEUGEOT CITROËN

FIAT RAM

Pas d'information du constructeur

Mercedes-Benz Volkswagen

🔥 Moteur à combustion interne H₂

🟢 Retrofit

-  Moteur à combustion interne H₂
-  Rétrofit

Mobilité

VL-VUL : Véhicules Utilitaires Légers



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 : 6,1m³
Commercialisation : fin 2021



Source : STELLANTIS



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 m³
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 m³
Commercialisation : fin 2021



Source : STELLANTIS



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

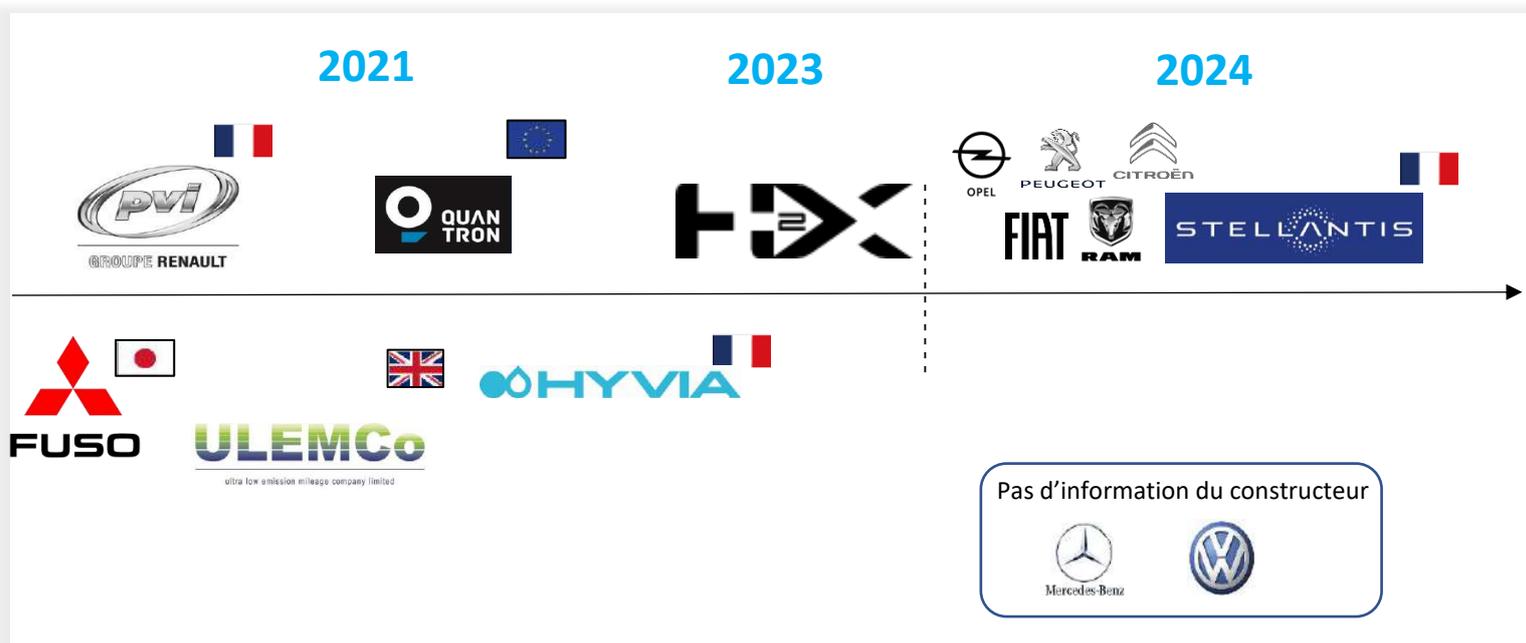
Mobilité

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 H₂ / 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, CO₂, particules fines).





Moteur à combustion interne H₂



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 H₂)

Commercialisation: Depuis 2014

Autre : Toutes marques adaptables, pas de production en série



H2X / Renova

Autonomie réelle : NC

PTAC : 3,5 t

Typologie : Véhicule PàC H₂

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



Entreprise française



Entreprise Européenne



Usine en France



Membre de France Hydrogène



Moteur à combustion interne H₂



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



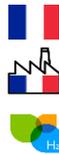
Vision F-Cell

Autonomie estimée : 270 – 300 km

PTAC : 7,5t

Typologie : Véhicule PEMFC

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



Joint-venture Renault Group & Plug

Renault Master Van H2-TECH L3H3+

Autonomie réelle (WLTC) : 405 km

Typologie : Véhicule FCEV, Dual Power batterie rechargeable

Poids total autorisé en charge : 3,9t

Charge utile : 1080 kg

Volume de chargement : 12 m³

Maturité : Commercialisé



Source : HYVIA



Joint-venture Renault Group & Plug

Renault Master Van H2-TECH L2H2 L3H2 L3H3

Autonomie réelle (WLTC) : 320 km

Typologie : Véhicule FCEV, Dual Power batterie rechargeable

Poids total autorisé en charge : 3,5t & 3,9t

Charge utile : Jusqu'à 1380 kg

Volume de chargement : 10,4 ; 12,6 ; 14,4 m³

Maturité : Disponible 2ème trimestre 2024



Source : HYVIA



Entreprise française



Entreprise Européenne



Usine en France



Membre de France Hydrogène

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 H₂/100 km (Bus 12m) & 12 - 15 kg H₂/100 km (Bus 18m) soit 20 - 30 kg H₂/jour

Avantages de la solution hydrogène : grande autonomie et temps de recharge réduit (20 min), absence de polluants (NOx, CO₂, 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 H₂
-  Rétrofit

Mobilité

Bus



Safra Hycity

Puissance moteur électrique: 2x 125 kW
Capacité batterie : 130 kWh
Puissance PàC : 45 kW
Autonomie : 500 km (selon les conditions d'exploitation)
Maturité : 2ème génération, commercialisation 2023, premières livraisons 2024



Source : SAFRA



Van Hool A12FR

Autonomie : 350 à 400 km
Typologie : Véhicule PEMFC
Energie / Puissance : Batterie 24-36 kWh ; PàC 85 kW
Capacité réservoir: 36 kg à 350 bar
Maturité : En attente



Source : Van Hool



Caetano H2.CITY GOLD

Autonomie : 400 km
Typologie : Véhicule PEMFC
Energie / Puissance : Batterie 180 kWh ; PàC H₂ 70 kW
Commercialisation : 2021



Source : CaetanoBus



HyBatt Bus

Autonomie : 300 km
Typologie : Véhicule PàC H₂
Energie / Puissance : Batterie 65 kWh ; PàC 60 kW
Commercialisation : 2022



Source : CLEAN LOGISTICS



Moteur à combustion interne H₂



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 H₂

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 H₂



Rétrofit

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



Entreprise française



Entreprise Européenne



Usine en France



Membre de France Hydrogène

Mobilité

Autocars

Les développements des autocars électriques à hydrogène sont en cours. Les premiers véhicules neufs annoncés pour 2025 pourraient atteindre jusqu'à 1 000 km d'autonomie d'après des annonces récentes de Caetano et TEMSA. En parallèle, les modèles en rétrofit sont pour certains déjà à la route et présentent des autonomies de 300 à 500 km, pour des temps d'avitaillement pouvant atteindre 10 à 15 minutes. Pour ce type d'applications, l'hydrogène est l'énergie la mieux adaptée pour un parcours de 380 km ou plus par jour.

Ces premiers déploiements voient le jour en France sous l'impulsion de Régions et collectivités, ou d'acteurs privés particulièrement moteurs et ambitieux dans leur stratégie de transition énergétique.

Quelques exemples de réalisations et de projets en cours :

- Dans le cadre du projet NOMAD Car Hydrogène, Transdev, la région Normandie et leurs partenaires ont assuré le **rétrofit d'un autocar diesel en autocar électrique fonctionnant à l'hydrogène**. L'opération de rétrofit, 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)**. Le Nomad car est exploité sur la ligne régulière Express Rouen-Evreux.
- Un projet de rétrofit de **15 autocars est également mené par Safra et porté par la région Occitanie** dans le cadre du programme Corridor H₂.
- En Auvergne-Rhône-Alpes, la Région a **passé commande de 16 cars rétrofités à l'hydrogène à GCK, pour 2024** et a conclu un marché pour l'acquisition à l'horizon **2026 de 50 véhicules au total**, pour des transports scolaires et interurbains plus écoresponsables.



Le Nomad Car H2 aux JH2T à Rouen



Autocar à hydrogène rétrofité par GCK @Kilian Debbache

-  Moteur à combustion interne H₂
-  Rétrofit

Mobilité

Autocars



H2-Pack

Puissance moteur électrique: 350 kW
Capacité batterie : 71 kWh
Puissance PàC : 70 kW
Autonomie : 500 km (selon les conditions d'exploitation)
Maturité : Commercialisé (première livraison 2024)



Source : SAFRA



Crossway NF 80

Typologie : PAC 80 kW
Configuration : 3 à 5 réservoirs pour une quantité d'H₂ de 22,2 kg à 38,2kg à 700 bar
Autonomie : De 300 km à 500 km
Maturité : Commercialisé



Source : Groupe GCK



IVECO Crossway NF 150

Typologie : PAC 150 kW
Configuration : 3 à 5 réservoirs pour une quantité d'H₂ de 22,2 kg à 38,2kg à 700 bar
Autonomie : De 300 km à 500 km
Maturité : Commercialisé



Source : Groupe GCK



IVECO Crossway LE 75

Typologie : PAC 75 kW
Configuration : 3 réservoirs pour une quantité d'H₂ de 22,2 kg à 700 bar
Autonomie : 300 km
Maturité : Commercialisé



Source : Groupe GCK



-  Moteur à combustion interne H₂
-  Rétrofit

Mobilité Autocars



IVECO Crossway HICE

Typologie : Combustion H₂

Configuration : 2 réservoirs 700 bar

Autonomie : Définition en cours

Maturité : En cours de développement



Source : Groupe GCK

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 H₂/ 100 km soit 30 à 40 kg H₂ /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, CO₂, 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 H₂
-  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 H₂ – diesel)

Commercialisation : 2019



2019

Source : ULEMCo



Typologie : Véhicule PEMFC

Commercialisation : 2021



Source : HYZON



Entreprise française



Entreprise Européenne



Usine en France



Membre de France Hydrogène

-  Moteur à combustion interne H₂
-  Rétrofit

Mobilité

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



BLUEPOWER

Autonomie : 560 km

Typologie : Véhicule électrique (range extender)



Source : Faun



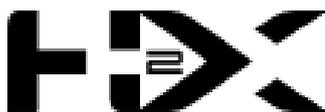
E-Trucks

Autonomie : 400 km

Typologie : Véhicule électrique (range extender)



Source : E-Trucks Europe



H2X Truck

Autonomie : NC

Typologie : Véhicule PàC H₂



Source : H2X



BOM sur châssis RENAULT D-WIDE 26T

Typologie : PAC 80 kW

Configuration : 1 réservoir pour une quantité d'H₂ de 14,8kg à 700 bar

Autonomie : selon usage

Maturité : Commercialisé



Source : Groupe GCK

Mobilité

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



AMPLIROLL sur châssis RENAULT D-WIDE 26T

Typologie : PAC 80 kW

Configuration : De 15 à 22,5 kg d'H₂ à 700 bar

Autonomie : selon usage

Maturité : Commercialisé



Source : Groupe GCK

Mobilité

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

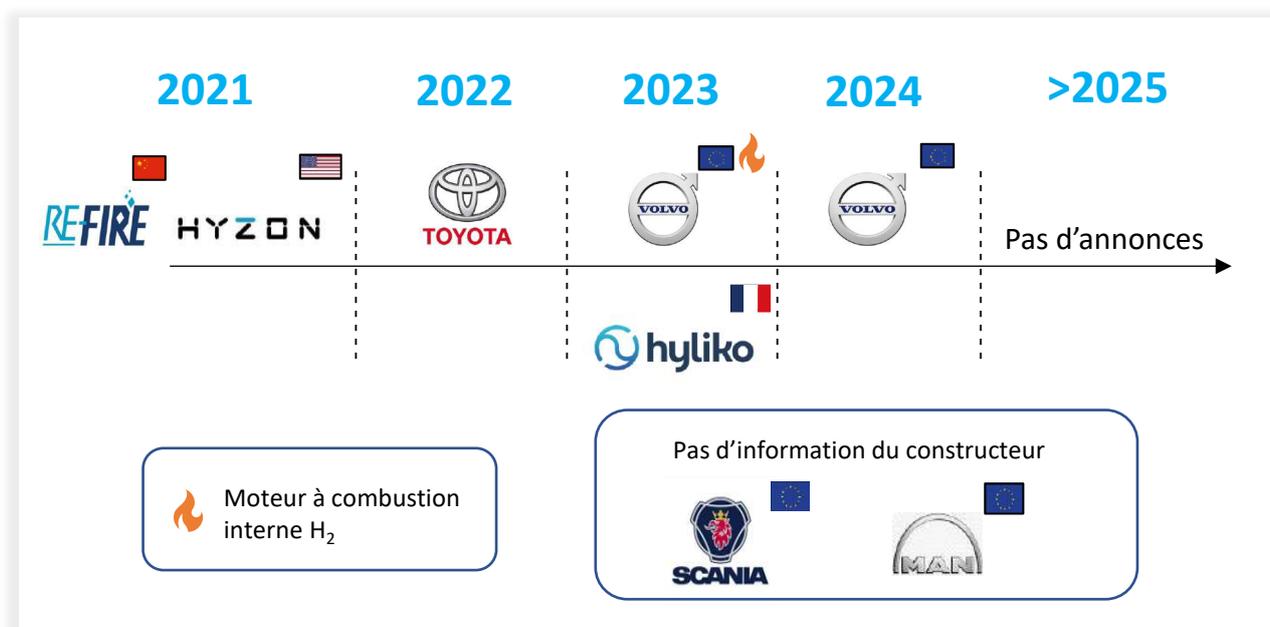
Ce segment regroupe les véhicules routiers destinés au transport de marchandises longue distance sur le réseau national voire européen. Les camions porteurs peuvent permettre de circuler en centre ville pour assurer les livraisons en **logistique du dernier kilomètre** (Livraison des restaurants, supermarché...).

Consommation moyenne : 4-6 kg H₂ / 100 km soit 30 kg H₂ / 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, CO₂, 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 H₂



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 H₂



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 (Shangai) / non disponible sur le marché français



Source : Refire

hyliko



Autonomie : > 600 km

Typologie : véhicule PEMFC

Commercialisation : 2023



Source : Hyliko



VENSYS e-Néo



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



Entreprise française



Entreprise Européenne



Usine en France



Membre de France Hydrogène

Mobilité

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



Porteur sur châssis RENAULT D-WIDE 19T
Typologie : PàC 80 kW
Configuration : Jusqu'à 34 kg d'H₂ à 700 bar
Autonomie : jusqu'à 400 km
Maturité : En cours de développement



Source : Groupe GCK

Mobilité

Poids lourds : Heavy Duty > 32 t

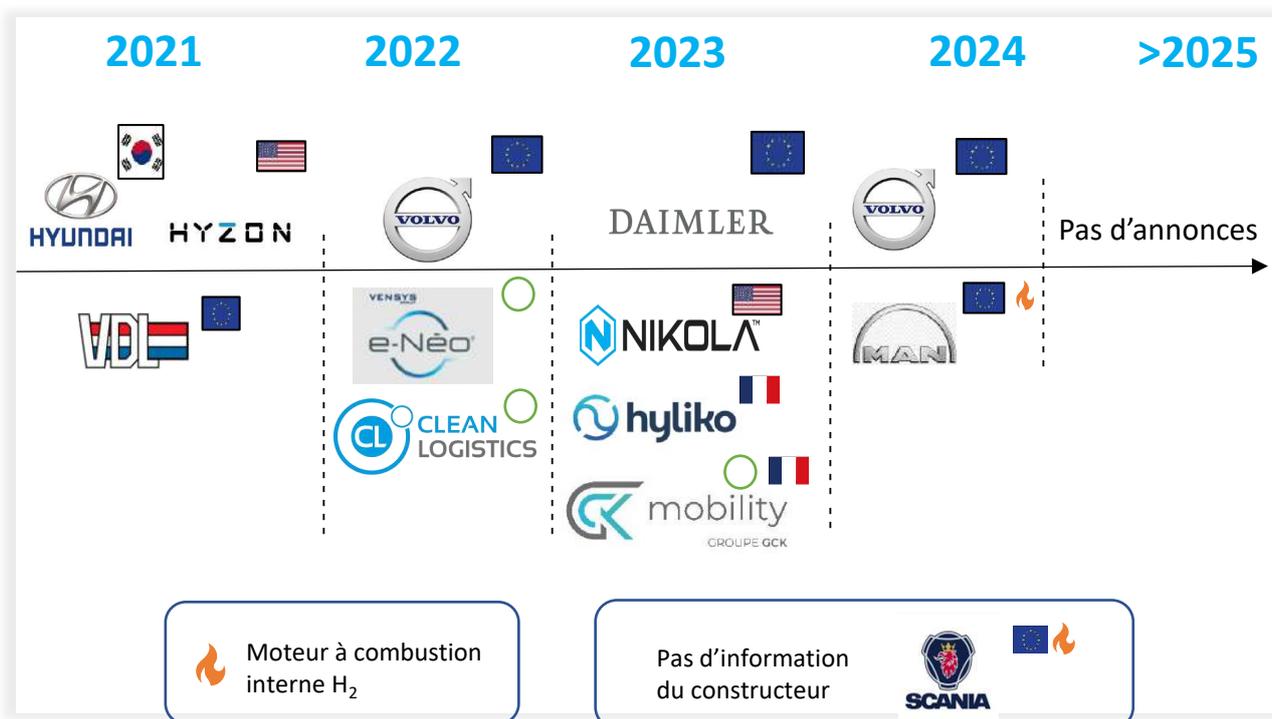
La mobilité lourde est une des pistes prometteuses pour le développement de l'hydrogène. Il permet de décarboner les flottes tout en autorisant des autonomies proches des motorisations diesel. Ce segment assure des livraisons long courrier à l'échelle nationale, internationale ou assure le transport 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 H₂ / 100 km** soit jusqu'à **45 kg H₂ / 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, CO₂, 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 H₂
-  Rétrofit

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 – rétrofit H2

Autonomie : 400 km
Charge utile : 40 t
Typologie : véhicule PEMFC
Commercialisation : 2022



Source : E-Néo



HyMax-450 Puller

Autonomie : 200 - 500 km
Charge utile : NC
Typologie : véhicule PEMFC
Commercialisation : 2021



Source : HYZON



Hymax-250 Puller

Autonomie : 200 - 500 km
Charge utile : NC
Typologie : Véhicule PEMFC
Commercialisation : 2021



Source : HYZON



Moteur à combustion interne H₂



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 H₂



Rétrofit

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 H₂

Commercialisation : 2022



Source : CLEAN LOGISTICS



Plateforme Autonomie : > 600 km

Typologie : véhicule PEMFC

Commercialisation : 2023



Source : hyliko



CMB .TECH



Camion bi-carburant (diesel-hydrogène)

Autonomie H₂ : environ 490 km

Charge utile : 34 t

Typologie : Véhicule thermique

Maturité: Début de production en série en octobre 2022



Source : CMB. tech



TRACTEUR 44T HICE

Typologie Combustion H₂

Configuration : Jusqu'à 57 kg d'H₂ à 700 bar

Autonomie : ~500 km

Maturité : En cours de développement



Source : Groupe GCK



Entreprise française



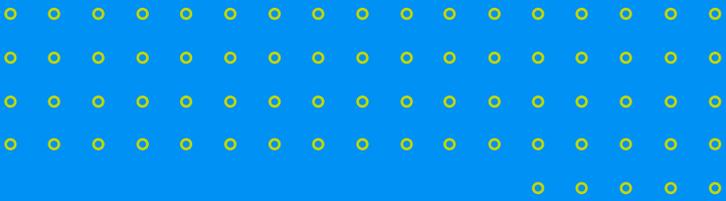
Entreprise Européenne



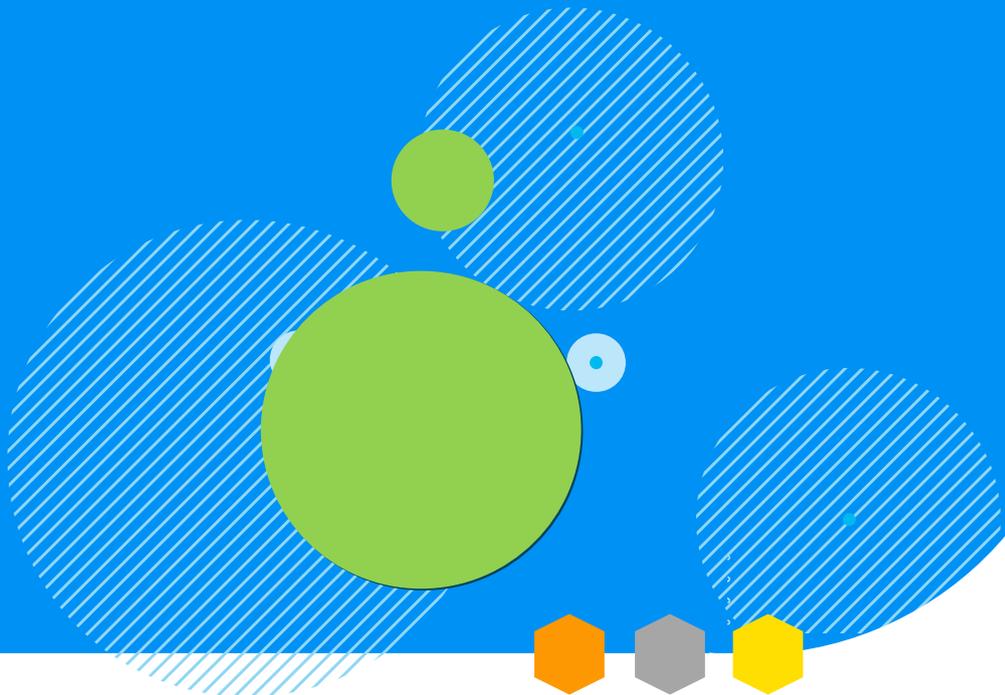
Usine en France



Membre de France Hydrogène



Applications portuaires



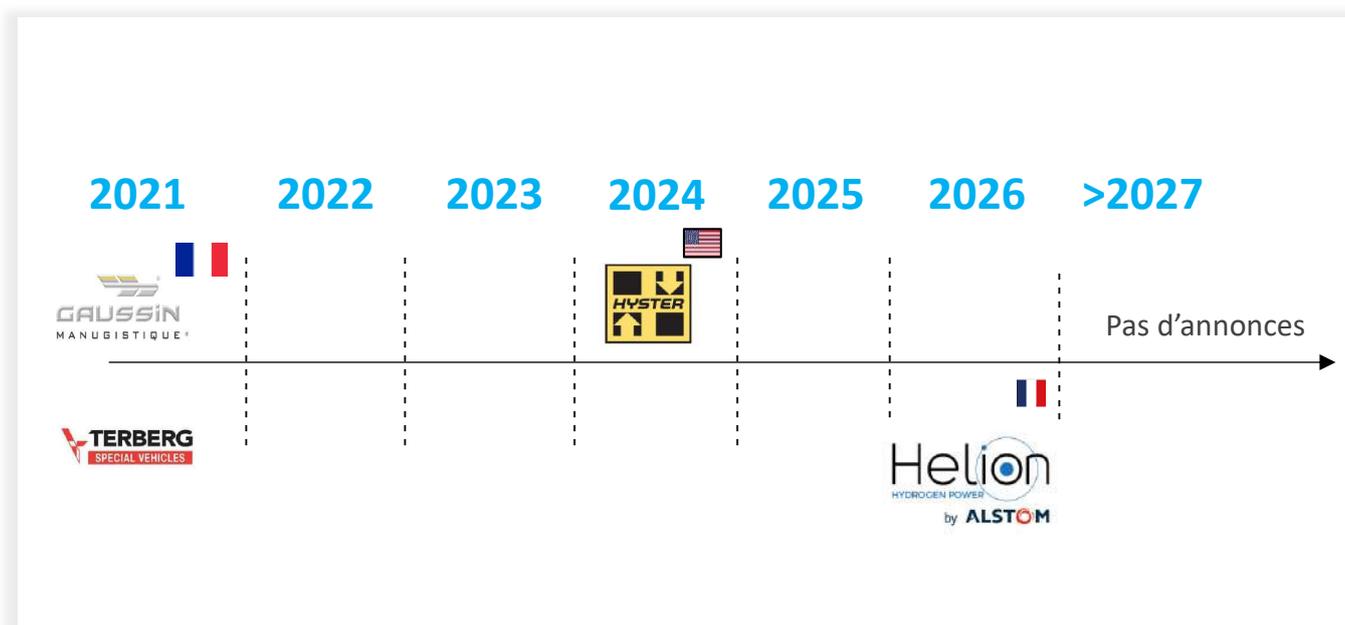
Applications portuaires

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, CO₂, particules fines)





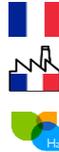
Moteur à combustion interne H₂



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 H₂ : 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

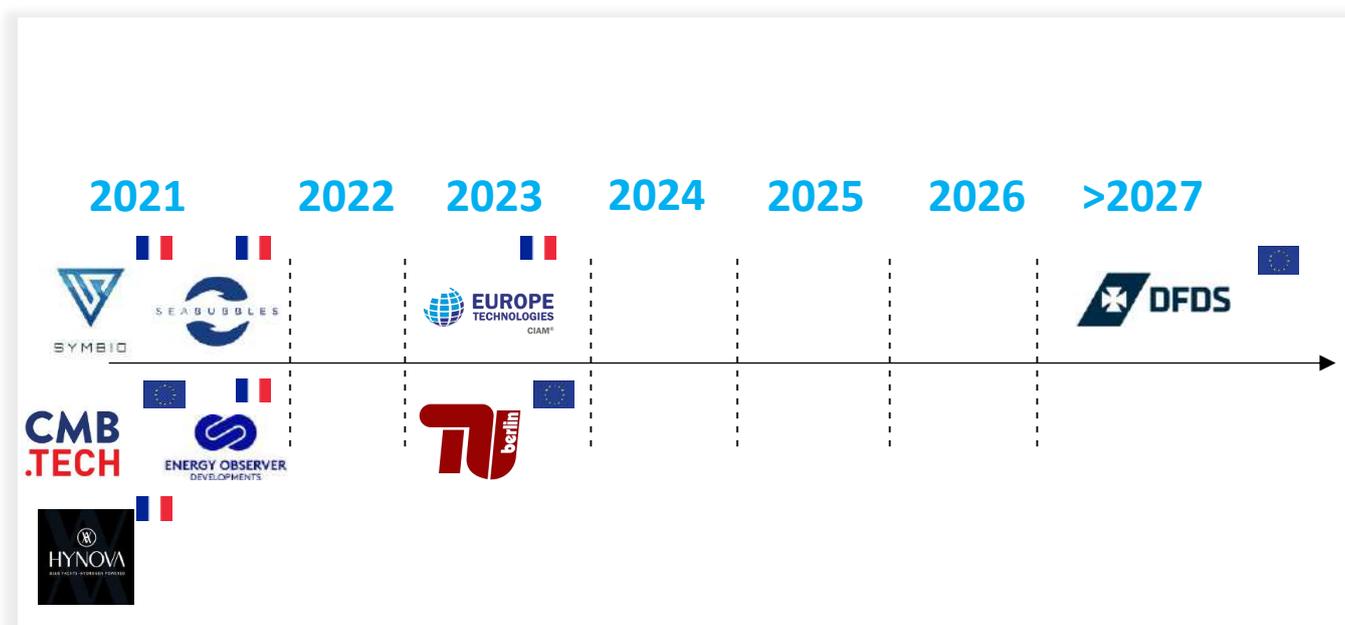
Éléments flottants

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 H₂
-  Rétrofit

Applications portuaires

Éléments flottants



Bubbles

Capacité : 8 personnes
Typologie : Véhicule PàC H₂
Consommation : > 10 kg/jour
Autonomie : 3h en mode taxi
Maturité : première livraison fin 2021



Source : NC



Navette

Capacité : 24 personnes
Typologie : Véhicule PàC H₂
Consommation : 10 kg/semaine
Autonomie : 3h en mode taxi
Mise en service : 2018



Source : NC



HYLIAS

Capacité : 150 à 200 personnes
Typologie : Véhicule PàC H₂
Consommation : 200 kgH₂ / jour
Maturité : Prototype livré en 2023



Source : NC



HYNOVA

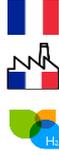
Capacité : 12 personnes
Typologie : Véhicule PàC H₂
Autonomie : 44 miles (70 km) à 8 Nœuds
Maturité : 2021



Source : Hynova

Applications portuaires

Éléments flottants



Station Ship hydrogène

Station de distribution d'hydrogène tout intégré.

Stockage : 90 à 250 kg H₂

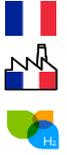
Distribution : 2 dispensers jusqu'à 400 bar

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

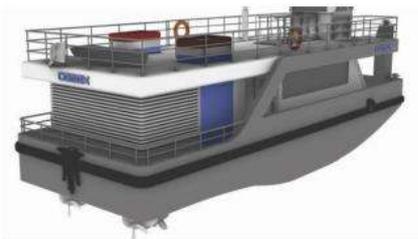


Bateau pousseur

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 H₂

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

Typologie : Véhicule électrique

Autonomie : 48h

Maturité : 2027



Source : DFDS



Zesst

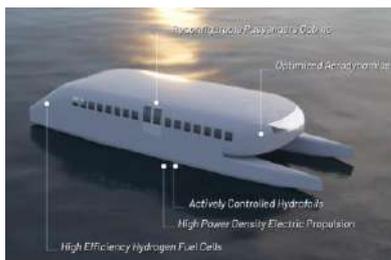
Navette

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



Entreprise française



Entreprise Européenne



Usine en France



Membre de France Hydrogène



Moteur à combustion interne H₂



Retrofit

Applications portuaires

Éléments flottants



Pousseur

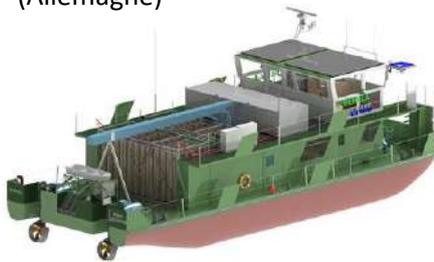
Bateau pousseur ou remorqueur

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



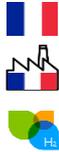
Usine en France



Membre de France Hydrogène

Applications portuaires

Éléments flottants



Démonstrateur bateau à propulsion hydrogène

Capacité : 8 personnes

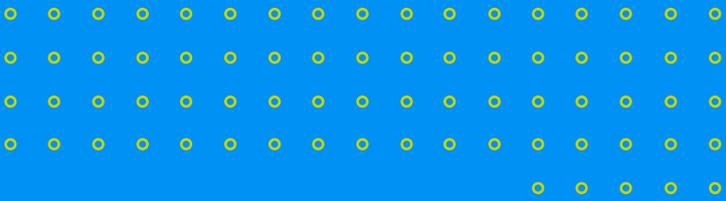
Typologie : Véhicule PàC H₂

Autonomie : 6h en mer

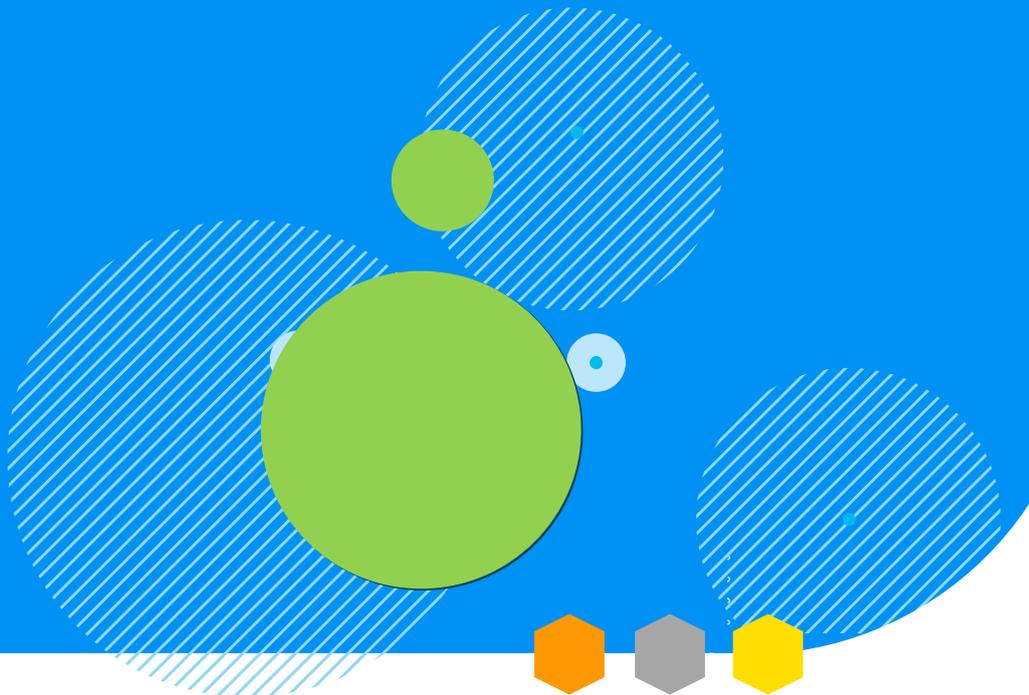
Maturité : prototypes-en essaie



Source : INOCEL



Aéronautique





Moteur à combustion interne H₂



Retrofit

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 bar

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 H₂



Retrofit

Aéronautique

Avion et taxi volant

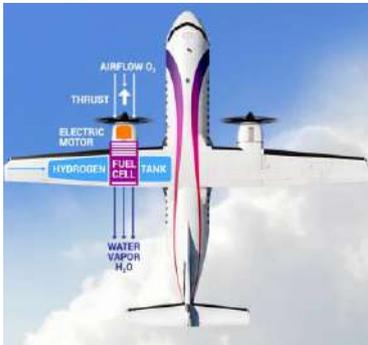


ZeroAvia

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

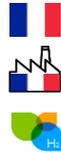


Membre de France Hydrogène

Aéronautique

Drone

H³Dynamics



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



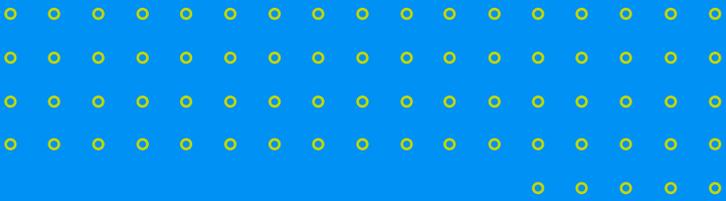
Source : Hylium industries



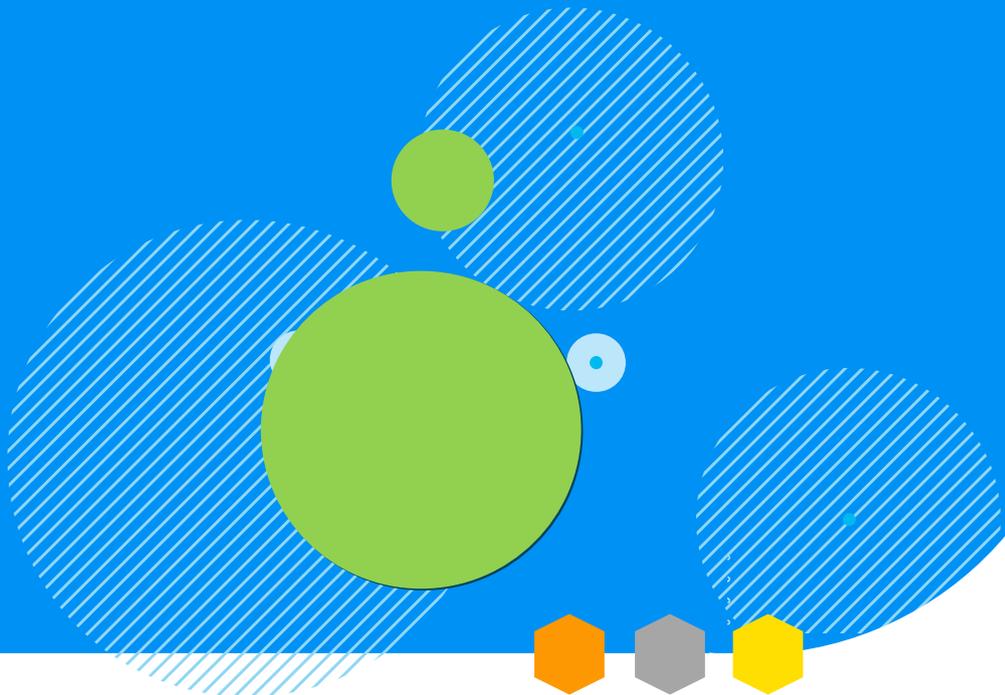
Drone multicoptère à pile à combustible et à batterie.
Hydrogène utilisé : Hydrogène liquide
Masse maximale au décollage : 700 grammes
Maturité : Premier test en cours



Source : Hyundai Motor Group



Ferroviaire





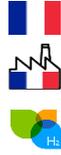
Moteur à combustion interne H₂



Retrofit

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 : Alstom

DB SIEMENS



Deutsche Bahn Energy en partenariat avec Siemens (Mireo H)

Typologie : 100% hydrogène

Maturité : Essais en 2024



Source : 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



Entreprise française



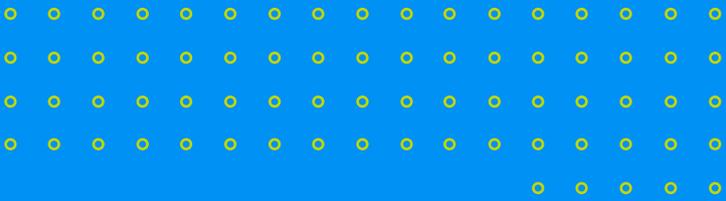
Entreprise Européenne



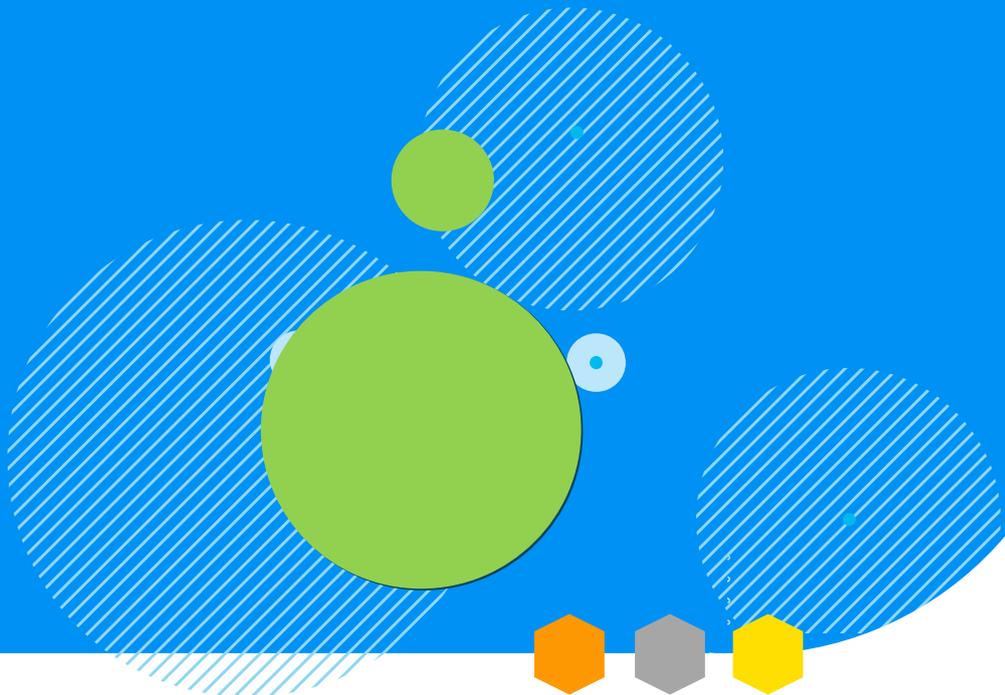
Usine en France



Membre de France Hydrogène



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 H₂ / 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 H₂
-  Rétrofit

Engins spéciaux

Mobilité légère



Green Machine

- Taille :** 1 m³ pour le centre ville
- Typologie :** PAC PEM sans assistance batterie
- Stockage fixe :
104 L à 700 bar → 11 h de fonctionnement
 - H₂-pod à cartouche rechargeable :
52 L à 300 bar → 4 h de fonctionnement
- Poids :** 2325 kg



Source : CMAR



ScootHY

- Un modèle L1e (équivalent 50 cc) et un modèle L3e (équivalent 125 cc).
- Autonomie estimée :** Jusqu'à 60 km
- Capacité de la bouteille :** 6,8 kg d'H₂
- Temps de recharge :** 3min
- Maturité :** Commercialisation en 2025



Source : Pragma industries



Véhicule – Hermione

- Autonomie :** 180 km
- Typologie :** 1 pile 5 kW F005 + 2 stockages T700
- Maturité :** Commercialisé

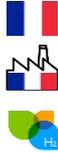


Source H2X Ecosystems

-  Moteur à combustion interne H₂
-  Rétrofit

Engins spéciaux

Mobilité légère



Vélo NEO

Typologie : Pile à combustible (PEMFC) 480W
Hybridation supercondensateur
Puissance moteur : 250W
Autonomie : Jusqu'à 150km
Poids : 30 kg
Quantité d'H₂ stocké : 63g @ 300 bar
Temps de recharge : 2 min
Maturité : commercialisé



Source : Pragma industries



Vélo PELHYCAN

Typologie : Pile à combustible (PEMFC) 480W
Hybridation supercondensateur
Puissance moteur : 250W
Autonomie : Jusqu'à 150km
Charge maximale : 45 kg
Quantité d'H₂ stocké : 63g @ 300 bar
Temps de recharge : 2 min
Maturité : commercialisé



Source : Pragma industries



Vélo Vufhy XL

Typologie : Pile à combustible (PEMFC) 480W
Hybridation supercondensateur
Puissance moteur : 250W
Autonomie : Jusqu'à 75 km
Charge utile : 150 kg
Quantité d'H₂ stocké : 63g @ 300 bar
Temps de recharge : 2 min
Maturité : commercialisé



Source : Pragma industries



Vélo Vufhy M

Typologie : Pile à combustible (PEMFC) 480W
Hybridation supercondensateur
Puissance moteur : 250W
Autonomie : Jusqu'à 75 km
Charge utile : 100 kg
Quantité d'H₂ stocké : 63g @ 300 bar
Temps de recharge : 2 min
Maturité : commercialisé



Source : Pragma industries

Engins spéciaux



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



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 H₂
-  Rétrofit

Engins spéciaux



INNOVATION DRIVES YOU FORWARD



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



Entreprise française



Entreprise Européenne



Usine en France



Membre de France Hydrogène

-  Moteur à combustion interne H₂
-  Rétrofit

Engins spéciaux



Tracteur Agricole

Typologie: Véhicule à batterie (traction) + PàC (système de relevage)
Commercialisation: estimée à 2022



Source : E-Néo



Dameuse Kässbohrer Pisten Bully 600

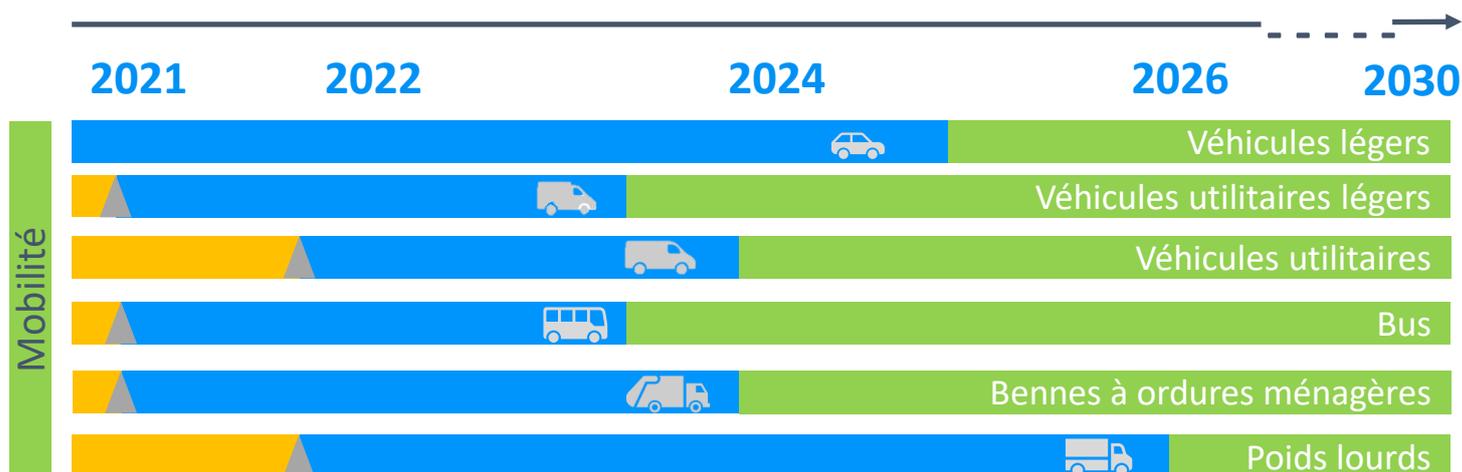
Typologie : 175 kW
Configuration : 3 réservoirs pour une quantité d'H₂ de 50.4kg à 700 bar
Autonomie : 8 heures selon cas d'usage
Maturité : Commercialisé en janvier 2023

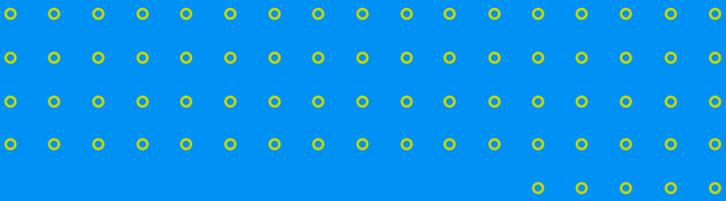


Source : Groupe GCK

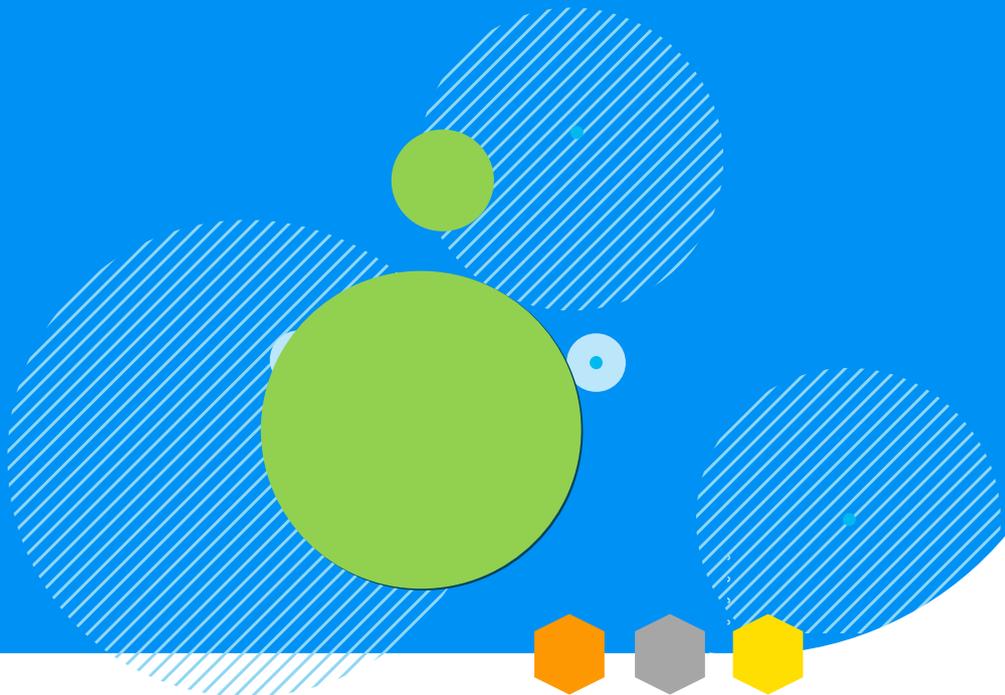
Synthèse sur la mobilité

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 : Principalement, l'hydrogène est employé comme combustible dans une **chaudière (brûleur)**, afin de répondre aux besoins en chauffage et à la production d'eau chaude sanitaire. Toutefois, il existe également d'autres alternatives de génération combinée de chaleur et d'électricité, telles que **les piles à combustible** et **les moteurs à combustion interne**. Dans le cas des systèmes pile à combustible et selon les solutions, l'alimentation peut se faire directement via de l'H₂ 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.
- 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'utilisateur, 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 H₂, ainsi que les solutions d'électrolyse locale pour **l'hybridation et la décarbonation des combustions dans l'industrie**.



Source: Sylfen

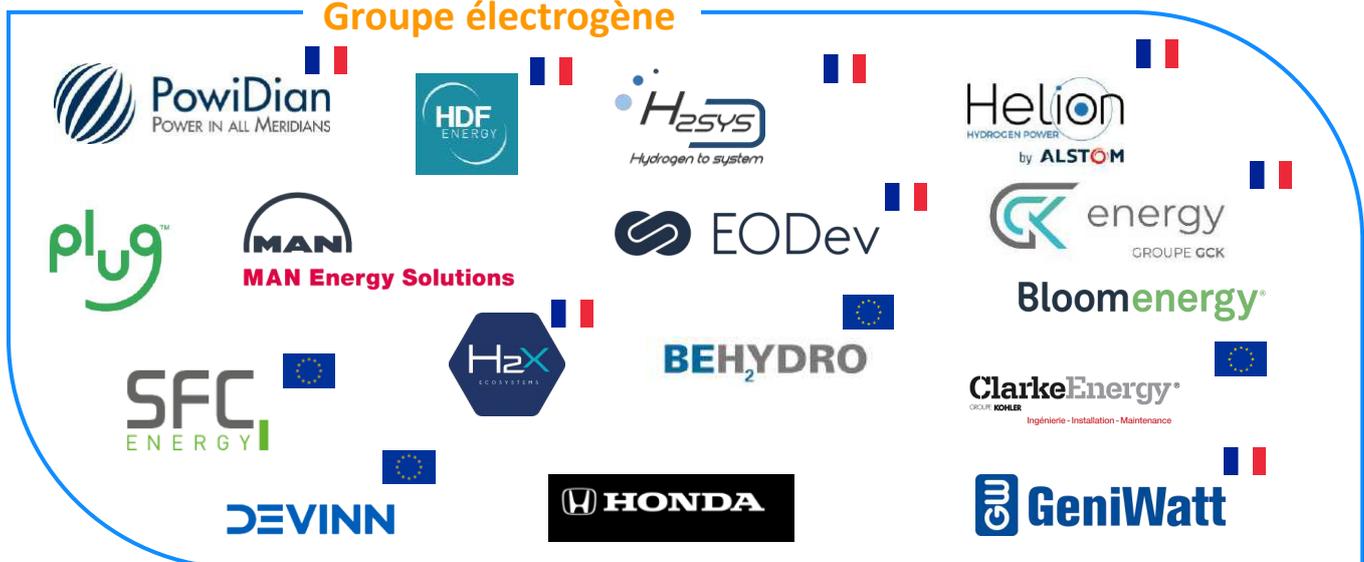
Usages stationnaires

Acteurs de la filière

Système de chauffage



Groupe électrogène



Flexibilité des énergies



-  Moteur à combustion interne H₂
-  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 Chappée

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 H₂
-  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 Thermea



Eco-générateurs De Dietrich

Une gamme fonctionne de **0 à 40% H₂**

Gamme complémentaire fonctionne à **100% H₂**

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 Thermea



Agenitor H₂

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



H₂ydroGEM

Applications : Habitat

Fonction : Chaleur

Puissance fournie : Max 5,36 kW

Maturité : En développement



Source : GIACOMINI



Moteur à combustion interne H₂



Rétrofit

Usages stationnaires Groupe électrogène



MobHyl Power S4, M30, M110

Applications : Site isolé, évènementiel, chantier de construction, télécom

Production : Electricité

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 : Electricité

Consommation d'hydrogène : Hydrogène gazeux - pression supérieure à 10 bar

Puissance : De 100 kW à quelques MW

Autonomie : Dépend de la quantité d'hydrogène stockée

Maturité : Commercialisé en 2021



Source : Helion Hydrogen Power



Application : Site isolé, évènementiel, chantier, alimentation de secours

Production : Electricité

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 : Electricité

Puissance installation : 1MW

Maturité : Essai en 2023



Source : CPG Click Petroleo e gas



Entreprise française



Entreprise Européenne



Usine en France



Membre de France Hydrogène

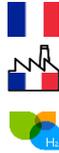


Moteur à combustion interne H₂



Retrofit

Usages stationnaires Groupe électrogène



Application : Alimentation de secours, site isolé , événementiel, chantier
Production : Electricité
Autonomie : Réservoir dimensionné selon le besoin
H2X G005 – G025
Puissance : De 5 kW à 25 kW
Consommation d'hydrogène : 58 g/kWh
Maturité : Commercialisé
H2X G350
Puissance : De 350 kW à 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 : Electricité + 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 : Electricité
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



Moteur à combustion interne H₂

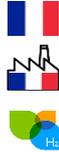


Rétrofit

Usages stationnaires

Groupe électrogène

 EODDev



REXH2

Application : Propulsion ou vie à bord pour applications maritimes et fluviales
Production : Electricité + 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 : Electricité
Consommation d'hydrogène : 65 g/kWh
Puissance : 110 kVA
Autonomie : Réservoir dimensionné selon le besoin
Maturité : Commercialisé



Source : EODDev

 Plug



GenSure HP

Application : Secours/Back-up, Prime power
Production : Electricité
Consommation d'hydrogène : De 60 à 67 g/kWh
Puissance installation : 1,5 MW
Autonomie : Réservoir dimensionné selon le besoin
Maturité : Commercialisé



Source : Plug

 Plug



GenSure LP

Application : Sites de télécommunications, passages à niveau ferroviaires
Production : Electricité
Consommation d'hydrogène : De 60 à 67 g/kWh
Puissance installation : 200 W, 1100 W et 2500 W
Autonomie : Réservoir dimensionné selon le besoin
Maturité : Commercialisé



Source : Plug



Entreprise française



Entreprise Européenne



Usine en France



Membre de France Hydrogène



Moteur à combustion interne H₂



Retrofit

Usages stationnaires

Groupe électrogène

SFC
ENERGY



H₂Cabinet

Application : Alimentation de secours pour site isolé, data center, télécommunication

Production : Electricité

Puissance nominale : De 2,5 jusqu'à 50 kW

Consommation d'hydrogène (PàC): 0,06 kg/ kWh_{el}

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

Maturité : Commercialisé



Source : SFC ENERGY

SFC
ENERGY



H₂Genset

Application : Alimentation de secours pour les chantiers de construction des routes et entretien des voiries, le secteur événementiel, la protection civile, le BTP et pour la télécommunication

Production : Electricité

Puissance nominale : Jusqu'à 20 kW

Consommation d'hydrogène (PàC): 0,06 kg/ kWh_{el}

Autonomie : 24 h (pour une puissance de 10 kW)

Maturité : En développement (commercialisé en 2024)



Source : SFC ENERGY

MAN

MAN Energy Solutions



Moteurs à gaz compatibles H₂

Applications : Centrales électriques 10 à 200 MW

Production : Electricité

Puissance : De 10 à 20 MW

Blending : Capacité à fonctionner jusqu'à pleine charge avec 25% d'hydrogène en mélange avec le gaz naturel

Maturité : Commercialisé



Source : Man Energy & Solutions



Entreprise française



Entreprise Européenne



Usine en France



Membre de France Hydrogène

-  Moteur à combustion interne H₂
-  Rétrofit

Usages stationnaires

Groupe électrogène



ClarkeEnergy
GROUPE KOHLER

Ingénierie - Installation - Maintenance



JENBACHER INNIO 60% & 100% H₂

Application : Couplé réseau, autoconsommation, îlotage, cogénération

Production : Électricité + Chaleur

Puissance installation :

De 500 kW_e à 900 kW_e (moteur 100 % H₂)

De 250 kW_e à 4,5 MW_e (moteur 60 % H₂)

Fonctionnement : Continu ou en pointe

Consommation d'hydrogène : 75 g/kWh

Maturité : Commercialisé



Source : Clarke Energy



BEH₂DRO



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

Maturité : Commercialisé



Source : BEH₂DRO

energy
GROUPE GCK



GEH2

Applications : Événementiel, Chantier, Recharge de Véhicule électrique, site isolé, alimentation de secours

Production : Electricité

Puissance installation : 110 kVA

Maturité : Commercialisé



Source : Groupe GCK



GeniWatt



H150-ICE

Application : Événementiel, chantier de construction

Production : électricité

Puissance nominale : 156 kW

Consommation d'hydrogène : 80 g/kWh

Autonomie : Réservoir dimensionné selon le besoin

Maturité : Commercialisé



Source : GeniWatt



Entreprise française



Entreprise Européenne



Usine en France



Membre de France Hydrogène



Moteur à combustion interne H₂



Retrofit

Usages stationnaires

Flexibilité des énergies



PowiDian
POWER IN ALL MERIDIANS



Station SAGES

Système hybride qui produit de l'H₂ 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



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 le 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

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



Entreprise française



Entreprise Européenne



Usine en France



Membre de France Hydrogène



Moteur à combustion interne H₂



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

energy

GROUPE GCK



ME3

Type d'application : Stockage d'énergie pour application on ou off-grid, pour les secteurs de l'évènementiel, du BTP, de la recharge de véhicules électriques

Production : Electricité

Puissance installation : De 100 à 200 kVA

Maturité : Commercialisé



Source : Groupe GCK

energy

GROUPE GCK



GEH2

Applications : Evènementiel, Chantier, Recharge de Véhicule électrique, site isolé, alimentation de secours

Production : Electricité

Puissance installation : 110 kVA

Maturité : Commercialisé



Source : Groupe GCK



Entreprise française



Entreprise Européenne



Usine en France



Membre de France Hydrogène

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: De 3 à 35 kW

Maturité: Preuve de concept en cours

Réglementation en cours d'évolution



Source : BDR Therma et BULANE



Electrolyseurs associés aux Chaudières De Dietrich

Ces modèles fonctionnent avec une électrification du gaz

Applications : Habitat collectif, individuel, tertiaire

Fonction: Chauffage et ECS

Puissance: De 3 à 10 MW

Maturité: Preuve de concept en cours

Réglementation en cours d'évolution



Source : BDR Therma et BULANE



LP2H - Local Power To Heat

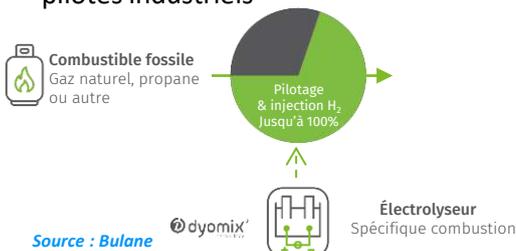
Solution d'électrolyse locale pour l'**hybridation et la décarbonation** des combustions dans l'**industrie**.

% H2 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



Source : Bulane



Brûleur industriel hydrogène

Prémélange et brûleur hydrogène (pur ou mélange) pour procédés industriels Acier, Aluminium, Ciment, Papier, Verre, Industrie Lourde

% H2 dans les combustions : Partiel à 100%

Gamme de puissances électriques : 50 kW - 50 MW

Maturité : commercialisé



Source : Fives

Glossaire

AEM	Technologie d'électrolyse : Anion Exchange Membrane
Bar	Unité de pression : 1 bar = Pression Atmosphérique
Barg	Bar jauge : exprime l'écart à la Pression Atmosphérique normale (utilisation manométrique)
Boil-off	Phénomène d'évaporation d'un liquide cryogénique dû au réchauffement naturel de celui-ci
CO₂	Dioxyde de Carbone
CSR	Combustible solide de récupération
Ft	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
GNV	Gaz Naturel pour Véhicules utilisé comme carburant.
H₂	Dihydrogène, communément appelé hydrogène.
HT	Haute Température
LOHC	Porteurs d'hydrogène liquide organiques : composés organiques pouvant absorber et libérer de l'H ₂ par réactions chimiques
MCI	Moteur à Combustion Interne
NC	Non-Connue
Nm³	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)
NOx	Oxydes d'azote
PAC	Pile à Combustible.
PCI	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
PCS	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
PEM	Proton Exchange Membrane
PEMFC	Proton Exchange Membrane Fuel Cell
PSA	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

PTAC	Poids Total Avec Charge: limite de poids d'un véhicule.
Rétrofit	Technologie qui transforme un(e) ancien(ne) module/motorisation thermique en module/motorisation électrique à batterie ou à PAC.
SMR	Vaporeformage du Méthane (Steam Methane Reforming): solution pour produire de l'hydrogène à partir d'hydrocarbures
SOFC	Pile à Combustible à Oxyde Solide (Solid Oxide Fuel Cell)
t.km	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)
TCO	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.
TRL	« 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.
USD	United States Dollar: monnaie des Etats Unis (\$)
VL	Véhicule Léger: véhicule dont le Poids Total Autorisé en Charge (PTAC) ne dépasse pas 3,5 tonnes
VUL	Véhicule Utilitaire Léger
W	Watt : Unité de mesure de puissance
WGS	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 ($\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2$)
Wh	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

Inès Taoufik et Maxime Marset

solutionsH2@france-hydrogene.org

Cette édition a été réalisée avec le concours de



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



Edition: Septembre 2024 Textes : France Hydrogène
Crédits photos couverture :
Ataway, EODev, McPhy, Safra, Gaussin, Semat
Conception graphique - illustrations : © Cap Interactif agency