

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 natif○ Autres	5
Stockage	<ul style="list-style-type: none">○ Forme gazeuse○ Forme liquide○ Forme solide○ Géologique○ Vecteurs chimiques	46
Transport	<ul style="list-style-type: none">○ Voie routière○ Hydrogénoducs○ Voie maritime	71
Distribution	<ul style="list-style-type: none">○ Stations de recharge	84
Usages	<ul style="list-style-type: none">○ Mobilité VL & PL○ Applications portuaire○ Aéronautique○ Ferroviaire○ Engins spéciaux○ Engins spéciaux○ Production d'énergie connectée au réseau○ Production d'énergie hors réseau○ Conversion du CO₂	93

Production

H₂



Sommaire



Production

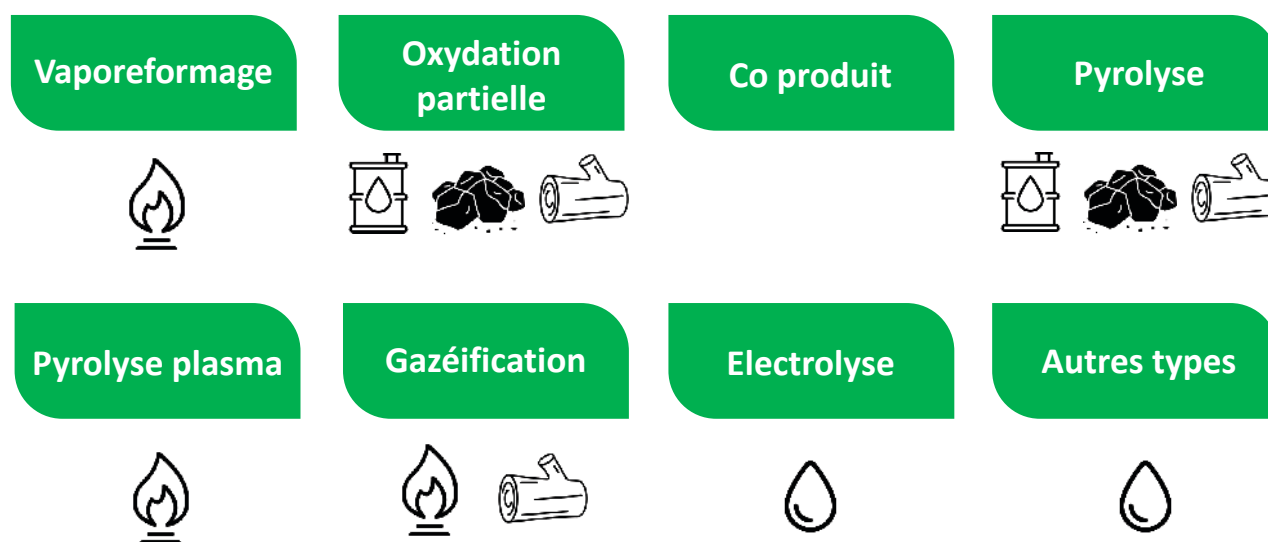
Production : Principes généraux	6
Electrolyse <ul style="list-style-type: none">○ Principes généraux○ PEM○ Alcalin○ AEM○ HT○ Autres types d'électrolyse	8
Hydrogène à partir de biomasse	22
Reformage du méthane	28
Pyrolyse du méthane	37
Hydrogène natif	39
Autres types de production	43

La production

Principes généraux

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

Procédés de production hydrogène



Matières premières



La production

Principes généraux

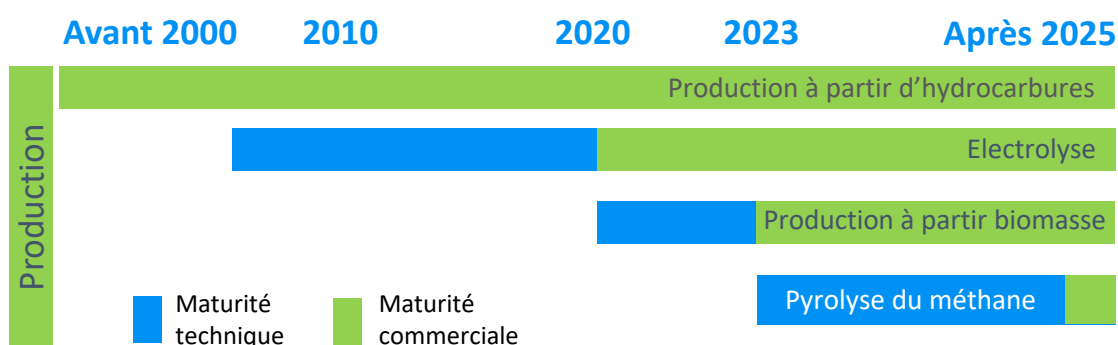
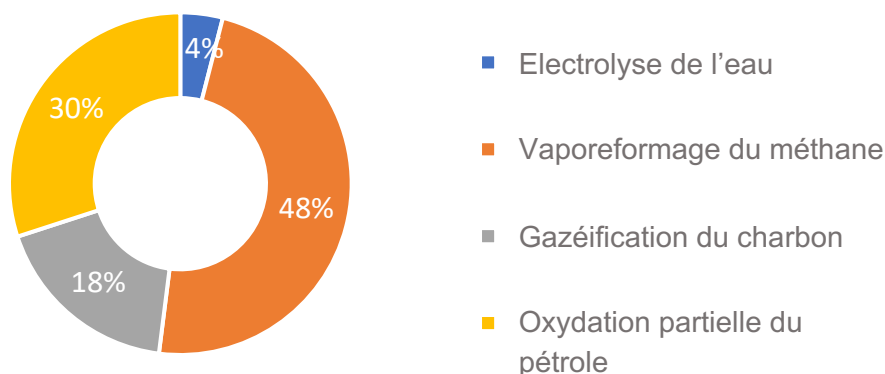
En 2018, la production mondiale d'hydrogène représentait environ **75 millions de tonnes** (Source : DOE 2019). Les procédés recourant à des ressources fossiles sont les plus répandus (reformage du méthane, gazéification du pétrole, etc.). Des procédés comme l'électrolyse de l'eau ou la pyrogazéification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

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

- 4 € à 14 €/kgH₂ par électrolyse
- 1,5 €/kgH₂ pour celui produit par hydrocarbures

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

Répartition des modes de production hydrogène



Electrolyse



Electrolyse

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

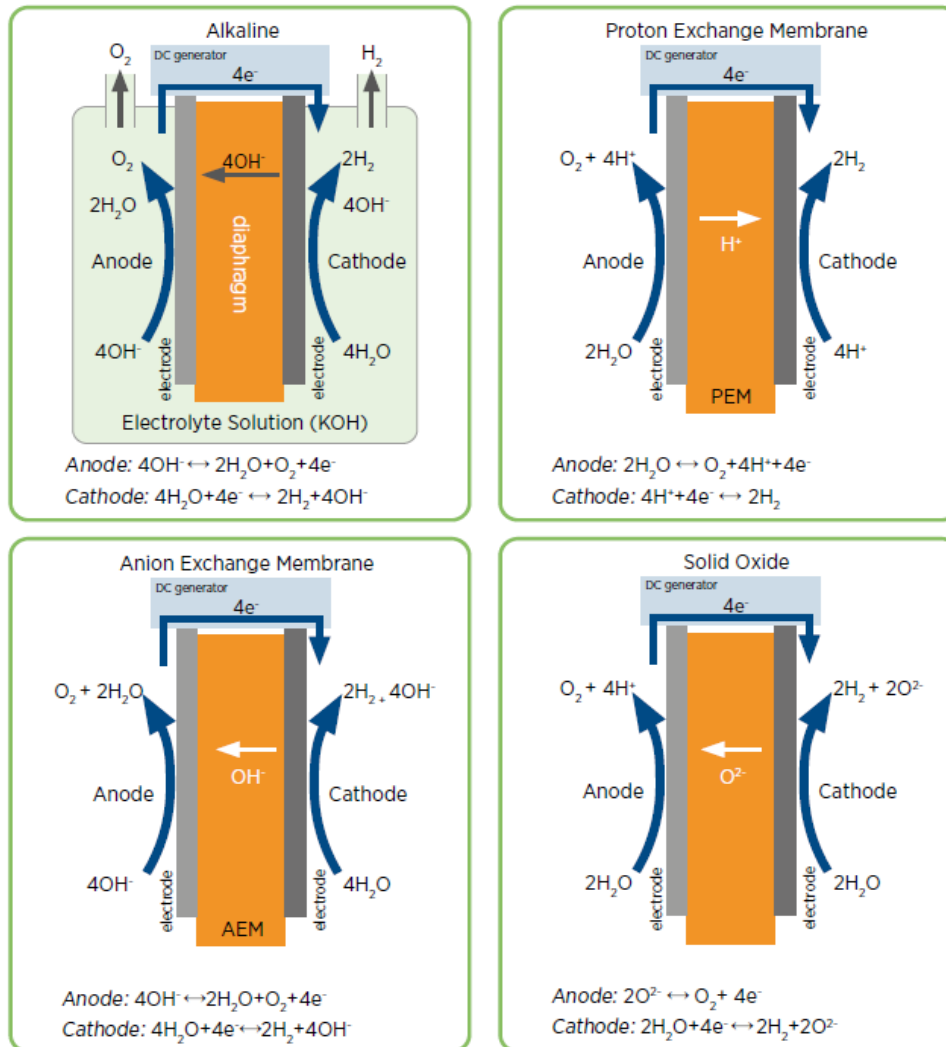
200-250kW 50 kgH ₂ /jour	1MW 400 kgH ₂ /jour	4-5MW 1500-2000 kgH ₂ /jour	10MW et plus 4-10 tH ₂ /jour
Laboratoire	Mobilité légère	Mobilité lourde	Industrie

- Les électrolyseurs sont souvent installés dans des conteneurs de 20 et 40 pieds.
- Les plus grands modules produits aujourd'hui ont une capacité de 4MW (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 (années)
	Alcalin	47-66	60-80k	10-20
	PEM	47-66	50-80k	10-20
	Oxyde Solide	35-50	<20k	NC
	AEM	51.5-66	>5k	NC

Source : IRENA Green hydrogen cost 2020

Les 4 technologies disponibles commercialement



Electrolyse

Aspects économiques

Capacité de production :

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

Le prix d'achat de l'électricité :

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

Le facteur de charge :

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

(Source : EnerKa Conseil)

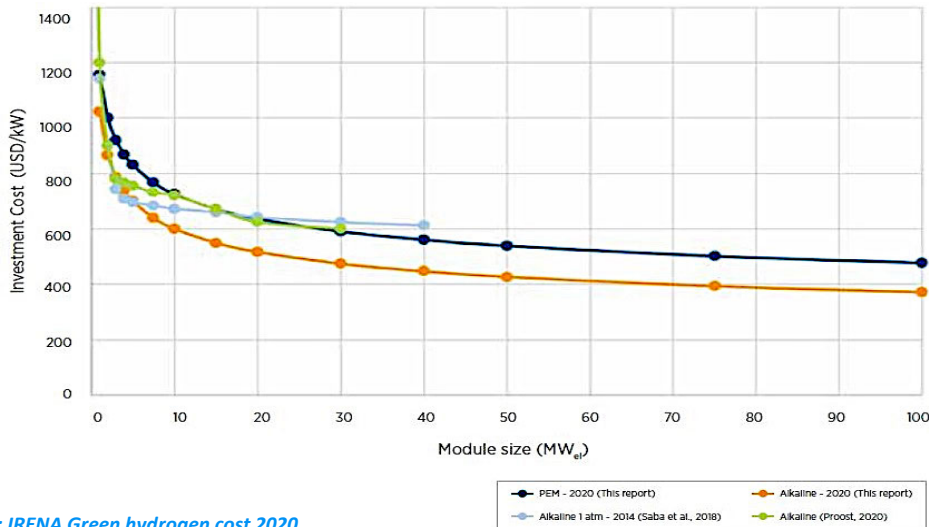
Le coût de revient actuel **en sortie de production varie ainsi de 4 à 14 €/kgH₂** selon les cas d'usage. Il est estimé qu'un hydrogène est **compétitif lorsqu'il est vendu à un prix ≤ 6-7 €/kg en sortie de production et 9 €/kg à la pompe.** (Source : Recommandations Ademe 2021).

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	Moyenne		1000	2500
	Fourchette		700-1300	2000-3000
Electrolyseur PEM	Moyenne		1500	4000
	Fourchette		1100-1900	3500-4500
Electrolyseur SOE	Moyenne		1900	NC
	Fourchette		1600-2200	NC

**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

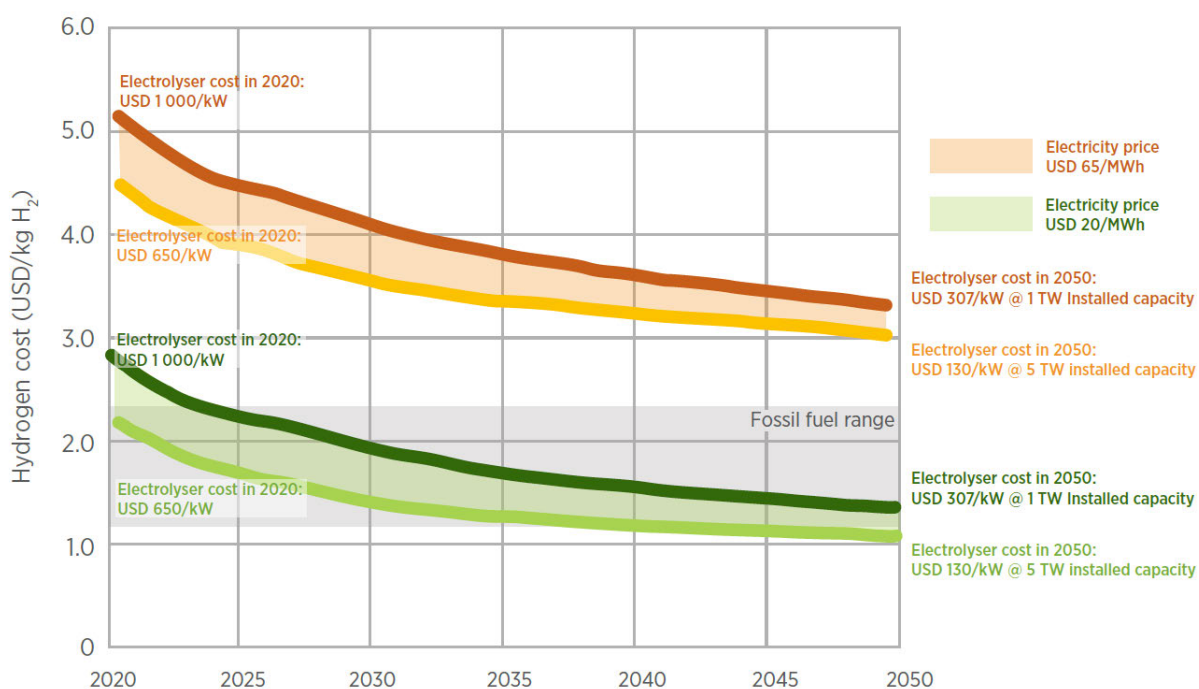
Prévisions de réduction de coût

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

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

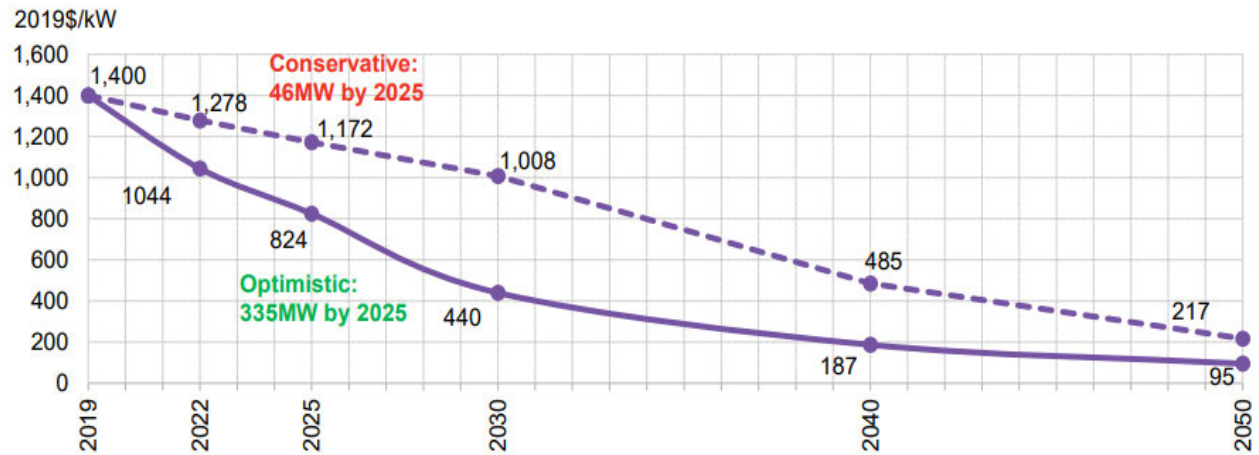
Rajouté aux prix spécifiques, les coûts de maintenance (usure des pièces, utilities, etc.), les contrats d'eau et d'électricité sont également très élevés et doivent être pris en compte lors de l'élaboration des projets.

IRENA Green hydrogen cost 2020



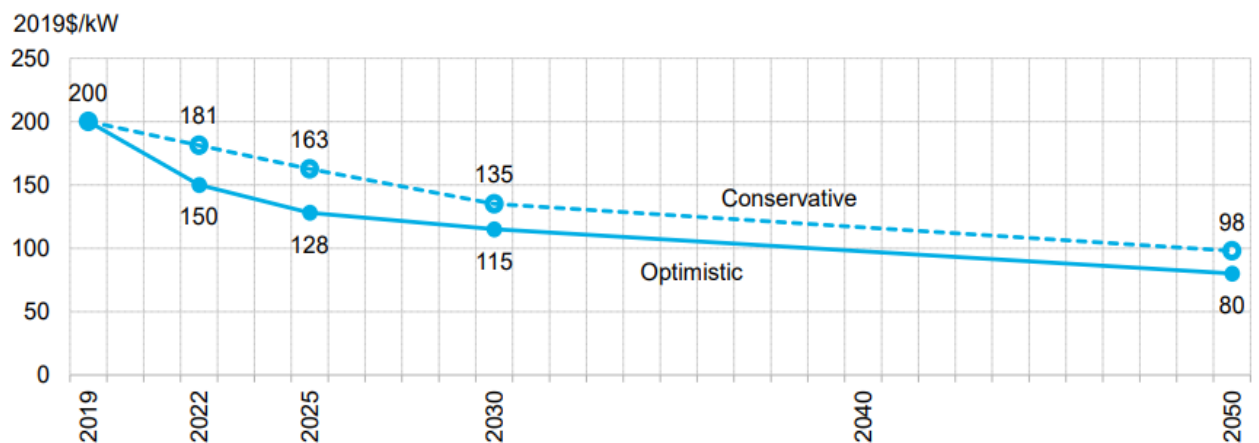
Prévisions de réduction de coût des électrolyseurs PEM et alcalins à horizon 2050

System capex forecast of 4MW-scale PEM electrolysis projects



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

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



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

Electrolyse

Acteurs de la filière

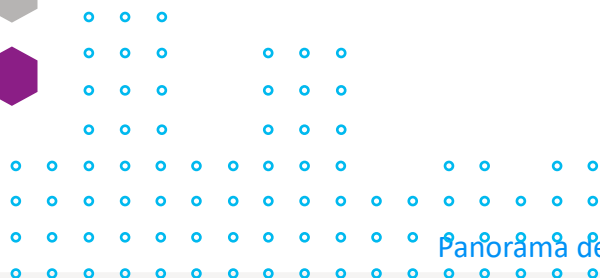
PEM



Alcalin



Autres technologies d'électrolyse

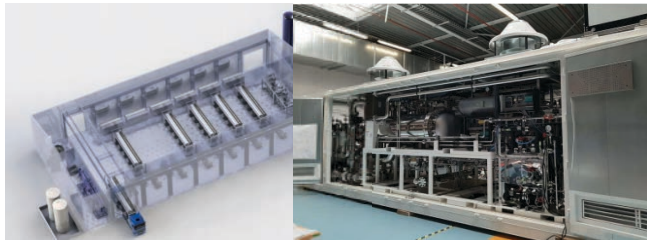


Electrolyse PEM

elogen



Puissance max stack : de 150 kW à 1,3 MW
Production hydrogène :
 2 000 Nm³ /h soit 178 kg/h



Source : Elogen



Puissance max stack : NC
Production hydrogène :
 jusqu'à 422 Nm³/h soit 40 kg/h

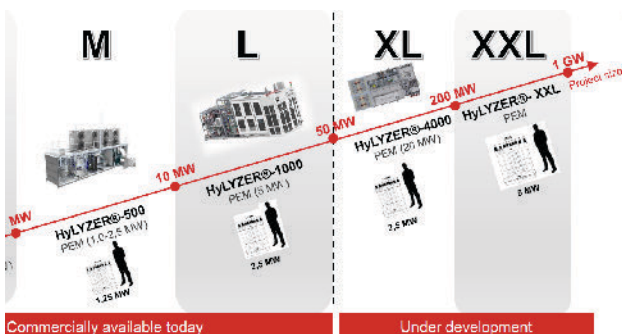


Source : CPH2



**Anciennement
Hydrogenics**

Puissance max stack : De 1 à 5 MW
Production hydrogène :
 200 - 1 000 Nm³/h soit 430 - 8628 kg/h



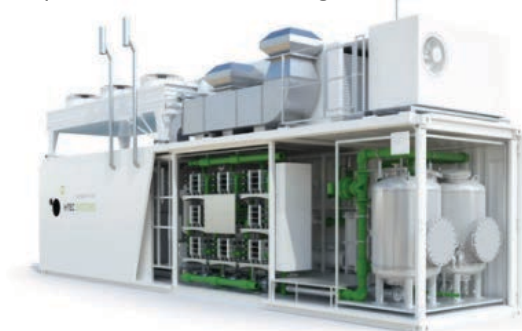
Source : Cummins



H-TEC SYSTEMS

H-TEC Systems (Man es)

Puissance max stack : 0,225 à 1 MW
Production hydrogène :
 Jusqu'à 225 Nm³/h soit 20 kg/h



Source : H-Tec Systems



Electrolyse PEM



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



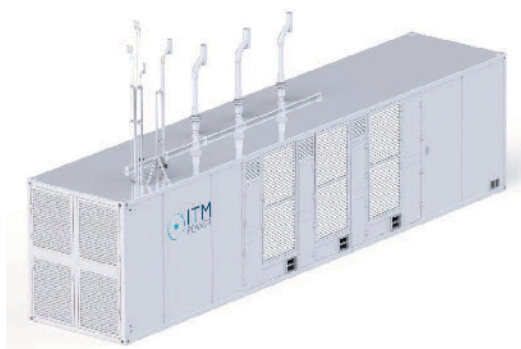
Source : iGas Energy



ITM POWER
 Energy Storage | Clean Fuel



Puissance max stack : Environ 700 kW
Production hydrogène :
 Jusqu'à 1 900 Nm³ /h soit 170 kg/h



Source : ITM

nel



Puissance max stack : Jusqu'à 2,2 MW
Production hydrogène :
 103-4000 Nm³/h soit 1-35,6 kg/h



Source : NEL

PLUG POWER



Puissance max stack : Jusqu'à 4 MW
Production hydrogène :
 200 Nm³/ h soit 18 kg/h pour 1 MW



Source : Plug Power

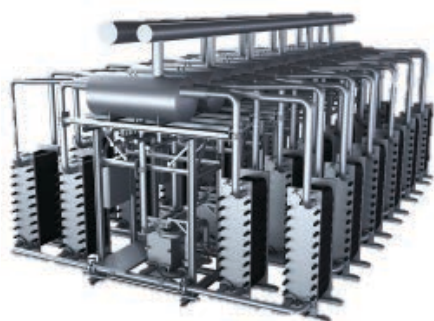
Electrolyse PEM

SIEMENS
ENERGY



Puissance max stack : Jusqu'à 4 MW

Production hydrogène :
4 000 Nm³/h soit 330 kg/h en moyenne



Source : iGas Siemens

Electrolyse Alcalin

McPhy

Driving
clean energy
forward



Production hydrogène

- Piel & McLyzer Small : de 0,4 à 800 Nm³/h soit de 35 g/h à 71,2 kg/h pour 1 stack
- Gamme Augmented McLyzer pour les conceptions multi-MW, GW



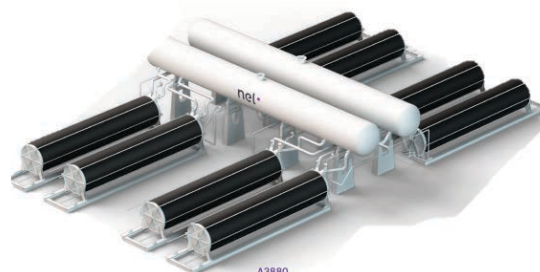
Source : McPhy

nel



Puissance max stack : Jusqu'à 2,2 MW

Production hydrogène :
30-413 Nm³/h soit 2,7 – 40 kg/h



Source : Nel



thyssenkrupp



Puissance max stack : Jusqu'à 4 MW

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



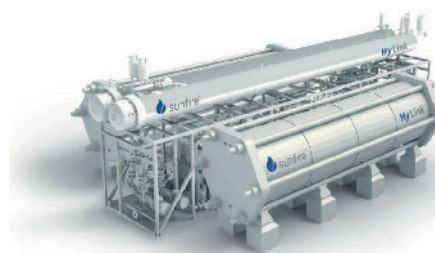
Source : Thyssenkrupp

sunfire



Puissance max stack : Jusqu'à 4 MW

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



Source : Sunfire

Electrolyse Alcalin



Anciennement
Hydrogenics

Puissance max stack :
0,1 à 0,5 MW

**Production
hydrogène :**
15 à 100 Nm³/h
soit 1,3 – 9 kg /h

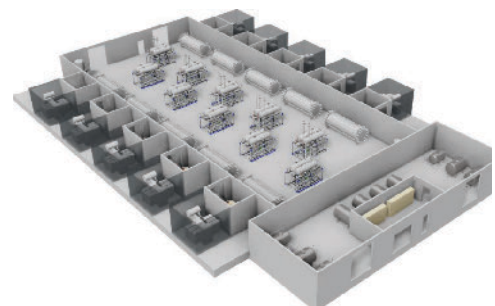


Source : Cummins

Hydrogen pro



Puissance max stack : NC
Production hydrogène :
10 – 1000 Nm³/h soit 0,9 – 90 kg/h



Source : Hydrogen Pro



GREEN
HYDROGEN
SYSTEMS



Puissance max stack : 450 kW
Production hydrogène :
De 30 – 90 Nm³/h soit 2,7 - 8,1 kg/h



Source : Green Hydrogen Systems



John
Cockerill



Puissance max stack : 5 MW
Production hydrogène :
500 Nm³/h soit 44,5 k/h



Source : John Cockerill

Electrolyse AEM



Puissance max stack : 2,4 kW
Production hydrogène :
210 Nm³/h soit 19 kg/h



Source : Enapter

enstack™

Puissance max stack :
100 kW et offre prévue à 250 kW en 2022
Production hydrogène :
2,1 Nm³/h soit 0,2 kg/h



Source : Enstack

gen-hy



Puissance max stack : Jusqu'à 30 MW
Production hydrogène :
2360-6060 Nm³/h soit 210 – 540 kg H₂ / jour
Année de commercialisation : 2022



Source : Gen-Hy

Electrolyse

Autres types d'électrolyse



Principes de la technologie au Zinc avec hydrogène directement à 100 bar (sans compresseur)

Production hydrogène : 1,13 Nm³/j soit 100 gr/j



Source : Ergosup



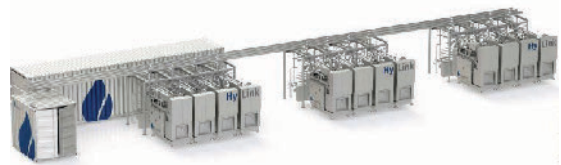
Principes d'électrolyse à haute température
Fonctionnement à 850°C

Puissance max stack : 2 680 kW

Production hydrogène :

750 Nm³/h soit 67 kg/h

Démonstrateur à échelle industrielle en 2022

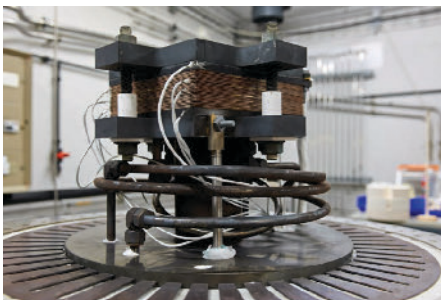


Source : Sunfire



Electrolyseur SOE

Stack : 1.7 Nm³/h pour 25 cellules stack



Source : Genvia



Production d'énergie hors réseau

Présenté dans le segment Usages de ce catalogue :

- 1.2 Nm³/h produit à 700°C pour 25 cellules stack

Efficacité : 99% (HHV) – 84% (LHV)



Source : Sylfen



Production d'hydrogène à partir de biomasse



Production à partir de biomasse

Prévisions de réduction des coûts

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

Si la matière première est du bois non traité, alors la quantité de CO_2 absorbée lors de la croissance de l'arbre est identique à celle relâchée lors de sa combustion. Le **carbone est alors capté** lors des différentes étapes et une partie pourra être valorisée sous forme de biochar en agriculture. Grâce à ce principe, l'hydrogène ainsi produit est considéré comme **neutre voire négatif en carbone**, suivant la nature et l'origine de la matière première utilisée.

Pyrolyse :

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

Gazéification :

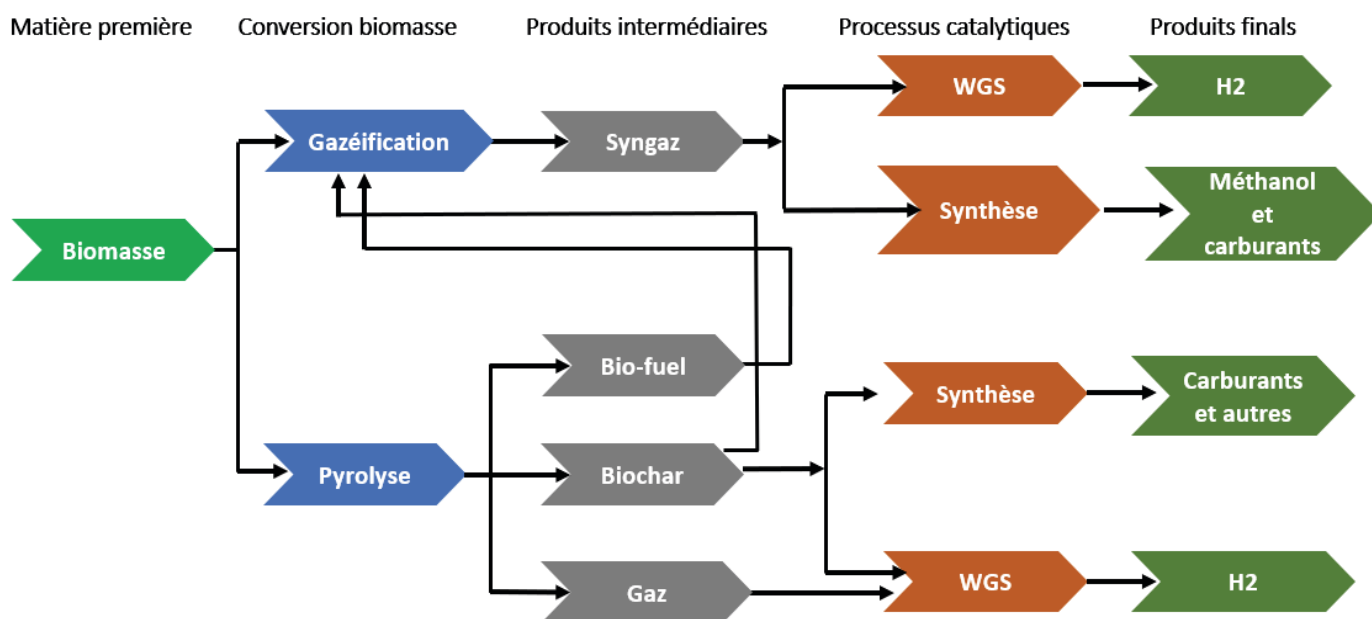
- Température entre 900 et 1 200 °C
- Marché mature jusqu'à la production du syngaz, des projets se développent pour viser le marché de l'hydrogène

Biomasse utilisée

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

Production à partir de biomasse

Prévisions de réduction de coût



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

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

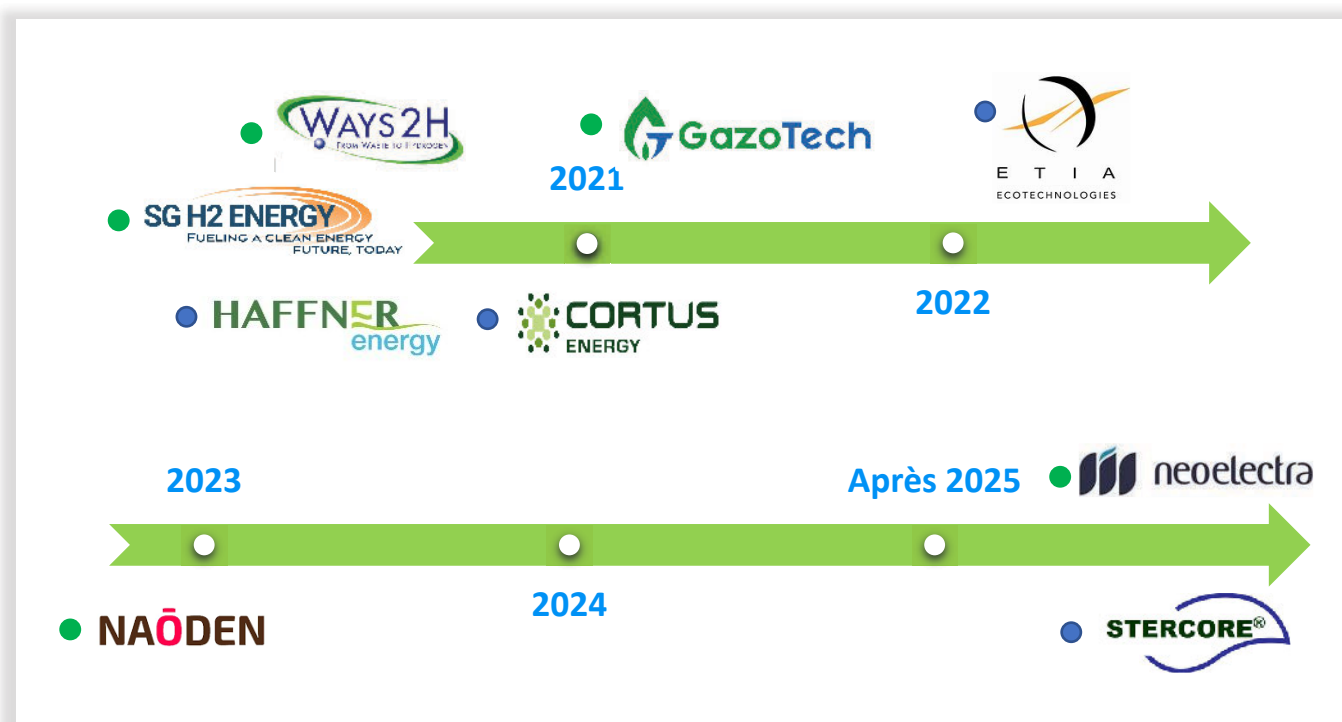
Production à partir de biomasse

Marché & aspects économiques

En raison des **CAPEX plus élevés** que la technologie d'électrolyse, les projets actuels ont démontré la nécessité d'avoir une taille minimale de fonctionnement afin d'atteindre un équilibre économique (environ 800 kg biomasse / jour **d'après les différents entretiens menés**). Le coût en **sortie de production de l'hydrogène est annoncé comme inférieur à 5 €/kg H₂** (rapport IEA 2019) ce qui permettrait d'atteindre l'objectif de 9 €/kg H₂ à la pompe.

Les procédés intermédiaires entre la consommation de biomasse et la production d'hydrogène sont particulièrement nécessaires afin d'obtenir un produit se rapprochant des standards commercialisés (99,999% H₂).

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



Bibliographie:

Hydrogen from biomass gasification (rapport IEA 2019)

Production à partir de biomasse

HAFFNER
energy



Typologie : Thermolyse
Production hydrogène :
 360 kgH₂/jour par modules standard (4000 Nm³/j)
Nature de la biomasse :
 Bois non traité, bois traité, biomasse agricole



Source : Haffner Energy

ETIA
ECOTECHNOLOGIES



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



Source : Etia

CORTUS
ENERGY



Typologie : Pyrolyse
Production hydrogène : 1000 Nm³/jour
Nature de la biomasse : Bois non traité



Source : Cortus

GazoTech

Gazotech (Groupe Ankur)

Typologie : Gazéification
Nature de la biomasse :
 CSR, bois type A et B
*En cours de commercialisation
 pour la production hydrogène*



Source : Groupe Ankur

Production à partir de biomasse



SGH2 (porté par Eco'R)

Typologie : Gazéification

Production hydrogène : 4 000 t d'H₂/an

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



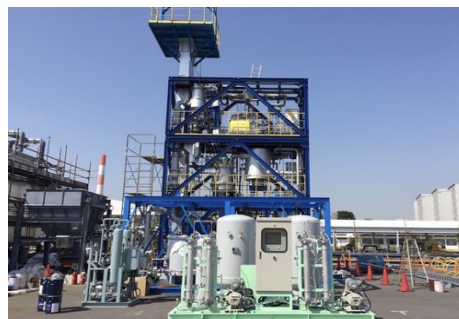
Source : SGH2



Typologie : Gazéification

Production hydrogène : 50kg H₂ par type d'intrants

Nature de la biomasse : Biomasse déchets



Source : Groupe Ways2H



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, **94% de l'hydrogène produit dans le monde est gris.**

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

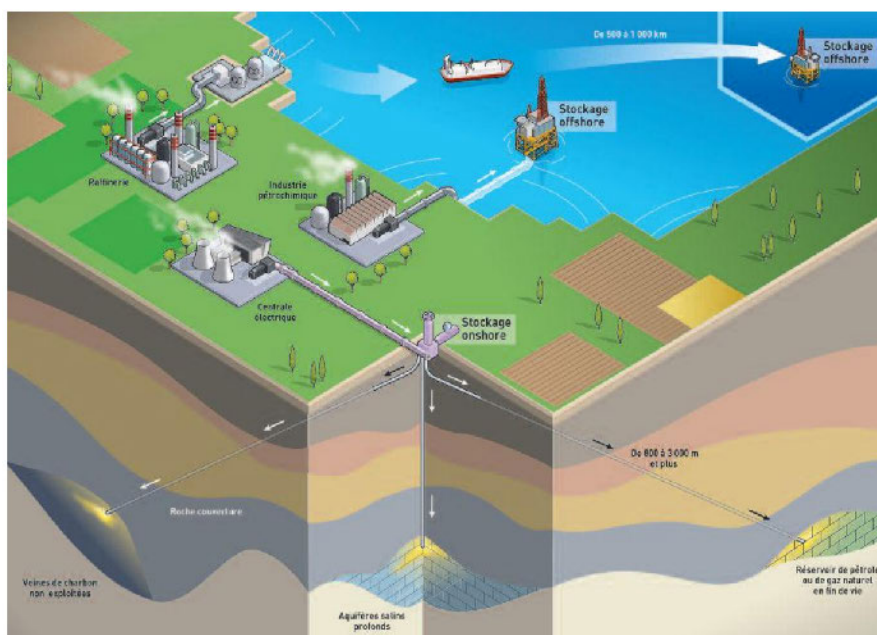
Le captage de CO_2 émis sur les unités de SMR, pour pouvoir produire un hydrogène bas carbone (ou hydrogène bleu).

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 »



© GDF SUEZ – Agence IDE

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 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

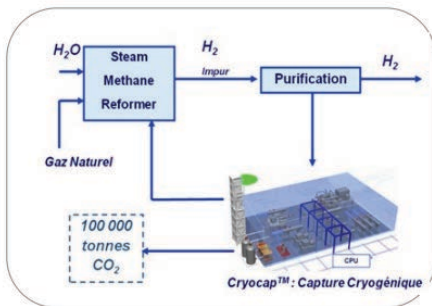
Reformage du méthane avec captage du carbone

Unités de production



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%



Source : Ademe

Schéma de principe du projet



Usine à Port Arthur (USA)

Depuis 2014, la technologie de captage et de séquestration du carbone sur le site de Port Arthur a permis de capter environ un million de tonnes métriques de CO₂ par an.

Capacité (H₂) : 500 tonnes H₂/jour
Capacité (CO₂) : ~1 million de tonnes tCO₂/an



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.

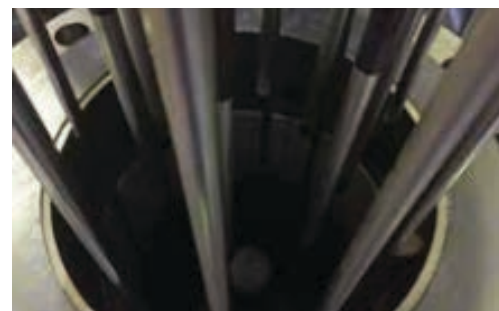
Source : Baker Hughes



Unité de production SMR « Onsite »

Capacité (H₂) : 2 à 50 Nm³/h

Proposant des modules de production d'hydrogène à partir de gaz naturel dans des conteneurs de 20 ou 40 pieds.



Source : H2 Site

Reformage du méthane avec captage du carbone

Unités de production

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

Reformage du méthane avec captage du carbone

Autres acteurs



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

BayoTech
ON-SITE HYDROGEN



HALDOR TOPSOE



Heurtey Petrochem
SOLUTIONS



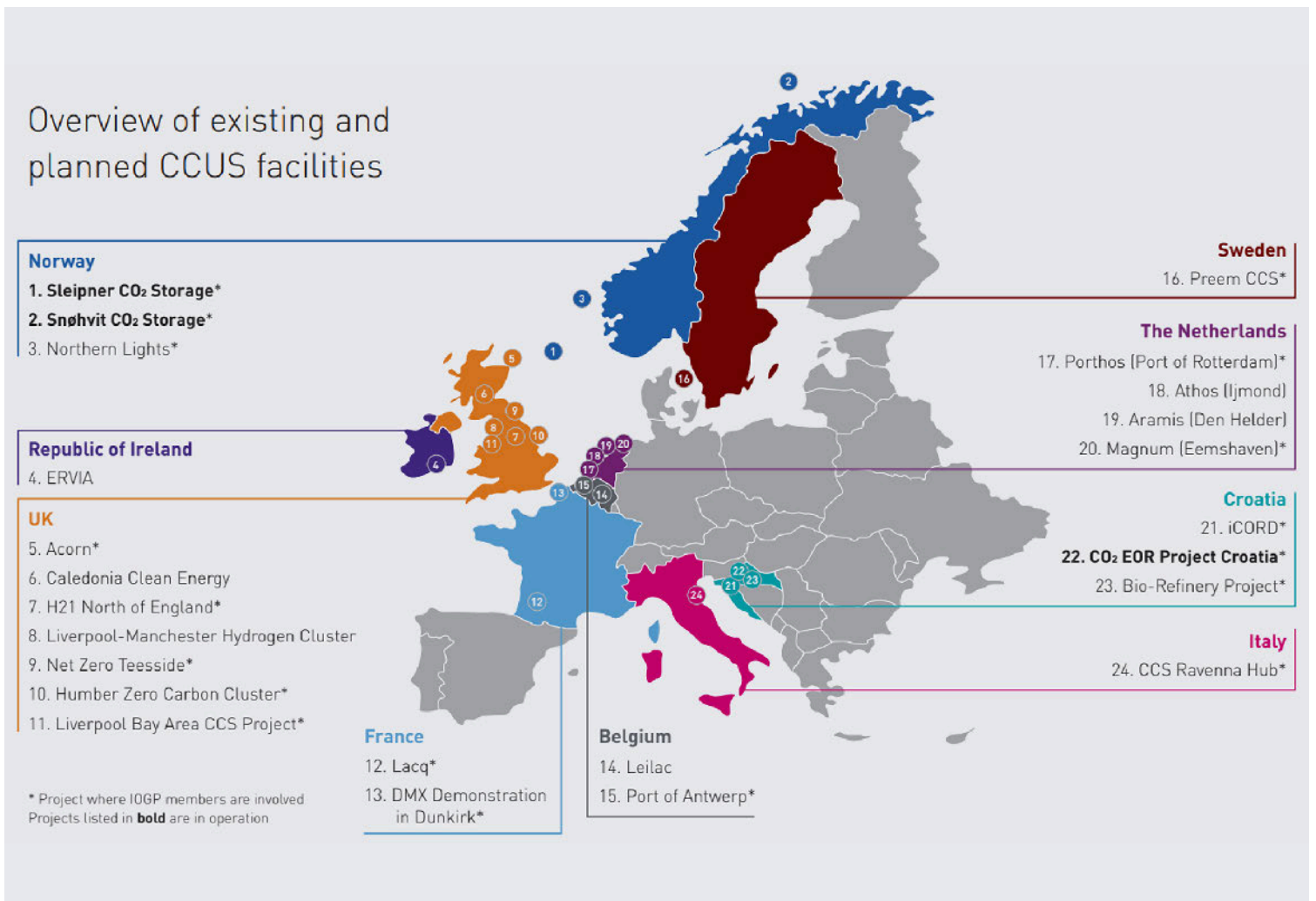
Entreprise française

Entreprise Européenne

Usine en France

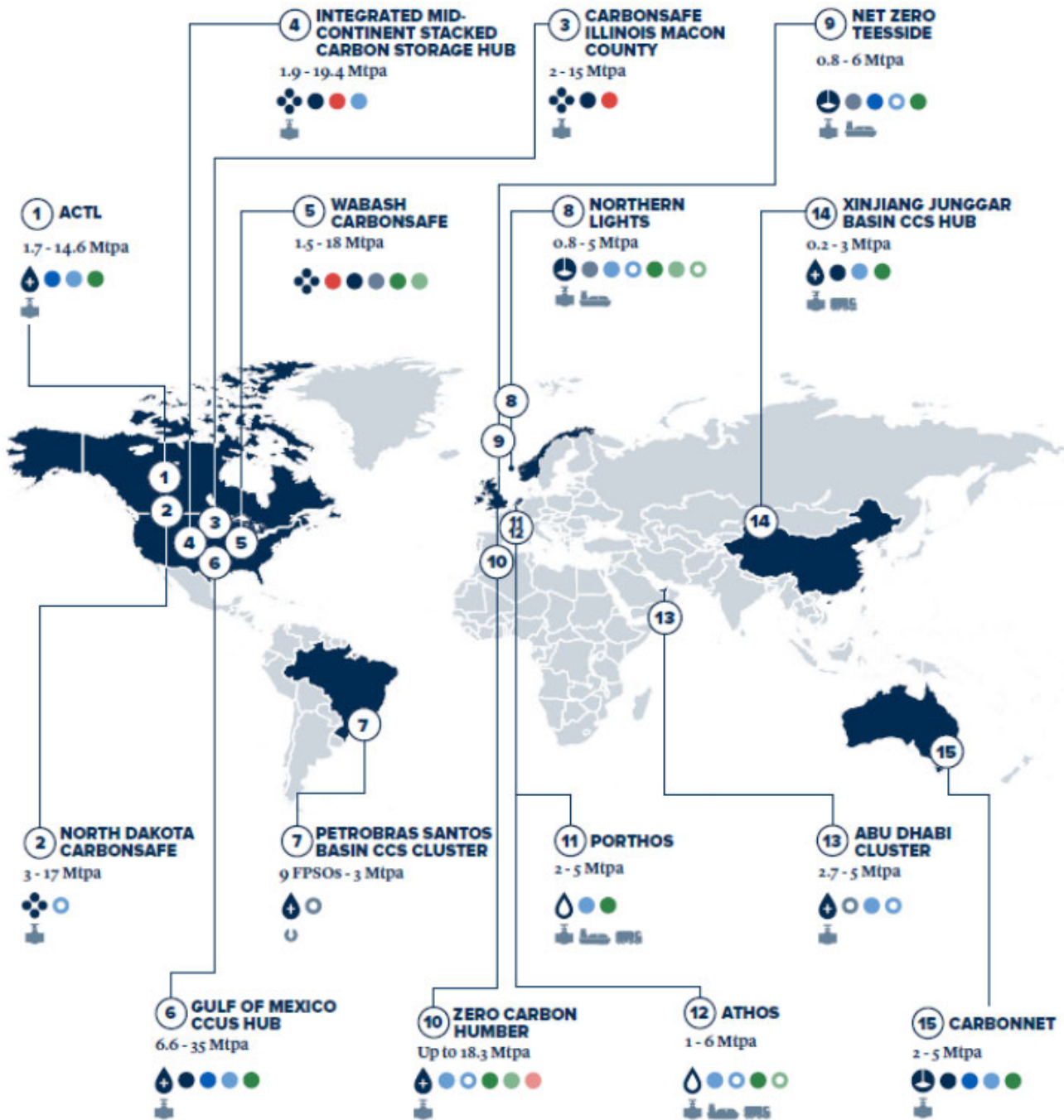
Reformage du méthane avec captage du carbone

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

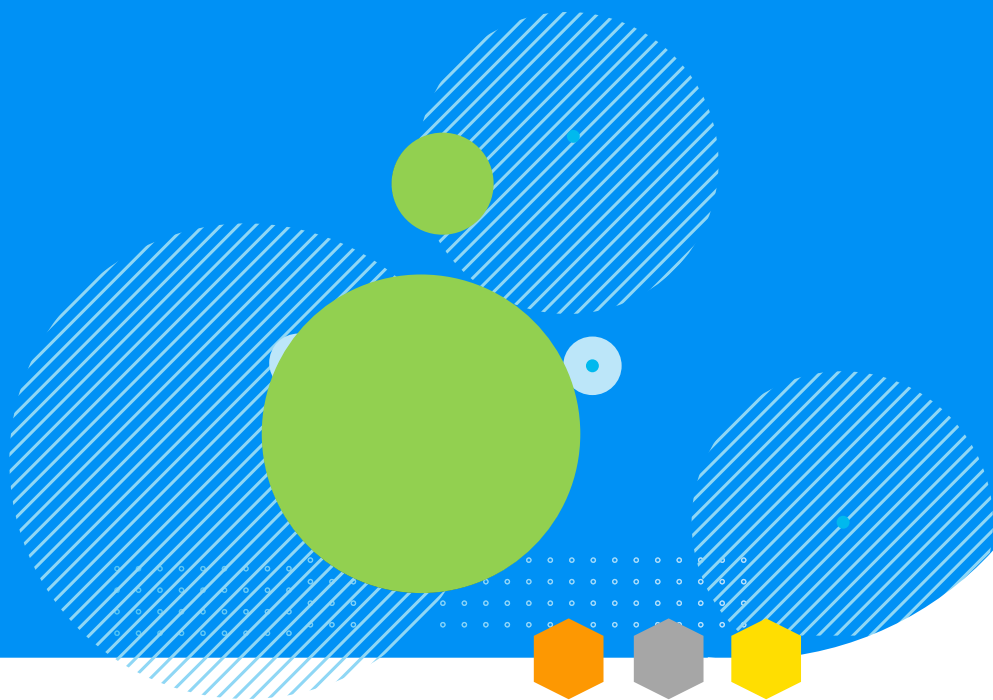
DELIVERY

- 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)



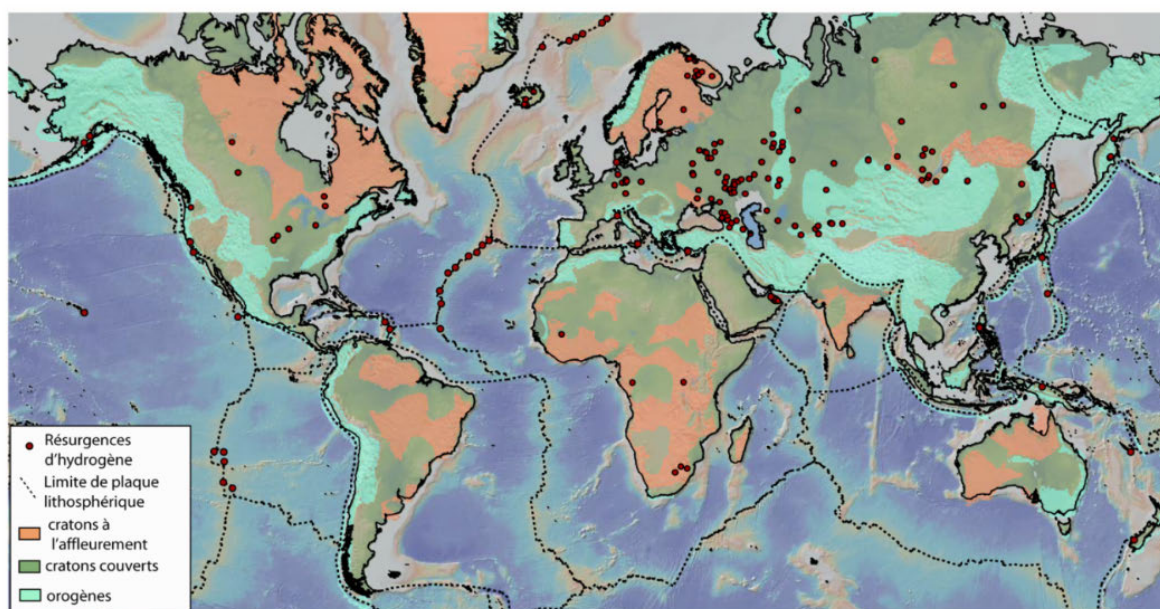
Hydrogène natif



Hydrogène natif

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

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



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

Caractéristiques

L'hydrogène naturel se caractérise par :

- Plusieurs gisements à la surface du globe
- Des productions estimées variant de quelques tonnes à plusieurs milliers, voire dizaines de milliers de tonnes par an
- Des coûts de production visés sont proches de ceux des gaz fossiles (0,1 à 1 USD/kgH₂) (d'après le retour des acteurs de l'hydrogène natif)
- Un grand intérêt et de forts potentiels, mais encore de nombreuses inconnues typiques des projets de sous-sols

Statut / tendance

- L'hydrogène naturel connaît un engouement récent auprès des acteurs du sous-sol. Les projets nécessitent néanmoins un temps important pour être développés (5 à 10 ans) passant par différentes étapes (études, obtention de permis, forages exploratoires, forages de production) visant à réduire les risques.
- 1^{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 natif



EOSYS



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



45-8
energy



Solution :

- Opérateur de projet H₂ naturel
- Services pour l'exploration géologique de la ressource H₂ naturel (géophysique, prélèvement)
- Capteur IoT pour détecter les flux de H₂ (technologie HEMT)



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)



Autres types de production



Autres types de production

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



Gazéification hydrothermale

- Procédé permettant de transformer de la matière carbonée humide en gaz de synthèse (CH_4 , H_2 , CO_2)
- Production d'hydrogène à partir du traitement d'effluents liquides organiques (boues de stations d'épuration, effluents d'activités industrielles et effluents d'élevage)
- Des pilotes et démonstrateurs sont en fonctionnement en Europe pour atteindre l'échelle industrielle à l'horizon 2023/2025



Photocatalyse

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

Source : Brochier technologies



Photoélectrochimie

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

Stockage

H₂



Sommaire



Stockage

Stockage : Principes généraux	47
Stockage sous forme gazeuse	48
Stockage sous forme liquide	57
Stockage sous forme solide	61
Stockage massif	64
Vecteurs chimiques	67



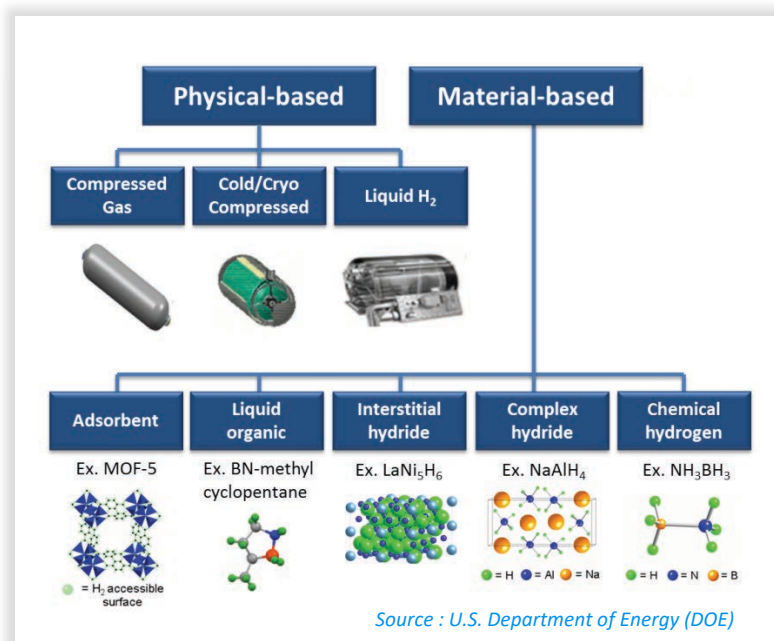
Le stockage de l'hydrogène

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 seulement stocker 1 seul kilo 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



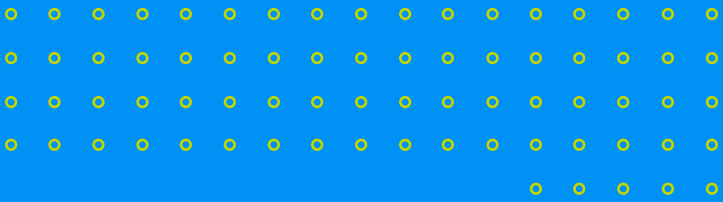
Densité de l'hydrogène

Gazeux :

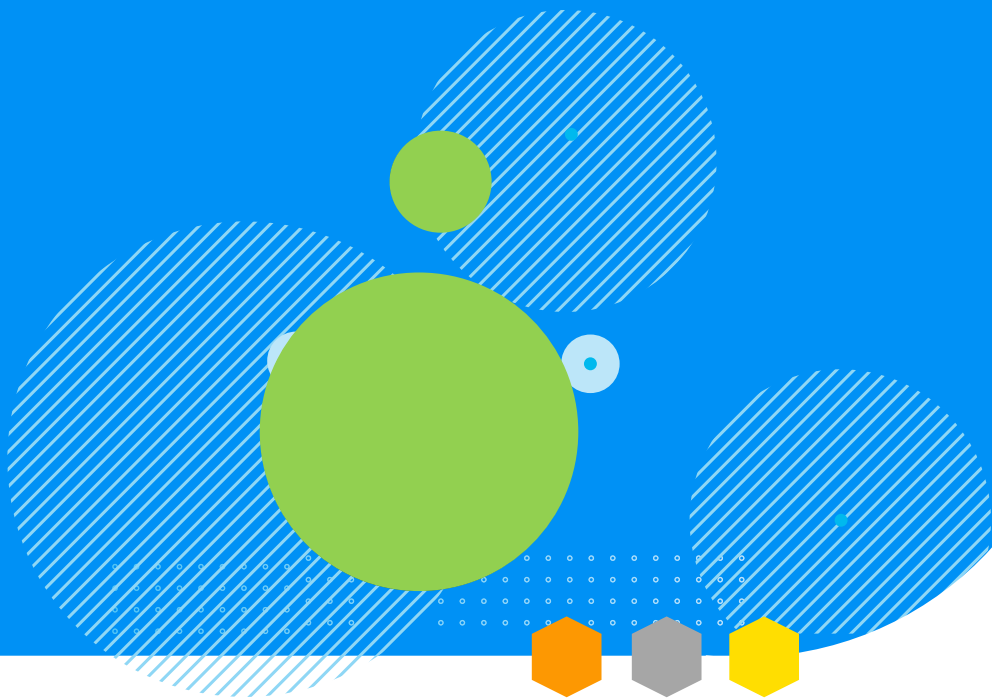
- CNTP : **0,0898 kg/m³**
- 220 bar : **14,885 kg/m³**
- 700 bar : **39,6 kg/m³**

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 kg/m ³ à 200 bar	Transport et livraison d'H ₂ , stationnaire
Type II	Mature	+	0	14 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 :

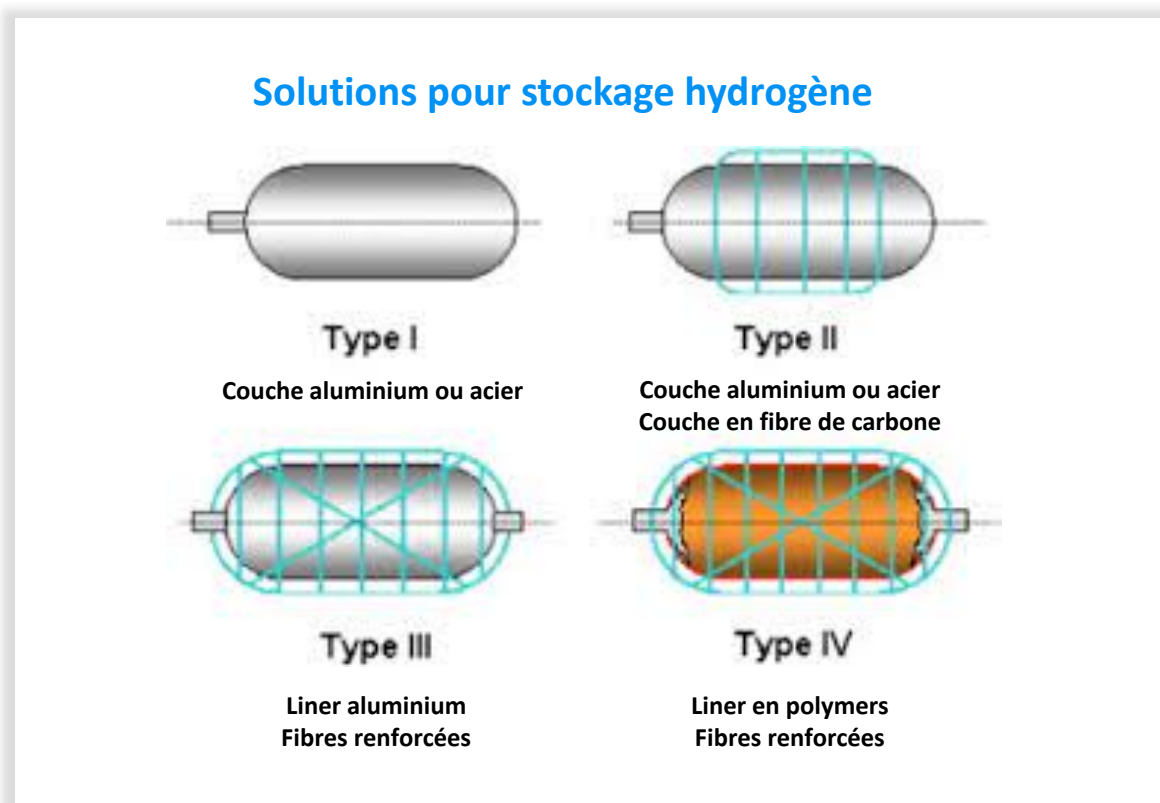
- Tubes trailers : Tubes, généralement de type I, allant de 6 à 16m pour des stockages stationnaires ou pour le transport d'H₂
- Bouteilles de stockage 200 bar : Bouteilles, généralement de type I, regroupées dans des cadres
- Bouteilles embarquées : Bouteilles, généralement de type IV, utilisées dans les véhicules hydrogène et qui stockent entre 5 à 12 kg d'hydrogène chacune

Durée de vie

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

Maintenance

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



Bibliographie utile :

- 2019 DOE Hydrogen Storage Cost Analysis (energy.gov)

Stockage gazeux

Marché & Aspects économiques

Aspects économiques (Données EnerKa Conseil)

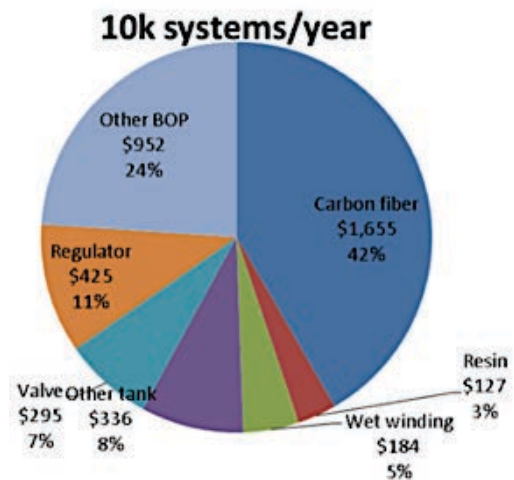
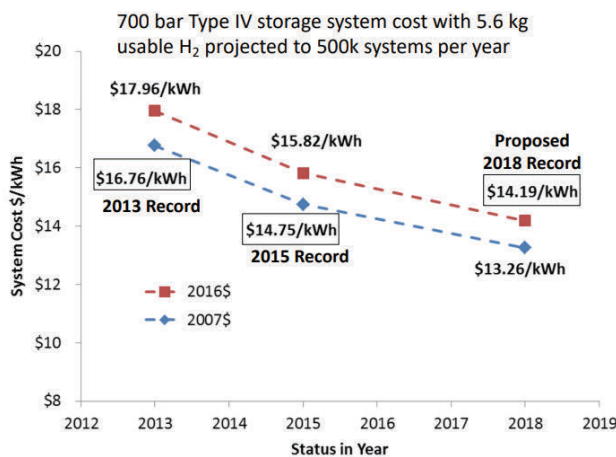
Type I : 200 bar : 380-450 €/kg

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

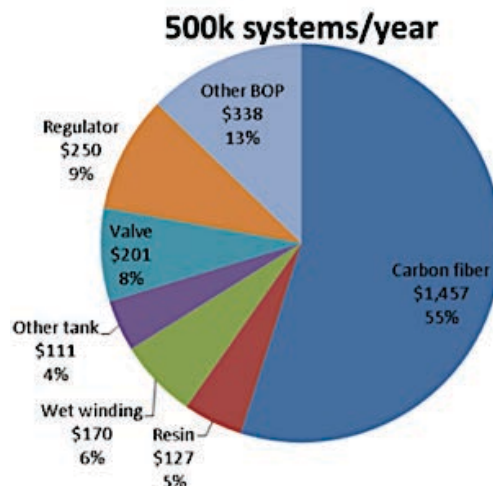
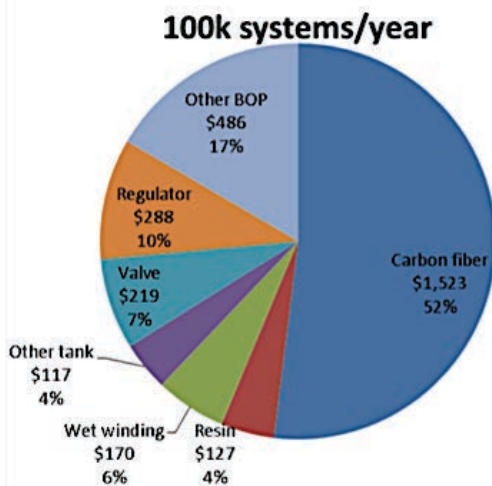
Type II ou III : 300-500 bar : Environ 500-700 €/kg

Type IV : 700 bar : 600-1000 €/kg

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



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



Stockage gaz (réservoirs)

Acteurs de la filière



Entreprises Européennes

NPROXX

CALVERA
Gas Technology

QUANTUM
FUEL SYSTEMS

MAHYTEC

**UM
OE**

LUXFER
GAS CYLINDERS

Wystrachli
Customized solutions in high pressure

H₂X

REUTHER

faurecia

RAIGI

PLASTIC OMNIUM

Faber
CYLINDERS

HEXAGON
PURUS

STELIA



Entreprises Hors Europe

FIBA
QUALITY PRODUCTS-SERVICE

CLD

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

富瑞特装
FURUISE

ILJIN
Composites

EKC
EVEREST KANTO CYLINDER LIMITED
Clean Energy Solution Company

WORTHINGTON
INDUSTRIES

Stockage gazeux (réservoirs)

Les acteurs du secteur

faurecia



Applications : Applications embarquées
Typologie : Type IV
Pression maximale : 700 bar
Poids vide : 80 litres supportant 200 bar de pression ne pèse que 29 kg (capacité max : 1500 L)
Poids H₂ embarqué : max : 133 kgH₂



Source Ullit

MAHYTEC



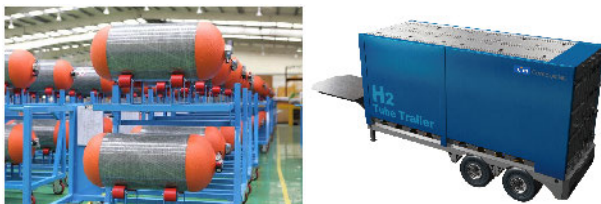
Applications : Mobilité maritime, ferroviaire (réservoir carburant) / Tampon pour stations H₂ / transport
Typologie : type IV
Pression maximale : 60 bar à 500 bar
Poids vide : 215 kg à 260 kg
Poids H₂ embarqué : max 9,5 kg



Source : Mahytec

ILJIN
Composites

Applications : Applications embarquées
Typologie : Type IV
Pression maximale : 700 bar
Poids vide : NC
Poids H₂ embarqué : NC



Source :: Iljin

HEXAGON
PURUS



Applications : Conteneur, train, maritime
Typologie : Type IV et type III
Pression maximale : 381 bar

Poids vide :
max 21 000 kg

Poids H₂ embarqué :
> 1 100 kgH₂

	TYPE-3	TYPE-4
Cylinder technologies		
Description	Fiber composite cylinder with aluminum lining	Fiber composite cylinder with plastic lining
Total cost of ownership		Lower
Storage density		Higher
Mobility applications		

Hexagon Purus offering

Source : Hexagon Purus

Stockage gazeux (réservoirs)

Les acteurs du secteur



Application : Embarquée
Typologie : Type IV
Pression maximale : 350 et 700 bar
Poids vide : NC
Poids H₂ embarqué : NC



Source : Plastic Omnium



Applications :
Stockage stationnaire, mobile et embarqué
Marché à la demande, fabrication sur mesure
Typologie : Type I à 4
Pression maximale : 200 – 1000 bar
Poids vide : 20t pour conteneur de 20 ft (Type I)
Poids H₂ embarqué : Dépend du besoin



Source Calvera



Fiba Technologies

Applications : Stockage mobile et stationnaire
Typologie : Type I et type II
Pression maximale : jusqu'à 1000 bar
Poids vide : max 1651kg
Poids H₂ embarqué : environ 100 kgH₂ max



Source : Fiba Technologies



Applications : Stockage stationnaire
Typologie : Type I, type II et type III
Pression maximale : 30 - 240 bar
Poids vide : 45 000 kg
Poids H₂ embarqué : max 425 kg H₂



Source : Reuther

Stockage gazeux (réservoirs)

Les acteurs du secteur



Applications : Stockage embarqué
Typologie : Type IV
Pression maximale : 350 bar et 700 bar
Poids vide : max 245 kg
Poids H₂ embarqué : max 24 kgH₂



Source : Quantum



Applications : Camions, transport
Typologie : Type III et type IV
Pression maximale : 350 bar, 500 bar et 700 bar
Poids vide : NC
Poids H₂ : max 1 000 kgH₂ pour 500 bar



Source : NPROXX



Applications : Embarquée
Typologie : Type II
Pression maximale : 450 bar
Poids vide : max 19 220 kg
Poids H₂ : max 946 kg
Délais de livraison : Quelques jours



Source : Wystrach



Applications : Transport et transport pour le maritime
Typologie : Type IV
Pression maximale : 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

Stockage gazeux (réservoirs)

Les acteurs du secteur

H2X



Applications : Stationnaire
Typologie : NC
Pression maximale : 350 bar
Poids vide : 20 kg
Poids H₂ : 0,7 kgH₂



Source H2X

Raigi



Applications : Embarqué
Typologie : Type IV
Pression maximale : 350 bar
Poids vide : NC
Poids H₂ : NC



Source Raigi

STELIA



Aerospace Composites

Applications : Aéronautique, automobile, camions, et vélo
Typologie : Type IV
Pression maximale : 700 bar
Poids vide : NC
Poids H₂ : NC



Source : STELIA

DOOSAN

Applications : Drone
Typologie : Type IV
Pression maximale : 350 bar
Poids vide : NC
Poids H₂ : NC



Source : Doosan



Stockage sous forme liquide

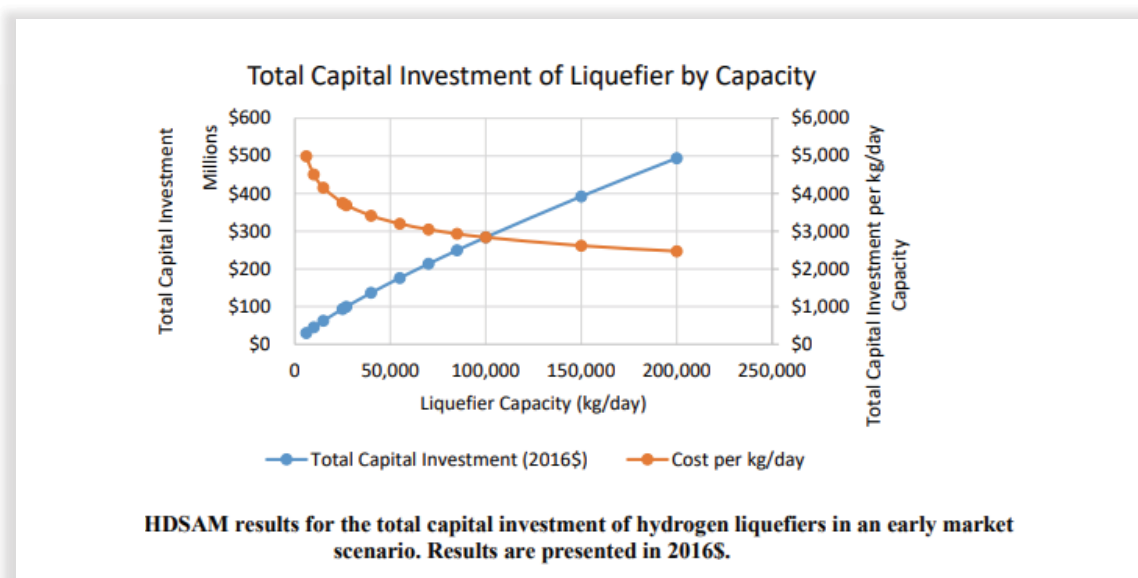


Stockage liquide

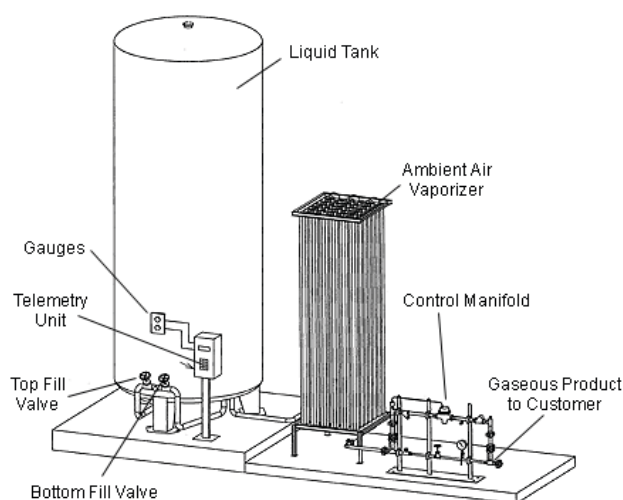
Principes généraux

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 liquide

Les acteurs du secteur



Caractéristiques :

- Volume réservoir : 50 – 300 m³
- Pression de design : 9 barg max

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

Disponibilité : Commerciale



Source: Man Es

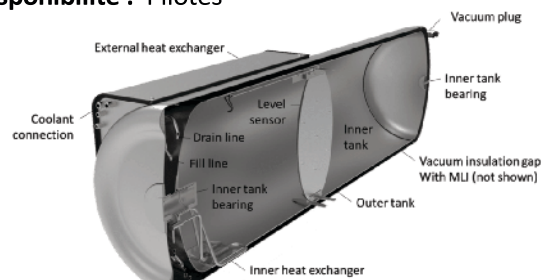


Caractéristiques :

- Volume réservoir : 400 L
- Pression de design : jusqu'à 10 barg (sécurité à 20 barg)

Applications : Véhicule (voiture, camion, remorques)

Disponibilité : Pilotes



Source : SAG



Chart Industries

Caractéristiques : Pour tubes trailers

- Volume du réservoir : NC
- Pression de design : 10 barg max

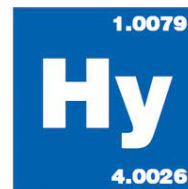
Applications : Applications embarquées et stationnaires et aérospatial

Disponibilité : Commerciale



Vehicle Tank Systems

Source : Chart



Hylum Industries

Caractéristiques :

- Volume du réservoir : jusqu'à 39 000 L
- Pression de design : 12 barg max

Applications :

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



Source : Hylum Industries

Stockage liquide

Les acteurs du secteur



Cryolor (filiale de Air Liquide)

Solution : Réservoir à double paroi pour hydrogène liquide.

Conception de réservoirs hydrogène liquide, maîtrise sur la chaîne logistique de l' H_2 , ingénierie et R&D.

Projets : Réservoirs de la fusée Ariane, contiennent 28 t d' H_2 liquide qui vont alimenter le moteur central. (Poids : 5,5 tonnes à vide et 1,3 mm d'épaisseur de paroi)



Source : Air Liquide



Caractéristiques :

- Capacité réservoir : jusqu'à 400 L

Applications :

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



Source : Cryofab



Caractéristiques :

- Volume du réservoir : 202 L
- Pression de design : 6 barg max

Applications :

Stockage et le transport dans la recherche et l'industrie.



Source : Cryotherm



IC Technology

Solution :

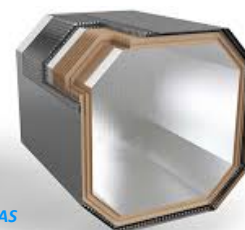
Membrane de stockage d'hydrogène liquide sur équipement de stockage

Caractéristiques :

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

Maturité : Technologie validée par DNV

Application : Maritime



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



Stockage sous forme solide



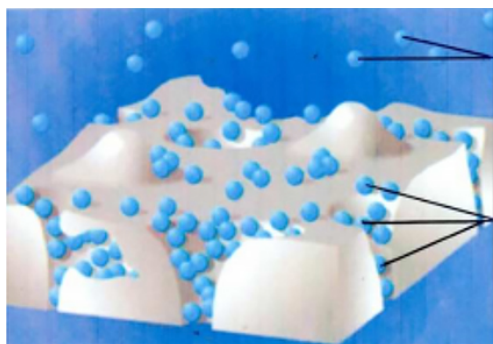
Stockage solide

Principes généraux

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

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

Modélisation de la physisorption



1

1 – molécules libres (phase gazeuse)

2

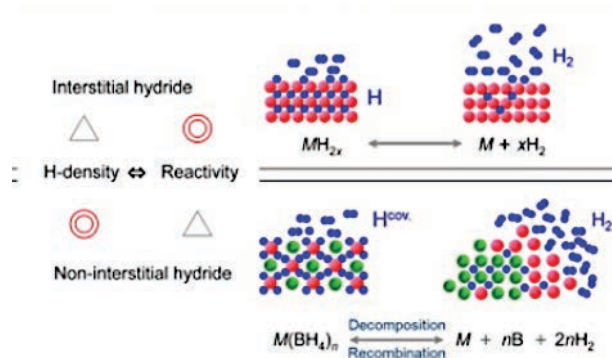
2 – molécules adsorbées en surface et dans les pores (phase adsorbée)

Caractéristiques (Données ACER 2021)

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

Projets :

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



Bibliographie

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

Stockage

Stockage solide



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

Type : FeTi (Fer / Titane)

Caractéristiques :

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

Applications :

Stationnaire, transport ou mobilité spéciale

Disponibilité :
2021



Source Mahytec



Solution :

Cartouches mises à disposition pour recharge rapide sur le véhicule

Caractéristiques :

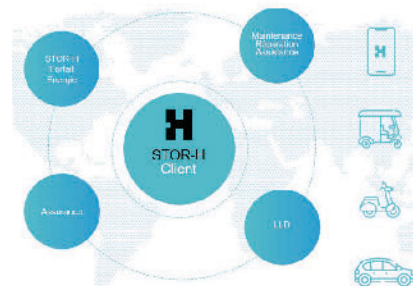
- Recharge de cartouches entre 30 min et 2h avant mise en distributeurs
- Poids hydrogène stocké : NC

Maturité : Technologie validée par DNV

Applications :

Mobilité légère (vélos, scooters, etc.)

Disponibilité :
2023



Source : Aaqius



GKN Hydrogen

Solution :

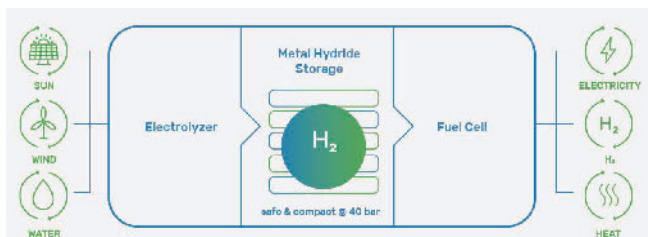
Solution complète génération d'hydrogène et stockage solide

Caractéristique :

- Poids hydrogène stocké : 10 à 260 kg

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

Disponibilité : NC



Source : GKN Hydrogen



Usine en France



Stockage géologique



Stockage géologique

Stockage souterrain

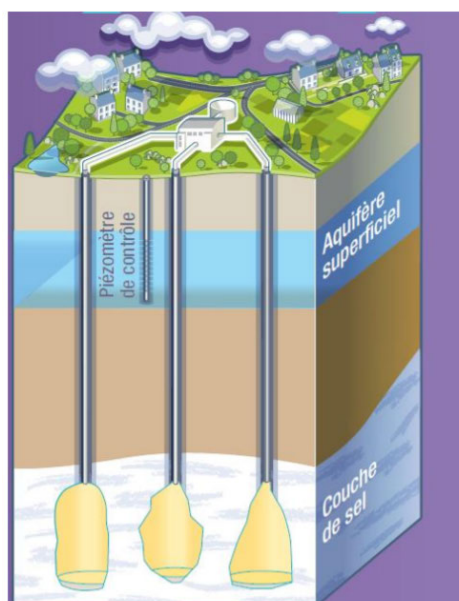
Le stockage souterrain est envisagé dans les infrastructures H₂ de grande ampleur (Dorsale Européenne), sur le modèle du gaz naturel. Plusieurs technologies sont à l'étude (complémentaires selon leur localisation, maturité...). Le stockage souterrain est une solution envisagée sur plusieurs projets en France dans certaines zones géologiques particulières et selon les besoins des territoires.

Typologie :

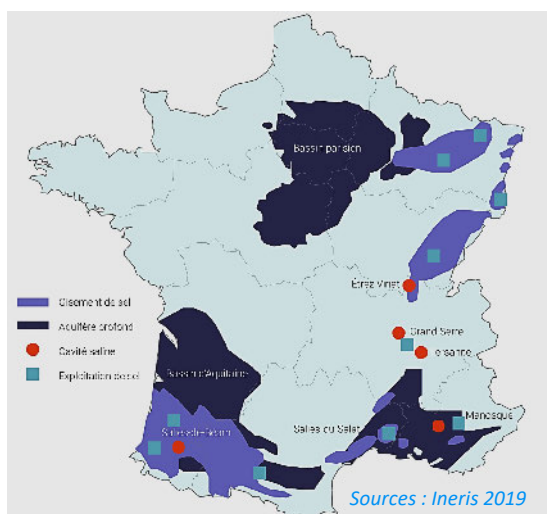
- Cavité saline : En développement avec premiers pilotes
- Champs déplété ou aquifère : premiers pilotes d'ici 3 ans – 5 ans (Données fournisseurs)
- Cavités minées revêtues : ~ 10 ans (Données fournisseurs)

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

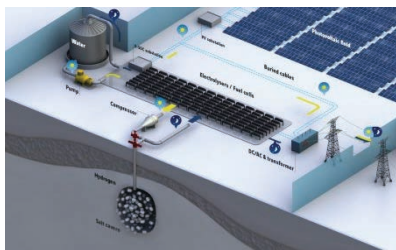
- Maitrise des risques et impacts, INERIS, 2019
- Perspective Européenne, Gas infrastructure Europe, Juin 2021,

Stockage massif

Cavité saline



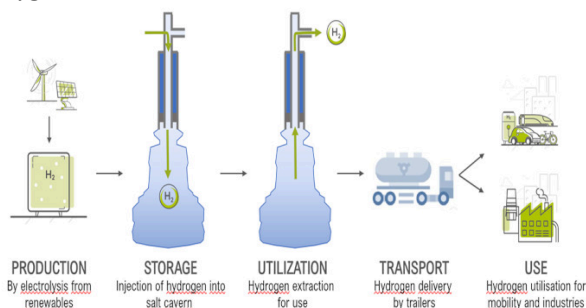
Solution : Services pour le stockage sous-terrain H₂
Etudes R&D, ingénierie. Supervision construction.
Assistance à l'exploitation ou exploitation
Caractéristique : Cavité saline
Projets : R&D et démonstrateurs industriels
[Rstock-H](#), [FluidStory](#), [Stopil H₂](#),
[Hystories](#) (aquifère ou champs déplété),
HygreenProvence,



Source : Geostock



Solution :
Opérateur / investisseur de stockage sous-terrain H₂
Services pour le stockage sous-terrain H₂ pour tiers
Caractéristique : Cavité saline
Projets : R&D et démonstrateurs industriels :
Stopil H₂, [Hypster](#) (capacité totale de la cavité : 44 t),
HygreenProvence



Source : Storengy



Solution :
Opérateur / investisseur de stockage
sous-terrain H₂
Caractéristique : Cavité saline
Projets : R&D et démonstrateurs industriels :
[Hygeo](#), Lacq H₂



Stockage par vecteurs chimiques



Stockage

Vecteur chimique

Les vecteurs chimiques permettent de 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 : methylcyclohexane). 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.

Ces vecteurs sont des liquides porteurs d'hydrogène, Liquid Hydrogen Carrier (LHC), pouvant être de type organique (LOHC) ou à base de silicium. Le transport par voie liquide, souvent à pression et température ambiante, est plus simple à mettre en œuvre que le transport de gaz comprimé. C'est pourquoi les LHC se prêtent bien à ce mode de transport. 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, Méthanol / CO₂
- Vecteur Silicium : Hydrosil (HysiLabs)
- Également ammoniac (NH₃)

Densité :

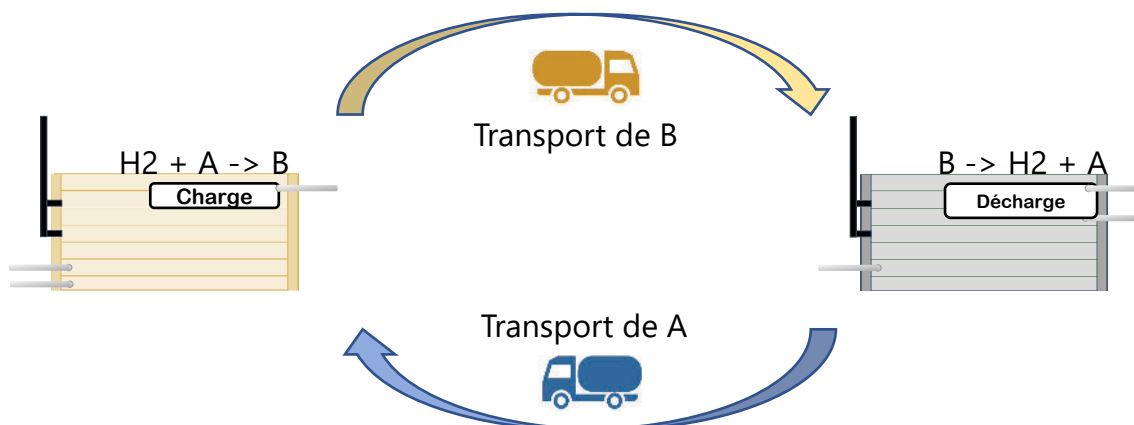
- **LOHC** : A pression atmosphérique à 20 °C : **57 kg/m³**
- **Hydrosil** : A pression atmosphérique à 20 °C : **100 kg/m³**

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 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

Stockage

Vecteur chimique



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 : Hysilabs



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

 Entreprise française

 Entreprise Européenne

 Usine en France

Transport

H₂



Sommaire



Transport

Transport : Principes généraux 72

Transport par voie routière 75

Transport par hydrogénoducs 79

Transport par voie maritime 82



Transport

Principes généraux

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

100
kg

Transport sous pression par camion

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



Crédit: Linde

1
tonne

Transport liquide par camion

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



Crédit: Air Liquide

10
tonnes
et +

Transport par hydrogénoducs

L'hydrogène est transporté sous forme gazeuse à travers des conduites dédiées. Des hydrogénoducs 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 support (silicium, huiles, ammoniac, etc). Cette association permet de transporter l'hydrogène sous forme de liquide à pression et température ambiante sans conditionnement particulier (camion citerne classique). Ces technologies sont en cours de maturation et seront commercialisables d'ici à 3 ans (cf. **Stockage Vecteurs chimiques**)

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

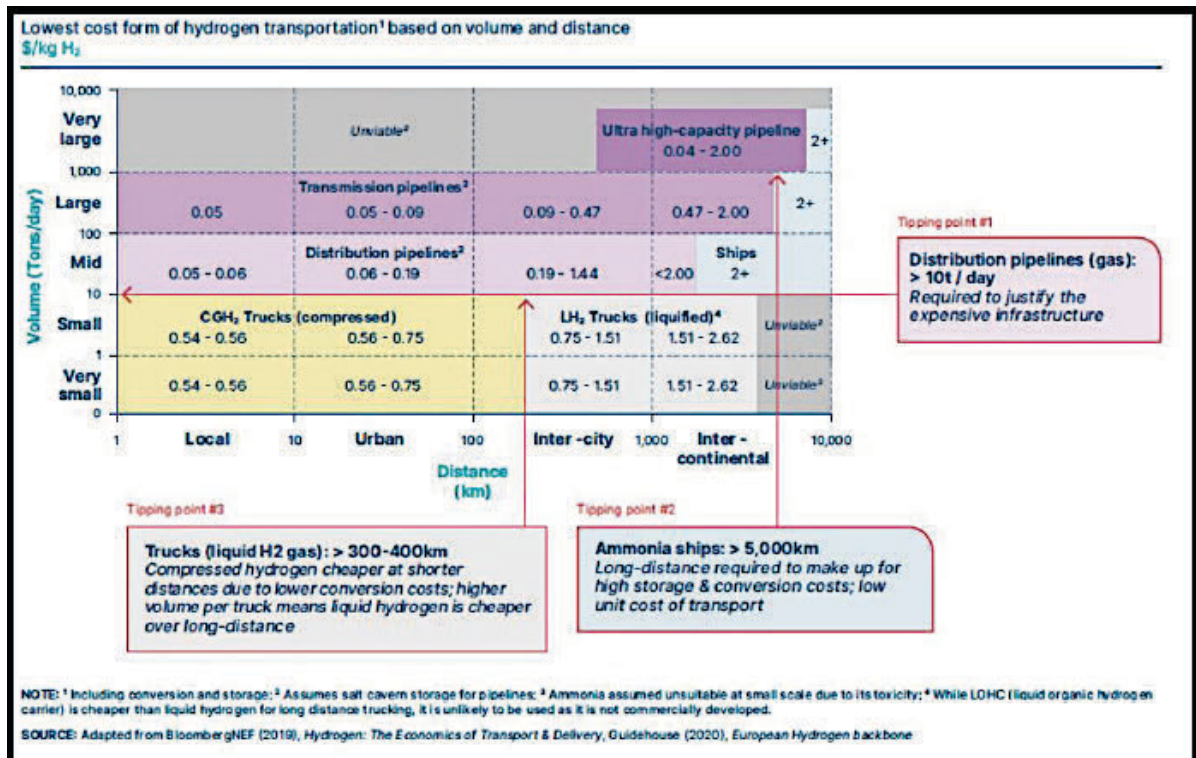
Transport par pipeline *(Source Bloomberg 2019 et Hydrogen Backbone)*

- **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

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

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

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



Principe de réapprovisionnement en stockage gazeux

Typologie :

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



Source : cadre de bouteilles Linde



Source : Tubes trailer CYE energy

Caractéristiques :

- Livraison : locale à internationale
- Longueur : remorque 20 pieds à 40 pieds
- Masse utile : jusqu'à 900 – 1000 kg
- Pression haute : 300 b, 500 b en développement
- Coûts : 0,2 à 3 €/kg H₂ pour un rayon inférieur à 500 km



Source : Tube de stockage Kawasaki

Bibliographie utile

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

Transport par voie routière

Ces groupes d'experts gaziers

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

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

Le type d'approvisionnement dépend de différents paramètres dont :

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



Type de stockage :

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



Type de stockage :

- Gazeux (bouteilles et cadre de bouteilles, tube trailers)
- Cryogénique



Type de stockage :

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

Transport par voie routière

Les acteurs du secteur



Type de stockage :

- Gazeux (bouteilles)
- Cryogénique

Source Ullit



Type de stockage :

- Gaz industriels et médicaux

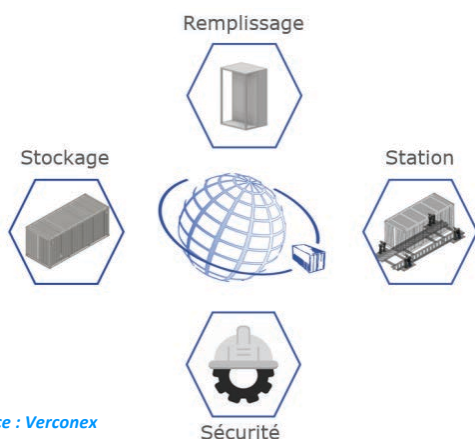
Source : Calvera



VERNCONEX

Type de stockage :

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



Source : Verconex



Transport par hydrogénoducs



Hydrogénoducs

Principes généraux

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

Typologie :

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

Caractéristiques :

- Débit type : Pression typiquement autour de 50-80 bar
- Quantité d'H₂ adressée : Intérêt du pipeline pour un transport supérieur à 10 tonnes/jour pour justifier les coûts d'infrastructure



Ex. Tube de stockage Kawasaki

Caractéristiques :

- Structure et diamètre du pipeline
- Les coûts opérationnels pourront être plus élevés pour les diamètres plus faibles: 0.11-0.21 €/kg H₂ pour un diamètre de 50 à 100 cm et 0.09-0.17 €/kg H₂ pour un diamètre de 120 cm (sources : *Hydrogen Backbone*)
- Utilisation ou non d'infrastructures déjà existantes
- Effets d'échelle sur les futurs volumes installés

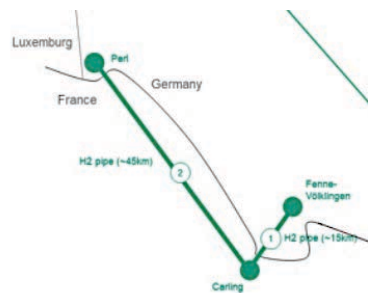
Hydrogénoducs



Solution : Opérateur / investisseur de réseaux de transport de H₂ sur son domaine géographique (France hors Sud-ouest)

- Services pour le transport H₂ pour tiers (distance, débit à voir)

Projets : [Mosahyc](#) (70 km, 20 000 m³/h, 100% H₂, réseau partiellement converti du Gaz naturel au H₂), Dorsale Européenne H₂ (backbone)



Source : GRTgaz



Solution : Opérateur / investisseur de réseaux de transport de H₂ sur son domaine géographique (Sud ouest)

- Services pour le transport H₂ pour tiers (distance, débit à voir)

Projets: Lacq H₂, Dorsale Européenne H₂ (backbone)



Source : Hydrogen Europe/Hydrogen for a European Green Deal



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

Projets : HyBalance



Source : Air Liquide



Transport par voie maritime



Transport par voie maritime

Principes généraux

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

Typologie :

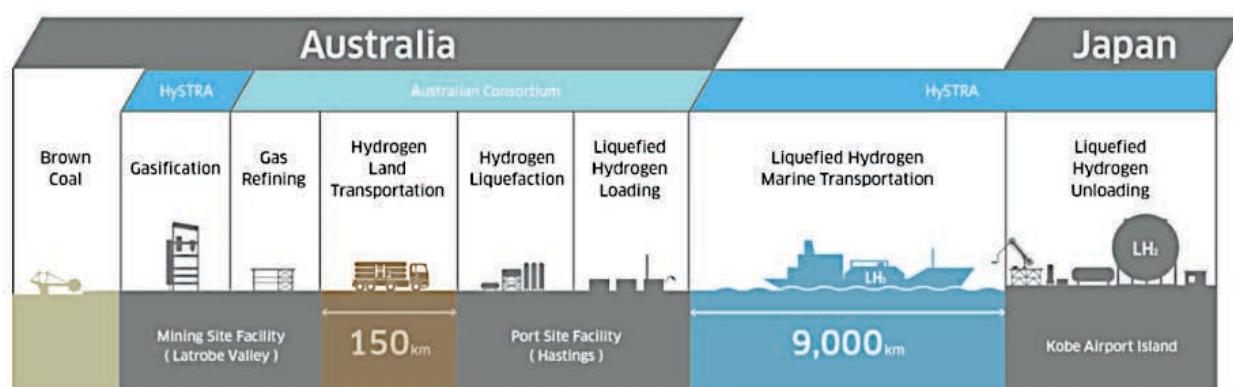
Peu d'export aujourd'hui mais de grands corridors vont naître avec de grands hubs internationaux avec la nécessité de transporter beaucoup d'hydrogène d'un pays à un autre



LH2 tanker « Suiso Frontier » de Kawasaki

Projets :

Approvisionnement du Japon par l'Australie : Un premier bateau de transport d'hydrogène liquide a vu le jour en 2020, le « Suiso Frontier », long de 116m pour 1250 m³ d'hydrogène à l'état liquide et un tonnage brut du navire de 8 000 tonnes



Source : H2mobile

Distribution

H₂

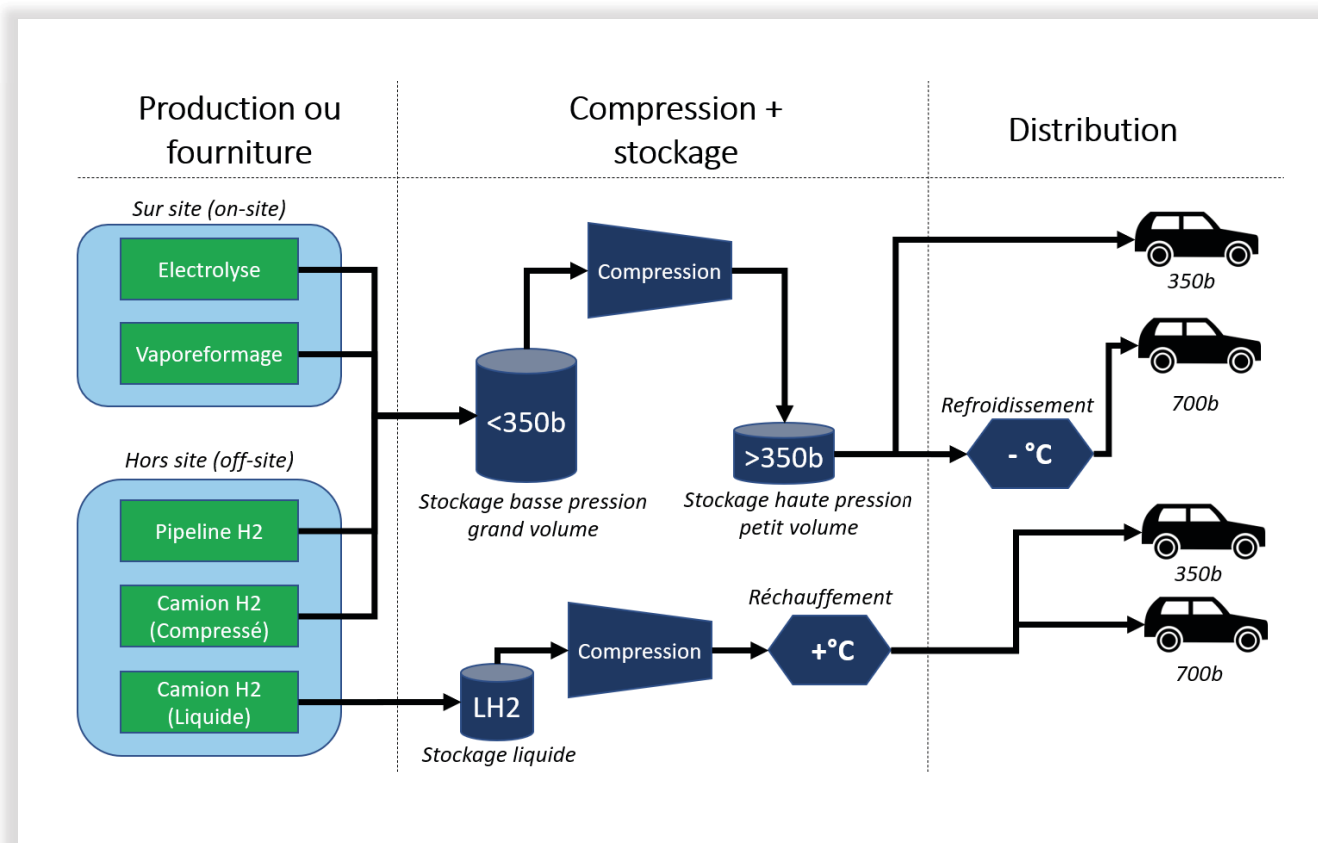


Distribution

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 à ce jour une cinquantaine de stations opérationnelles, elle fait ainsi partie des pays européens les plus actifs avec l'Allemagne dans le déploiement des infrastructures de distribution.

Typologie :



Source : EnerKa Conseil

Distribution

Aspects technico-économiques

Aspects économiques :

Les coûts des stations dépendent de leur utilisation ainsi que :

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

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

(Source : Mobilité Hydrogène France, Element Energy)

Décomposition des coûts d'une station de distribution

Hydrogène délivré	CAPEX	OPEX
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

Les acteurs du secteur



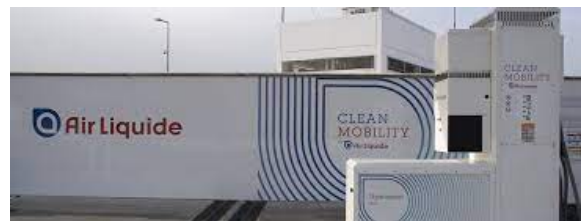
Application : Mobilité
(Poids lourds, bus, véhicules légers et trains)
Capacité de remplissage : 100 à 500 kg/j
Pression adressée : 350, 700 bar



Source HRS



Applications : Poids lourds, bus, véhicules légers
Capacité de remplissage : Jusqu'à 1 000 kg/jour
(20 rechargements journaliers de camions 44t)
Pression adressée : 700 bar



Source : Air liquide



Applications : Poids lourds, bus, véhicules légers et engins spéciaux
Capacité de remplissage :

- Compactes de 1 à 6 kg/jour
- Fixes évolutives de 100 à 500 kg/jour
- Mobiles jusqu'à 200 kg/jour

Pression adressée : 300 bar, 350 bar et 700 bar



Source Ataway



Driving clean energy forward



McFilling
Application : mobilité
Capacité de remplissage :

- Starter Kit : 20 kg/j à 350 bar
- McFilling de 200 kg à 1 000 kg/j, à 350 et/ou 700 bar
- Augmented McFilling à partir de 2 t/j

Pression adressée : 350 et/ou 700 bar



Source : McPhy

Stations hydrogène

Les acteurs du secteur



Applications : Tout type de véhicules terrestre et maritime avec stations multi énergies
Capacité de remplissage : 5 à 200 kg/j selon les stations



Source : Proviridis



Application : Mobilité
(Poids lourds, bus, véhicules légers)
Capacité de remplissage : 200 kg /j
Pression adressée : 350, 700 bar



Source : Air Products



Application : Mobilité (VL, PL, ferroviaire) en gaz et liquide
Capacité remplissage : 28 à 140 kg/j (1,8 t/j prévu pour le ferroviaire)
Pression adressée : 350 bar et 900 bar et liquide



Source : Linde



Application : Mobilité
(Poids lourds, bus, véhicules légers)
Capacité de remplissage : 200 à 570 kg/j
Pression adressée : 350, 700 bar



Source : ITM Power

Stations hydrogène

Les acteurs du secteur

TOSHIBA

Application : Mobilité

Capacité de remplissage : 5 kg H₂/j

Pression adressée : 700 bar max



Source Toshiba

nel



Application : Poids lourds, bus, véhicules légers et trains

Capacité de remplissage : jusqu'à 120 kg/h pour 2 500 kg/j



Source : NEL

Haskel



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

Capacité de remplissage : 90 à 200 kg/j



Source : Haskel



CALVERA

Gas Technology



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

Capacité de remplissage : Selon les besoins.
Exemple de station déjà en place : 500 kg/jour à Barcelone

Pression adressée : 350, 700 bar



Source : Calvera

Stations hydrogène

Les acteurs du secteur



Horizon de commercialisation : 2022



Source : Hynion



Capacité de remplissage : Jusqu'à 20 kg/j
Pression : 350 bar 700



Source : Reo 74



PRF
GÁS, TECNOLOGIA E CONSTRUÇÃO, SA

PRF Solution

Station portable

Capacité de remplissage : NC

Pression : NC



Source : PRF Solution



Capacité de remplissage : Jusqu'à 100 kg/j
Pression : 350 et 700 bar



Source : Resato



Entreprise française



Entreprise Européenne



Usine en France

Stations hydrogène

Les acteurs du secteur



Capacité de remplissage : 120 kg/j

Pression : 350 bar



Source : Wystrach

Usages

H₂



Sommaire



Usages

Mobilité

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

95

Applications portuaires

- Equipements portuaires
- Equipements flottants

121

Aéronautique

- Avions et taxis volants
- Drones

129

Ferroviaire

133

Engins spéciaux

135

Production d'énergie

- Connecté au réseau
- Hors réseau

142

Conversion du CO₂

- Méthanation biologique
- Méthanation catalytique

154



Mobilité



Mobilité

Principes généraux

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

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

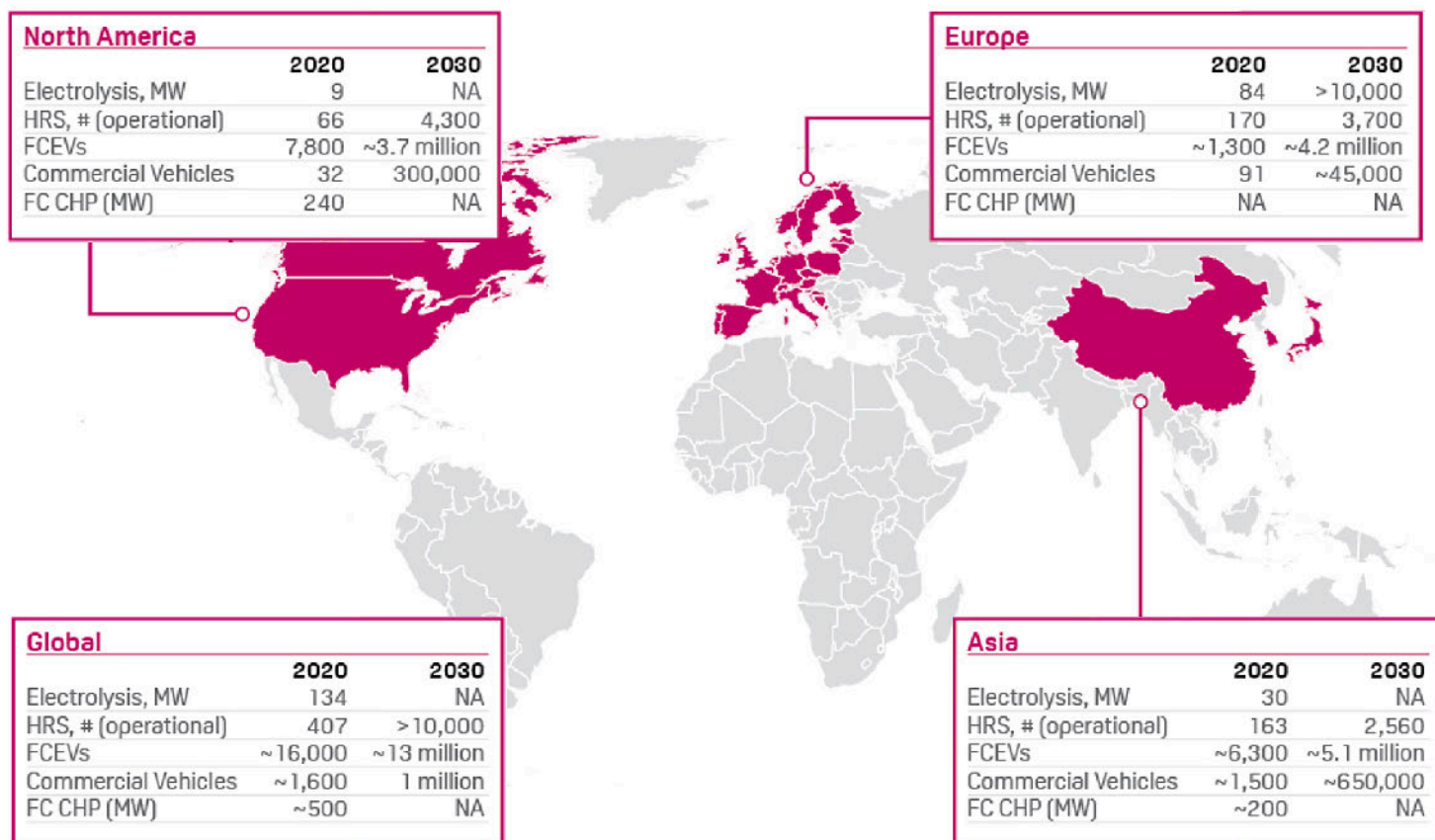
Une autre voie technologique consiste à utiliser un **moteur à combustion interne** (MCI). Comme un moteur fonctionnant au GNV, l'hydrogène est injecté puis **brûlé** au sein du moteur. Il s'agit alors d'un **véhicule thermique**. En comparaison à une motorisation diesel, les MCI H₂ n'émettent pas de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

Il est également possible **d'adapter des véhicules thermiques** à l'usage de l'hydrogène. On parle alors de **rétrofit**. 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

Cette catégorie regroupe des véhicules type berline. Etant donné la stratégie de déploiement de l'hydrogène, ces voitures adressent 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) :

Env. 1 kg H₂ / 100 km

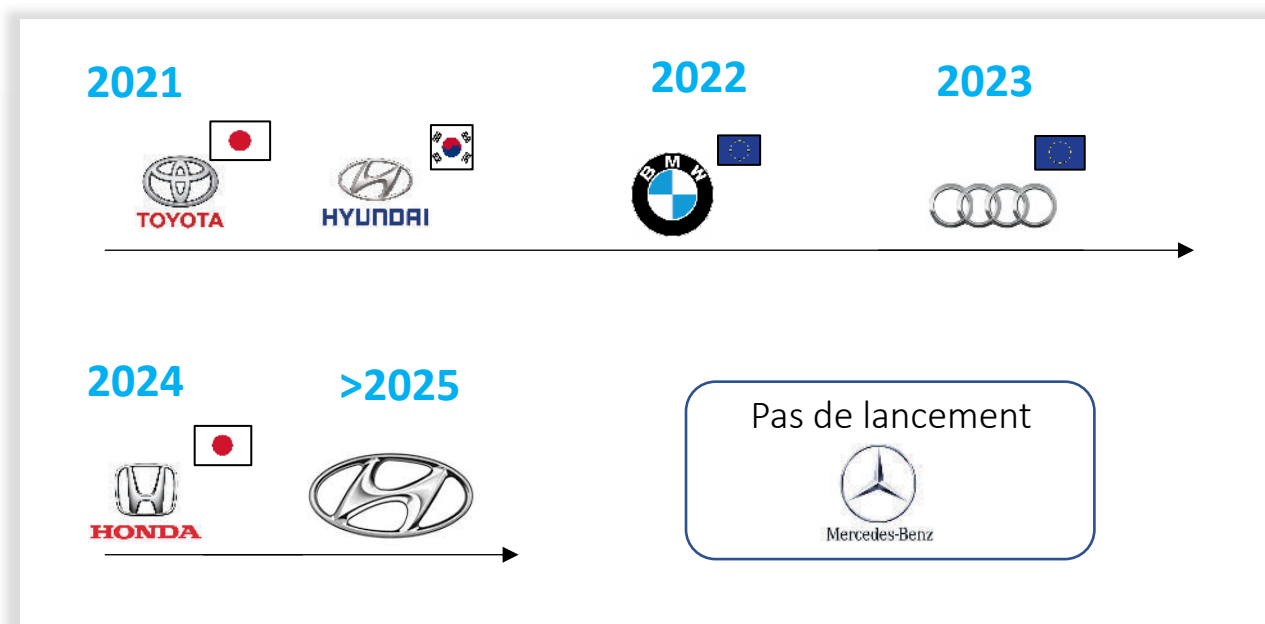
Avantage sur la batterie : Autonomie supérieure et temps de recharge réduit (5 min)

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

Véhicules Légers VL



TOYOTA



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



HYUNDAI



Nexo

Autonomie : 600 km

Typologie : Véhicule PEMFC

Date de commercialisation : 2020



H-Tron quattro concept

Typologie : Véhicule PEMFC

Commercialisation : 2022-2023



Mobilité

Véhicules Légers VL



I Hydrogen NEXT

Typologie : Véhicule PEMFC

Commercialisation : 2022 (petite série),
grande série 2025



Range Rover

Typologie : Véhicule PEMFC

Date de commercialisation : 2025+



Warrego

Autonomie : 650 km

Typologie : Véhicule PEMFC

Commercialisation : 2022



Hopium

Autonomie : 1 000 km

Typologie : Véhicule PEMFC

Commercialisation : 2026



Mobilité

Véhicules Légers VL



Grove

Autonomie : 1 000 km

Typologie : Véhicule PEMFC

Commercialisation : 2025



Viritech

Autonomie : NC

Typologie : Véhicule PàC H₂

Commercialisation : 2022



Mobilité

Véhicules Utilitaires Légers – PTAC ≤ 3,5t

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 (NOx, CO₂, particules fines)

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

Plusieurs acteurs ont annoncé des VUL entre 2021 et 2022 (seules les informations sur le véhicule proposé par HyVia figurant ci-après) :

The image displays logos for four companies: Stellantis (France), UlemCo (UK), Renault Group (France), and HyVia (France). To the right of the Stellantis logo is a box containing two icons: a flame icon labeled 'Moteur à combustion interne H₂' and a green circle icon labeled 'Retrofit'. Below the Renault Group logo is a box containing the text 'Pas d'information du constructeur' and the logos for Mercedes-Benz and Volkswagen.

Mobilité

Véhicules Utilitaires Légers – PTAC ≤ 3,5t



Joint Venture
Renault Group
Plug power



Kangoo ZE H2

Autonomie : 300 km

Typologie : Véhicule électrique (range extender)

Commercialisation : 2020



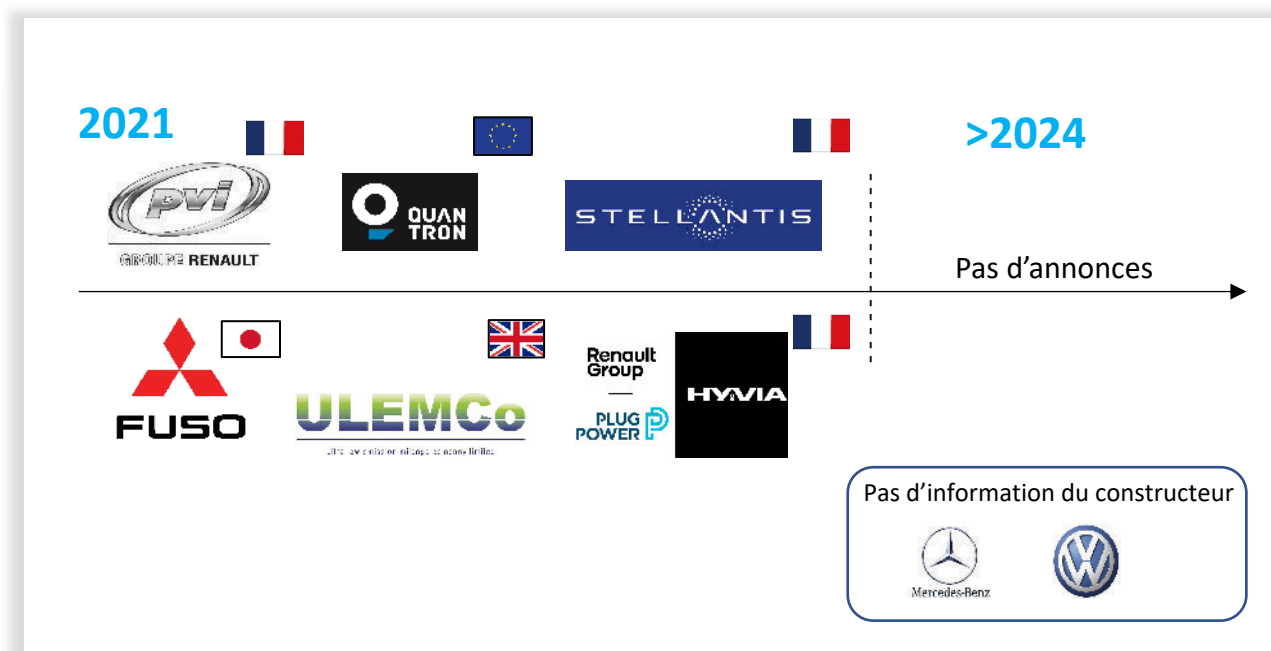
Mobilité

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).



Mobilité

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



GROUPE RENAULT



Fourgon Master H2

Autonomie estimée : 300 à 500 km

PTAC : 4,5t

Typologie : Véhicule électrique
(range extender)

Commercialisation : 2022



Joint venture
Renault Group
Plug power



Master City Bus H2-TECH

Autonomie réelle : 300 km

Typologie : Véhicule PEMFC

Capacité de transport : 15 passagers

Commercialisation : 2022



Joint venture
Renault Group
Plug power



Master Van H2-TECH

Autonomie réelle : 500 km

Typologie : Véhicule PEMFC

Volume de chargement : 12 m³

Commercialisation : 2022



Joint venture
Renault Group
Plug power



Master Châssis Cab H2-TECH

Autonomie réelle : 300 km

Typologie : Véhicule PEMFC

Volume de chargement : 19 m³

Commercialisation : 2022



Mobilité

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



Peugeot Expert hydrogène

Autonomie réelle : 300 km

Typologie : Véhicule mid power PEMFC/batteries

Capacité de transport : 15 passagers

Commercialisation : fin 2021



Citroën e-Jumpy Hydrogen

Autonomie réelle : 400 km

Typologie : Véhicule mid power PEMFC/batteries

Commercialisation : fin 2021



Opel Vivaro-e Hydrogen

Autonomie réelle : 400 km

Typologie : Véhicule mid power PEMFC/batteries

Volume de chargement : 6,1m³

Commercialisation : fin 2021



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



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



Daily

Autonomie : 500 km

PTAC : 3,5t à 7,5t

Typologie : Véhicule PEMFC

Commercialisation : 2021 / non disponible sur le marché français



Vision F-Cell

Autonomie estimée : 270 – 300 km

PTAC : 7,5t

Typologie : Véhicule PEMFC

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



Mobilité

Bus

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

Consommation moyenne : Env. 9 - 10 kg 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, ...



Mobilité

Bus

Safra



Businova H2

Autonomie : 350 km & 450 km
(avec range extender)

Typologie : Véhicule PàC 100% H₂
ou Véhicule électrique (range extender)

Energie / Puissance : Batterie 130 kWh ;
PEMFC 30 kW

Date de commercialisation : 2019



VANHOOL



Van Hool A330FC

Autonomie : 350 km

Typologie : Véhicule PEMFC

Energie / Puissance : Batterie 24-36
kWh ; PàC 85 kW

Commercialisation : 2020



VANHOOL



Van Hool EQUI.CITY FC

Autonomie : 350 km

Typologie : Véhicule PEMFC

Puissance : PAC 100 kWh

Commercialisation : 2020



CaetanoBus



Caetano H2.CITY GOLD

Autonomie : 400 km

Typologie : Véhicule PEMFC

Energie / Puissance : Batterie 180 kWh ; PàC
H₂ 70 kW

Commercialisation : 2021



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



Bus H2 – Articulé

Autonomie : 520 km

Typologie : Véhicule PEMFC

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



Bus H2 – Double étage

Autonomie : 310 km

Typologie : Véhicule PEMFC

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



Urbino H2

Autonomie : 400 km

Typologie : Véhicule PàC H₂

Energie / Puissance : Batterie 180 kWh ; PEMFC 70 kW

Commercialisation : 2020



Mobilité

Bus



H2.0

Autonomie : 300 km

Typologie : Véhicule PEMFC



Mobilité

Autocars

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

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

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

Le kit a été installé par IBF H₂. La start-up a bénéficié du concours de la société d'ingénierie automobile IAV. Le moteur diesel et la boîte de vitesses sont remplacés par un moteur électrique, une pile à combustible, une batterie et des réservoirs à hydrogène (placés sous le plancher). La capacité du véhicule en nombre de passagers pouvant être transportés n'est pas modifiée.

Le nouvel autocar à hydrogène circulera **fin 2021 à vide, puis en 2022 avec des voyageurs à bord** sur la ligne régionale Nomad Car express Evreux-Rouen.

Un projet de retrofit de 15 autocars est également mené par Safra et porté par la région Occitanie dans le cadre du programme Corridor H₂.

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



Mobilité

Bennes à ordures ménagères (BOM)

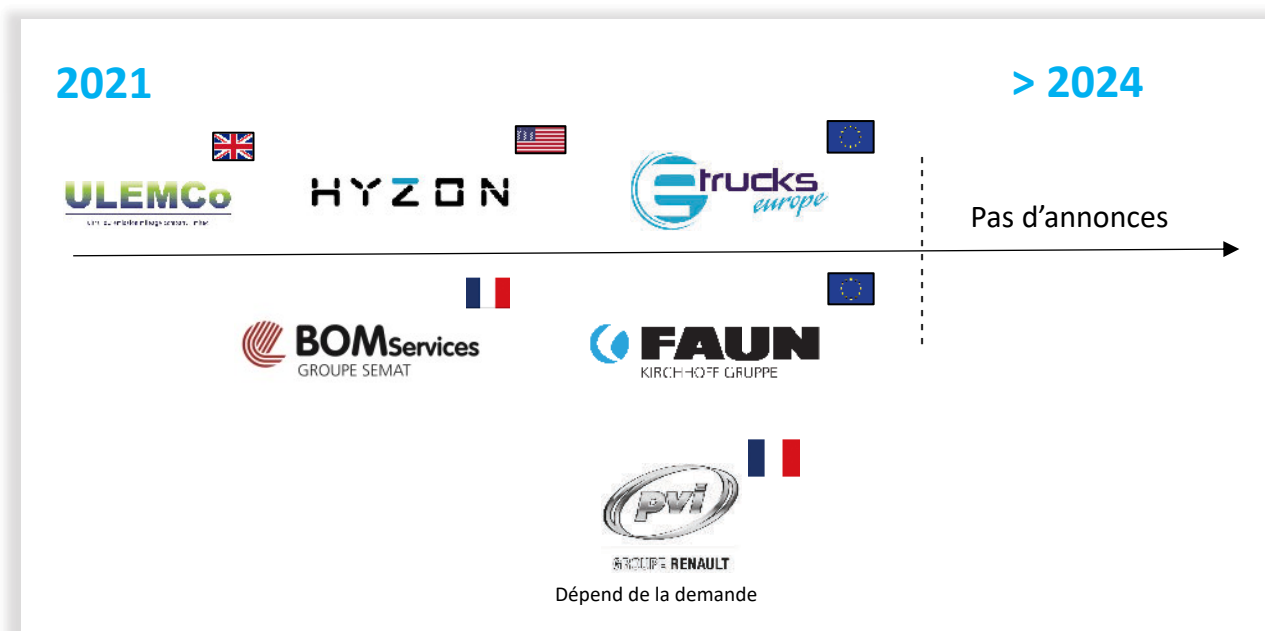
7,5t ≤ PTAC ≤ 32t


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

Consommation moyenne : 11 - 15 kg 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 (NO_x, 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



GROUPE RENAULT

C-less H2

Autonomie : 150 – 200 km

Typologie : Véhicule électrique (range extender)

Commercialisation : 2022



ULEMCo

ultra low emission mileage company limited



Ulemco - DAF

Typologie : Véhicule thermique (dual fuel H₂ – diesel)

Commercialisation : 2019



HYZON

Typologie : Véhicule PEMFC

Commercialisation : 2021



Mobilité

Bennes à ordures ménagères $7,5t \leq PTAC \leq 32t$



BLUEPOWER

Autonomie : 560 km

Typologie : Véhicule électrique
(range extender)



E-Trucks

Autonomie : 400 km

Typologie : Véhicule électrique
(range extender)



Mobilité

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

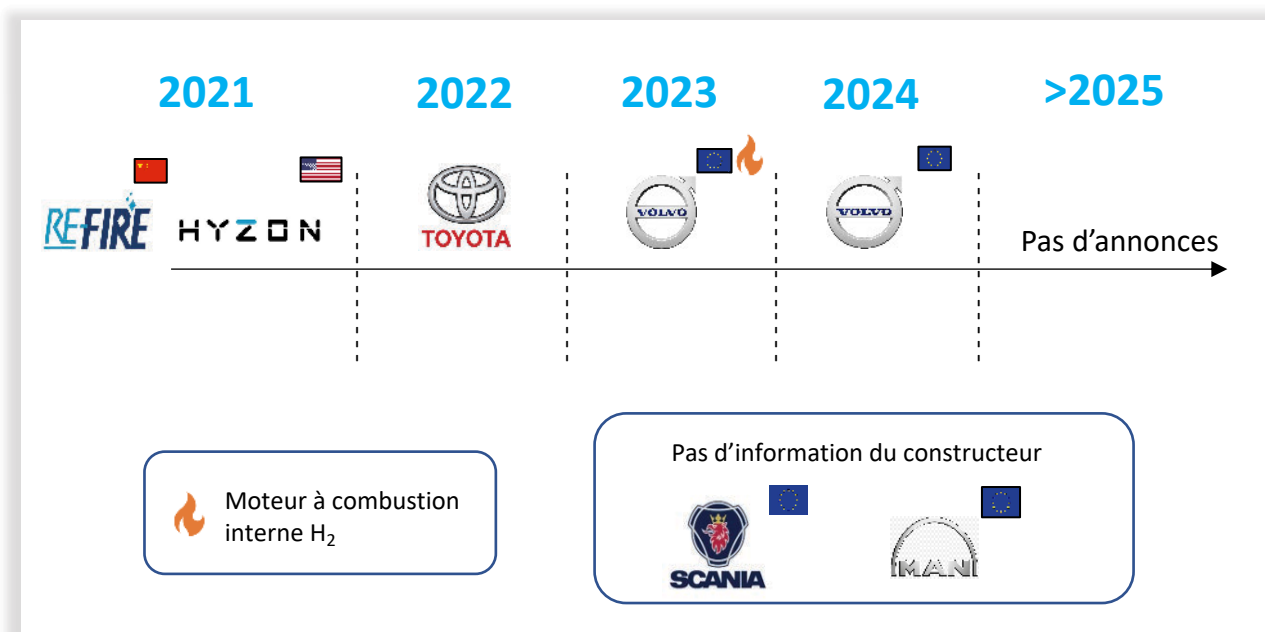
Ce segment regroupe les véhicules routiers destinés au transport de marchandises longue distance sur le réseau national voire européen. Les camions porteurs peuvent permettre de circuler en centre ville pour assurer les livraisons en **logistique du dernier kilomètre** (Livraison des restaurants, supermarché...).


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

 Rétrofit

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)



Volvo

Autonomie : env. 500 km

Charge utile : 19 à 26 t (combiné)

Typologie : Véhicule thermique

Commercialisation : Projets démonstrateurs en 2022



Volvo

Autonomie : NC

Charge utile : > 26 t (combiné)

Typologie : Véhicule PEMFC

Commercialisation : Pilote en 2024



HYZON

HyMax-250 châssis


Autonomie : 600 km

Charge utile : 25 t

Typologie : véhicule PEMFC

Commercialisation : 2022



 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



REFIRE

Dongfeng - ReFire

Autonomie : 300 – 350 km

Charge utile : 3,2 t

Typologie : véhicule PEMFC

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



Mobilité

Poids lourds : Heavy Duty > 32 t

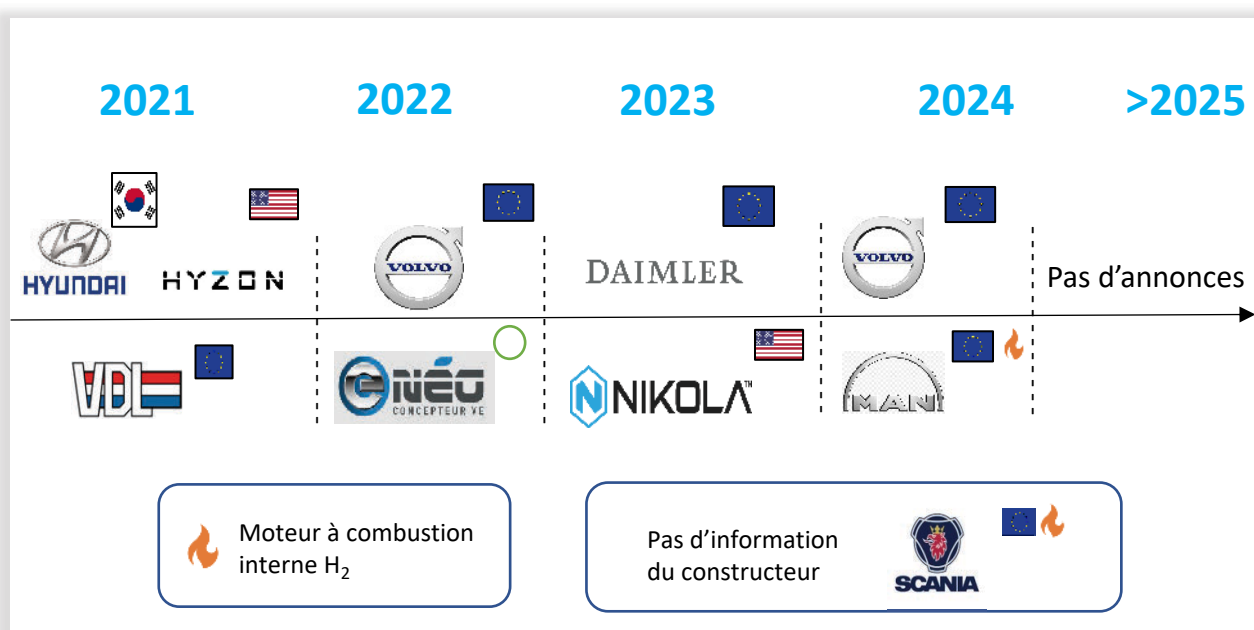
La mobilité lourde est une des pistes prometteuses pour le développement de l'hydrogène. Il permet de décarboner les flottes tout en autorisant des autonomies proches des motorisations diesel. Ce segment assure des livraisons long courrier à l'échelle nationale, internationale ou assure le transport 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



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)



PL – rétrofit H2

Autonomie : 400 km

Charge utile : 40 t

Typologie : véhicule PEMFC

Commercialisation : 2022



HYZON

HyMax-450 Puller

Autonomie : 200 - 500 km

Charge utile : NC

Typologie : véhicule PEMFC

Commercialisation : 2021



HYZON

Hymax-250 Puller

Autonomie : 200 - 500 km

Charge utile : NC

Typologie : Véhicule PEMFC

Commercialisation : 2021



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



Tre

Autonomie : 1000 km
Charge utile : 26 t (combiné)
Typologie : Véhicule PEMFC
Commercialisation : 2023



DAIMLER



Mercedes-Benz GenH2

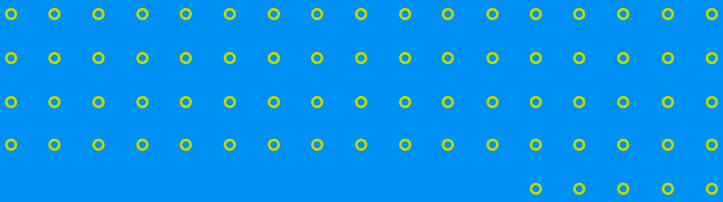
Autonomie : 1 000 km
Charge utile : 25 t
Typologie : véhicule PEMFC
Commercialisation : Production série 2025-2028 (Essais clients 2023)



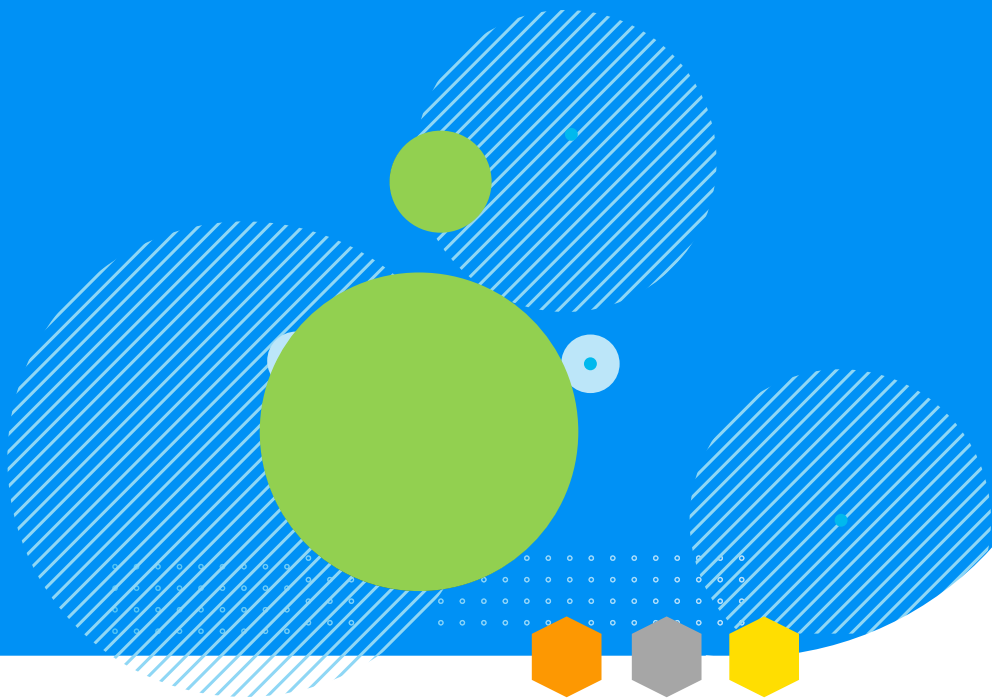
VDL

Autonomie : 350 - 400 km
Charge utile : 27 t
Typologie : Véhicule PEMFC
Commercialisation : NC
Phase de démonstration depuis début 2020





Applications portuaires



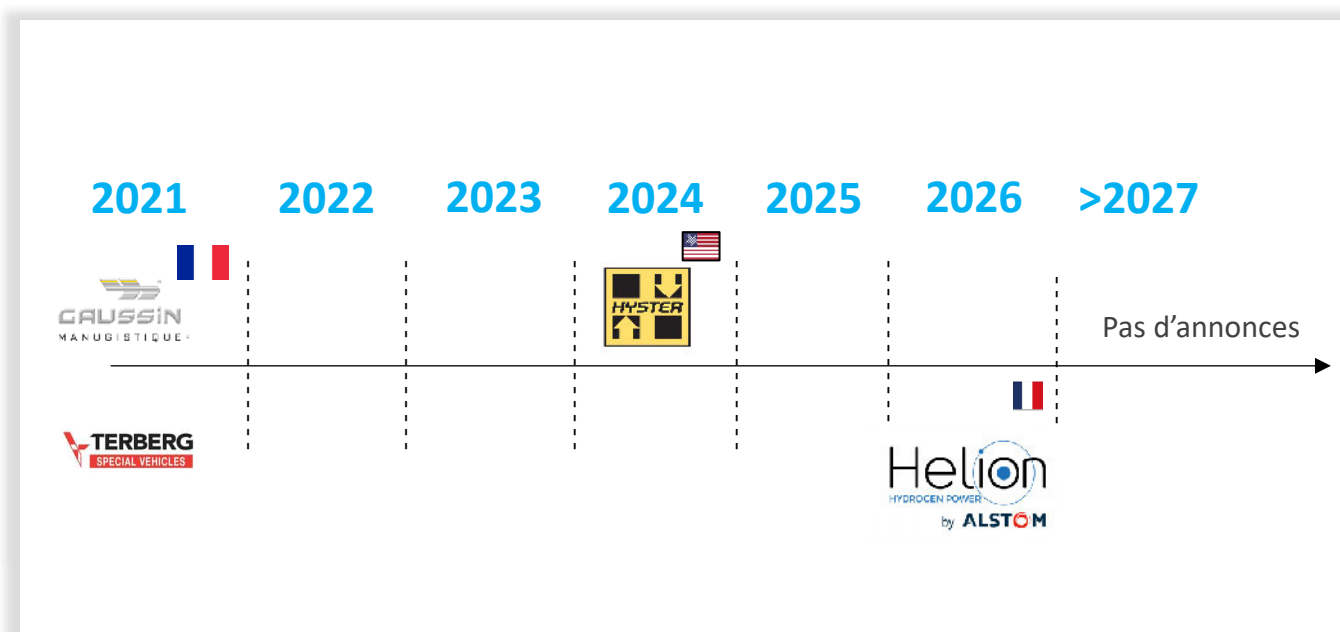
Applications portuaires

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)



Applications portuaires

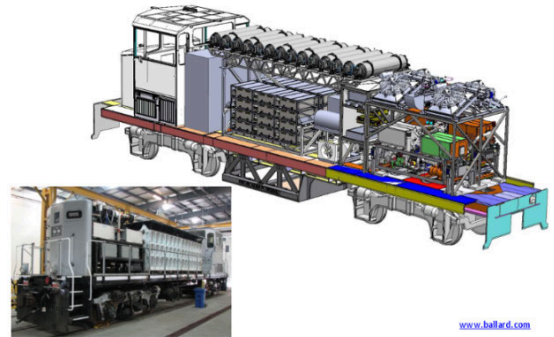
Equipements au sol



Transport de conteneur (APM)
Consommation : 8 – 10 kg / jour
Autonomie : 8 à 10h
Commercialisation : 2021



Locomotive de manœuvre
 Alstom et Hélion
Consommation : 60 kg / jour
Autonomie : 2 - 3 jours
Maturité : Etude



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



Transport de conteneur
Maturité : En test au port de Rotterdam



Applications portuaires

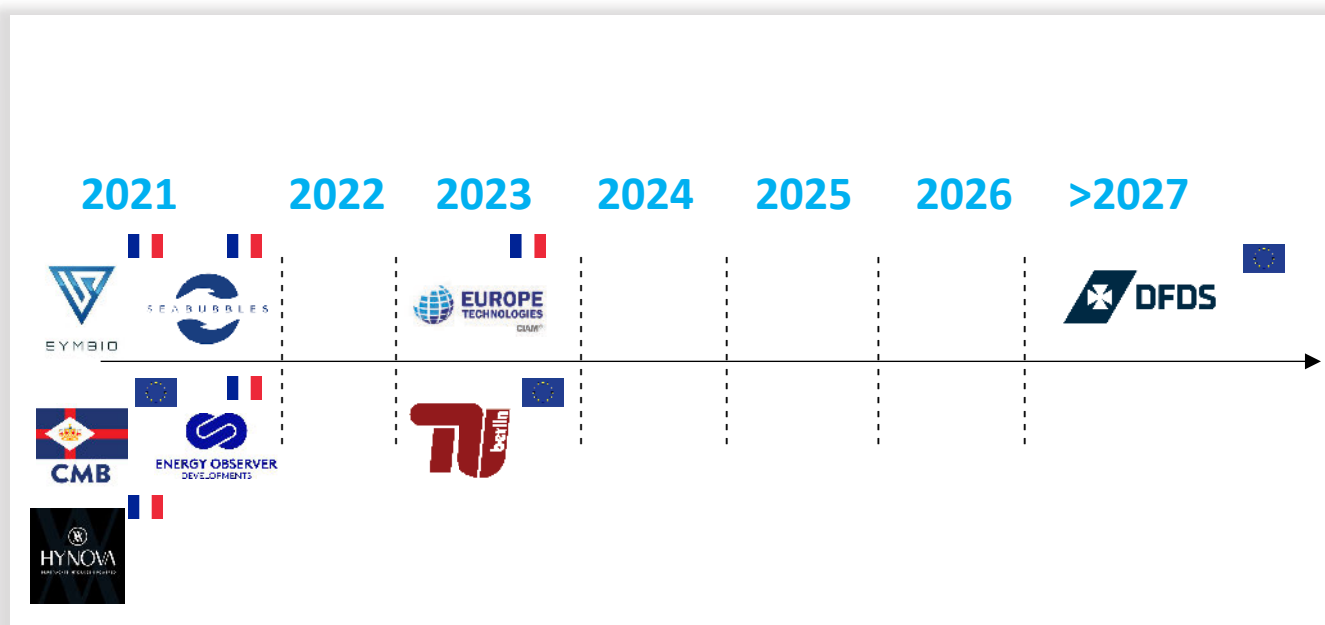
Éléments flottants

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.).



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 : ??



SYMBIO



Navette

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



Source : ??



HYLIAS

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



Source : ??



HYNova

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



Source : www.ballard.com

Applications portuaires

Éléments flottants



Station Ship hydrogène

Station de production et de distribution d'hydrogène tout intégré.
 Capte l'eau du port et raccordement électrique
Capacité de production : 250 kg H₂ / jour
 (= 10 bus)
Stockage : 90 à 250 kg H₂
Distribution : 2 dispensers jusqu'à 400 bars
Typologie : Station mobile électrique
Maturité : Prototype livré fin 2021



Source : Energy Observer



Hyseas

navette hydrogène
Capacité : 200 personnes
Typologie : véhicule PEMFC
Maturité : Commercialisé 2022

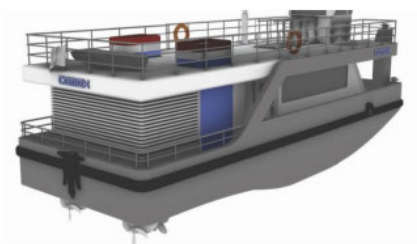


Source : Hyseas energy



Bateau pousseur

Typologie : Véhicule PEMFC
Consommation : 200 kg/jour
Maturité : Projet démonstrateur CEMEX (Paris)



Source : ??



Navette, cargo, ferry

Capacité : 50 à 150 passagers
 ou 20 tonnes de marchandises
Typologie : Véhicule PEMFC
Maturité : Premier déploiement en 2023



Source : ??

Applications portuaires

Éléments flottants

BUBBLEFLY 



Bubblefly

Navette

Capacité : 6 à 32 passagers

Typologie : Véhicule PEMFC

Maturité : Premier déploiement en 2022



Remorqueur

Typologie : Hybride

(moteur combustion interne hydrogène + diesel et PAC)

Maturité : Projet démonstrateur HydroTug (Port d'Anvers)



Zesst

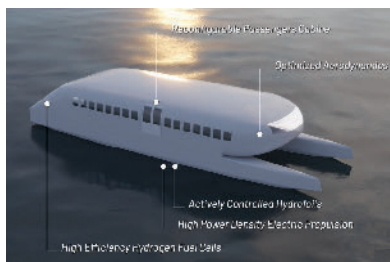
Navette

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

Typologie : Véhicule PEMFC

Autonomie : 100 km

Maturité : Premier déploiement en 2025



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

Applications portuaires

Éléments flottants



Pousseur

Bateau pousseur ou remorqueur

Typologie véhicule : véhicule PEMFC

Autonomie : NC

Commercialisation : NC

Maturité : Projet démonstrateur Electra (Allemagne)



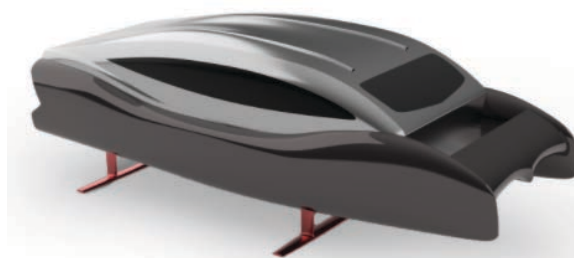
Mobyfly

Navette

Capacité : 12 à 300 passagers

Typologie : Véhicule PEMFC

Maturité : Premier déploiement en 2022



Hyrex

Navette

Capacité : 6 à 32 passagers

Typologie : Véhicule PEMFC

Autonomie : 25 h

Maturité : Premier déploiement en 2022



Aéronautique

Aéronautique

Avion et taxi volant

AIRBUS



Airbus

Type : Avion

Application : Transport jusqu'à 200 passagers

Programme : programme ZEROe

Maturité : premiers déploiements en 2035



Avions Mauboussin

Type : Avions à propulsion hybride et hydrogène

Application : transport de passagers : 2

Hydrogène utilisé : 700 bar

Maturité : premiers déploiements en 2025



Blue Spirit Aero

Type : Avions légers (de 4 à 8 places)

Hydrogène utilisé : Gazeux à 700 bars

Maturité : 2026

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



Aéronautique

Avion et taxi volant

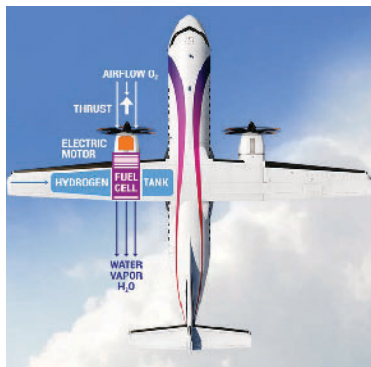


Zero Avia

Type : Avion

Application : transport pour 10 à 20 passagers

Maturité: premier déploiement en 2024



Aéronautique

Drone

H3Dynamics



H3Dynamics

Autonomie : Entre 30 min à 3h pour 2kg

Hydrogène utilisé : Hydrogène liquide

Maturité : Fin 2021



DELAIR

AERIAL INTELLIGENCE



Delair

Type : Pile à combustible à cathode ouverte

Solution en plug and play

Applications : Industrie et sécurité

Maturité : 2022





Ferroviaire



Ferroviaire Train

ALSTOM



Alstom Régiolis

Typologie : Bimode pour le Régiolis

Maturité : Essais en 2023

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



DB SIEMENS



Deutsche Bahn Energy en partenariat avec Siemens (Mireo H)

Typologie : 100% hydrogène

Maturité : Essais en 2024



SIEMENS

STADLER



Stadler rail

FLIRT H2

Capacité : 108 sièges

Typologie : 100% hydrogène

Maturité : Essais en 2025





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.



Engins spéciaux

Mobilité légère



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

Acteurs en Europe : Rytle, Atena Scarl

Autonomie : 100-150 km

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

Poids : ≈20-25 kg

Maturité : commercialisé



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



Entreprise française

Entreprise Européenne

Usine en France

Engins spéciaux

Mobilité légère



ull a. cw emission m. kage co rpany l mited

Balayeuse sur châssis DAF

Acteurs en France : **E-Neo**

Acteurs en Europe : **Ulemco**

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



ull a. cw emission m. kage co rpany l mited

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).



 Entreprise française

 Entreprise Européenne

 Usine en France

Engins spéciaux

Pinotti



Acteurs en France : **CM DUPON**

Autonomie : 6 à 7 h

Commercialisation : estimée à 2025

Maturité : prototype



JCB



Pelleteuse 20 t électrique hydrogène

Maturité : prototype



JCB



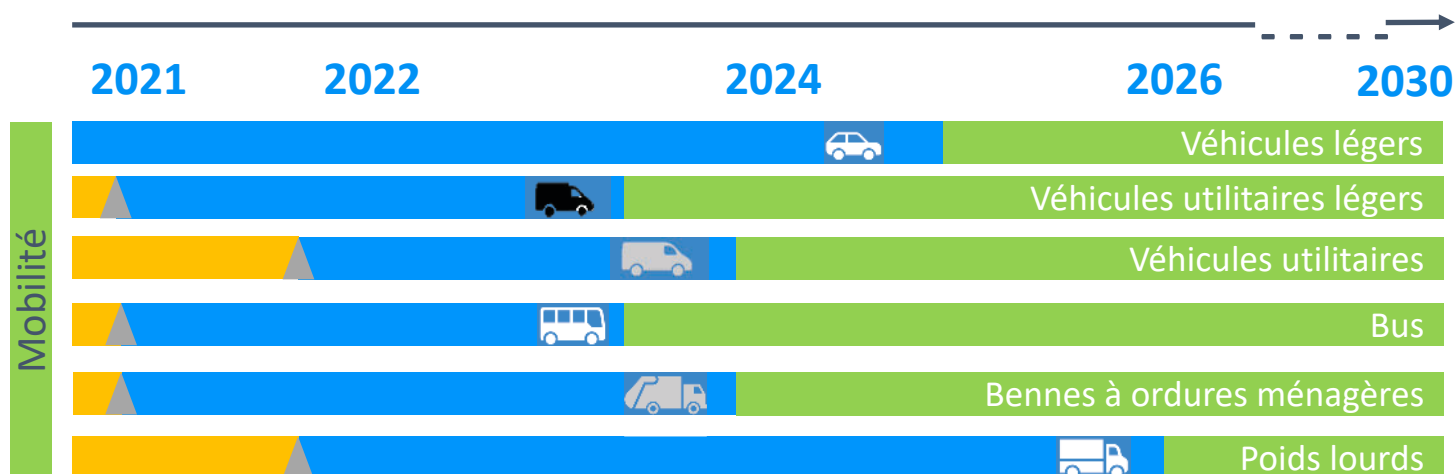
Tractopelle thermique hydrogène

Maturité : prototype



Synthèse sur la mobilité

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





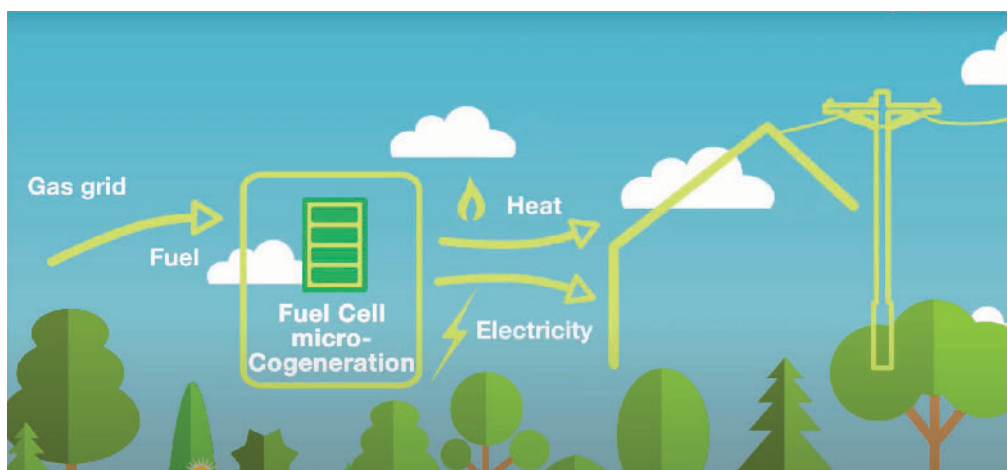
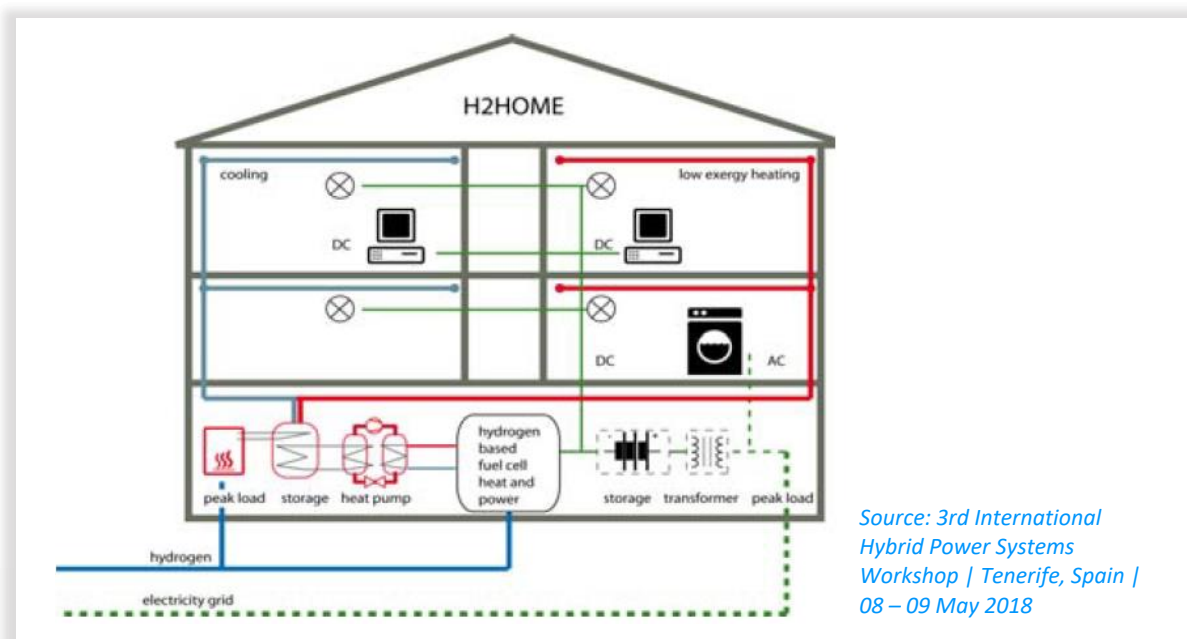
Production d'énergie Connectée au réseau



Production d'énergie Connectée au réseau

Les piles à combustible présentent un potentiel pour **décarboner et améliorer** la flexibilité du **réseau**. Pour maximiser leur potentiel de décarbonation, la **micro-cogénération** est une technologie qui permet de produire de la **chaleur** et de **l'électricité** pour le **bâtiment tertiaire** ou **l'habitat** (individuel ou collectif), à partir d'**hydrogène** et d'une pile à combustible. Cette réaction produit naturellement de la chaleur qui peut être valorisée via un ballon de stockage thermique pour **l'eau chaude sanitaire** ou pour du **chauffage aérothermique** (air chaud).

Le bon rendement des technologies à micro-cogénération font d'elles un excellent système de chauffage pour faire des **économies d'énergie**. La **production d'électricité** est un second atout qui amène vers **l'autoconsommation**.

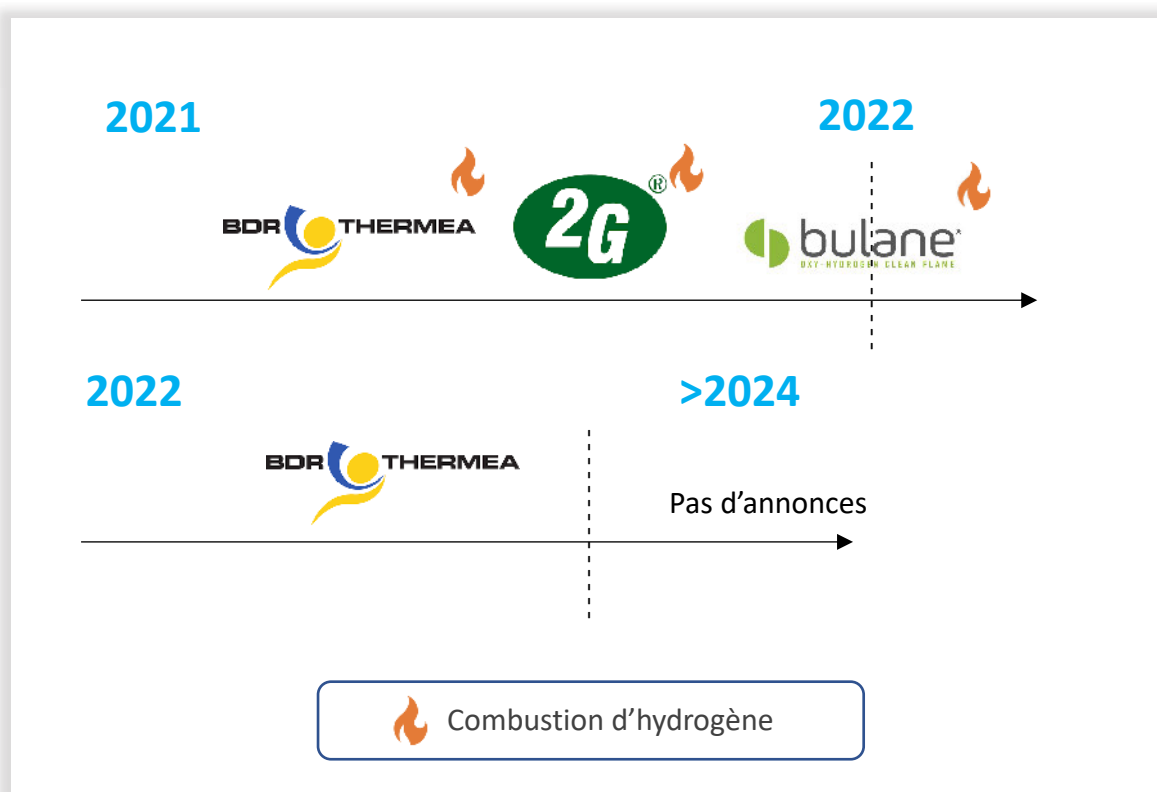


Production d'énergie Connectée au réseau

Ce segment regroupe la **production d'énergie** à partir d'une source **d'hydrogène** et comprend l'utilisation de **pile à combustible** ainsi que l'adaptation de solutions existantes (**chaudière à condensation**). L'alimentation peut se faire directement par le **réseau de gaz naturel** avec un reformage intégré pour n'injecter que de l'hydrogène au système. L'approvisionnement en hydrogène peut également se faire sur **un réseau local fermé**. Certains fabricants préparent leurs produits pour être **compatibles** avec un approvisionnement **100% hydrogène** sur le réseau de gaz naturel.

Ce type d'installation permet **la production d'électricité** tout en fournissant de la **chaleur** mais il n'est pas toujours possible de le substituer à un contrat de fourniture d'électricité ainsi qu'à une chaudière conventionnelle. Le dimensionnement se fait sur la production d'électricité ou de chauffage mais il n'est pas toujours envisageable de produire suffisamment pour couvrir les deux besoins. Certaines solutions peuvent quant à elles remplacer l'utilisation d'une chaudière. (Pas de production d'électricité)

Notions de coûts : Il n'est pas possible de donner une valeur moyenne sur ce segment car les solutions ont chacune des applications spécifiques avec des performances différentes en fonction de l'installation. De plus, certains de ces systèmes sont des projets pilotes ou démonstrateurs dont le coût n'a pas été communiqué.



Production d'énergie Connectée au réseau



LP2H – Bulane

Le système peut brûler jusqu'à 20% d'hydrogène sur tous types de chaudière.

Applications : Industrie et habitat (individuel et collectif)

Maturité : Essai en laboratoire, démonstration en 2021 dans l'industrie et le résidentiel



Source : Bulane



Gamma Fuel Cell

Fabricant : Baxi Innotech

Applications : Habitat

Fonction : Chauffage et électricité

Maturité : Prototype



Source : BDR Thermea



eLecta 300

Fabricant : Remeha

Applications : Habitat

Fonction : Chauffage

Pile à combustible :

PEM

Maturité :

Démonstrateur



Source : BDR Thermea



energie.anders.leben



Dachs 0.8

Fabricant : SenerTec

Applications : Habitat

Fonction : Chauffage

Pile à combustible :

PEM

Maturité :

Démonstrateur



Source : BDR Thermea

Entreprise française

Entreprise Européenne

Usine en France

Production d'énergie Connectée au réseau



Agenitor H2

Fabricant : 2G

Applications : Industrie

Fonction : Chaleur et d'électricité

Maturité : Prêt pour retrofit



Source : 2G



BDR Thermea

Homologués **aujourd'hui** jusqu'à **20%** d'hydrogène, ces modèles pourraient atteindre à terme **100% d'hydrogène**.

Applications : Habitat collectif (28kW), individuel , tertiaire

Fonction : Chauffage

Maturité : Premier déploiement en France en 2021



Source : BDR Thermea



H₂hydroGEM

Applications : Habitat

Fonction : Chaleur

Puissance fournie : Max 5,36 kW

Maturité : En développement



Source : NC

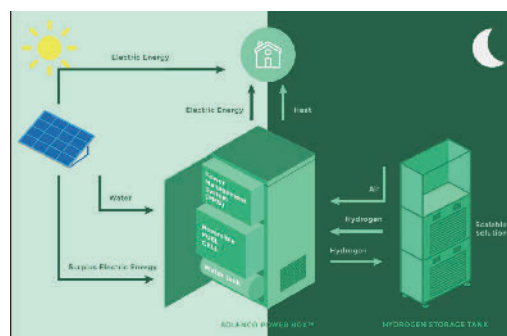


Solenco Power Box

Applications : Habitat

Fonction : Chaleur et d'électricité

Maturité : En développement



Source : NC



Production d'énergie Connectée au réseau



Lavo System

Applications : Habitat

Fonction : Electricité

Fourniture : 40 kWh

Maturité :

Commercialisé



Source : ??



Production d'énergie Hors réseau



Production d'énergie

Hors réseau

Ce segment regroupe la **production d'énergie** à partir d'une source d'hydrogène sur des sites **non connectés au réseau**. L'hydrogène peut permettre de **décarboner ces sites** non connectés au réseau électrique. En site isolé, on retrouve principalement une production d'électricité à partir **d'énergies renouvelables** couplée à un **stockage** par l'intermédiaire de **l'hydrogène**, plus adapté que la batterie pour un **stockage à « long terme »**. En effet, il permet de stocker de **grandes quantités d'énergie** en occupant un espace moindre en comparaison aux batteries.

Notions de coûts : Il n'est pas possible de donner une valeur moyenne sur ce segment car les solutions ont chacune des applications spécifiques avec des performances différentes. Le coût de telles solutions est supérieur à une solution thermique conventionnelle de type groupe électrogène diesel qui sera une source de pollution sonore et atmosphérique.



Production d'énergie Hors réseau

Sylfen



Solution permettant de produire de l'électricité autoconsommée à l'aide d'énergie renouvelable et où la chaleur est valorisée. Elle remplace l'usage d'une chaudière conventionnelle. Cette solution a la particularité d'être équipée d'un système réversible permettant de jouer le rôle de pile à combustible et d'électrolyseur.

Type d'application : Collectif, tertiaire, public
Production : Chaleur + électricité
Maturité : Premiers déploiements / prototype



Source : Sylfen

Powidian
POWER IN ALL MERIDIANS



Solutions de production d'énergie en site isolé, alimentation de secours. Cette solution permet de remplacer l'installation de groupe électrogène thermique et vient en complément d'une installation d'énergie renouvelable.

Type d'application : Alimentation de secours, site isolé (maison au site industriel)
Production : Electricité
Production électrique : > 100 kW, possibilité d'aller au MW mais contrainte réglementaire pour stockage
Maturité : Commercialisé



Source : Powidian

hps



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

Type d'application : Individuel, collectif
Production : ECS + électricité + ventilation
Production électrique continue : 1,5 kW
Maturité : Commercialisé



Source : NC

TOSHIBA

H2One propose une solution complète nommée H2Rex pour produire de l'hydrogène par électrolyse. L'hydrogène produit est stocké puis utilisé pour des applications industrielles et de mobilité, ou est converti en électricité et en chaleur via une pile à combustible pour des applications stationnaires.

Type d'application : Logement individuel, collectif, tertiaire
Production : Electricité + chaleur
Puissance installation : 0,7 kW – 1 MW
Maturité : Commercialisé



Source : NC

Production d'énergie

Hors réseau - Groupe électrogène

Les groupes électrogènes 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'évènementiel où leur avantage réside dans l'absence de bruit et l'absence d'émission de particules et autres polluants.



Applications : Evènementiel, alimentation de secours

Production : Electricité

Puissance installation : 30 – 70 kW

Autonomie : 3h30 à 100%, 8h à 50% (30 kW)

Consommation d'hydrogène : 1 kgH₂ / h (30 kW)

Maturité : Commercialisé



Applications: Alimentation de secours, évènementiel

Production : Electricité

Puissance installation : 110 & 220 kW

Autonomie : 45 – 65 h (110 kW)



Applications: Site isolé, alimentation de secours

Production : Electricité

Puissance installation : 80 kW

Consommation d'hydrogène : 4 kg/h

Autonomie : 8 h à 50%

Maturité : V1 commercialisé, V2 en 2021



Production d'énergie

Hors réseau - Groupe électrogène



Groupe mobile

Application : Site isolé, évènementiel, chantier

Production : Electricité

Puissance installation : 0,5 – 8 kW

Consommation d'hydrogène : Env 2 kg/h

Maturité : Commercialisé



Source : H2Sys



Groupe mobile

Application : Site isolé, alimentation de secours forte puissance, industrie

Production : Electricité par combustion

Puissance installation : 15 à 90 kW

Maturité : Commercialisé



Source : H2Sys

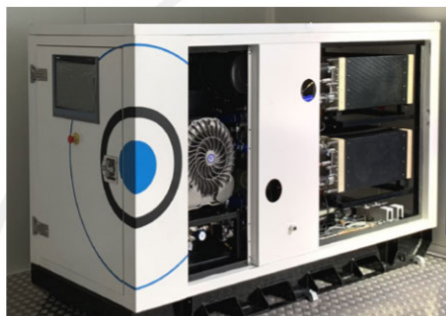


FCR

Application (marché adressé) : Stationnaire

Puissance installation : 70-2000 kW

Maturité : Commercialisée en 2021



Source : Alstom



Progen Systems

Application (marché adressé) : Microgrid, stockage et backup de datacenter

Puissance installation : 100 kW – multiMW



Source : ??

Production d'énergie

Hors réseau - Groupe électrogène

BEHYDRO₂



Application : Site isolé, alimentation de secours forte puissance, industrie

Production : Electricité par combustion

Puissance installation : 2,5 MW

Maturité : prototype / phase d'essais



Source : ??

Bloomenergy®

Bloom Box

Application (marché adressé) : Stationnaire

Puissance installation : 300 W

Consommation d'hydrogène : 18,81 kg/h



Source : NC

Conversion du CO₂

Conversion du CO₂

Méthanation

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.

La conversion a un rendement global de l'ordre de 50 à 60% en 2021 (conversion de l'hydrogène et conversion en méthane)

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)

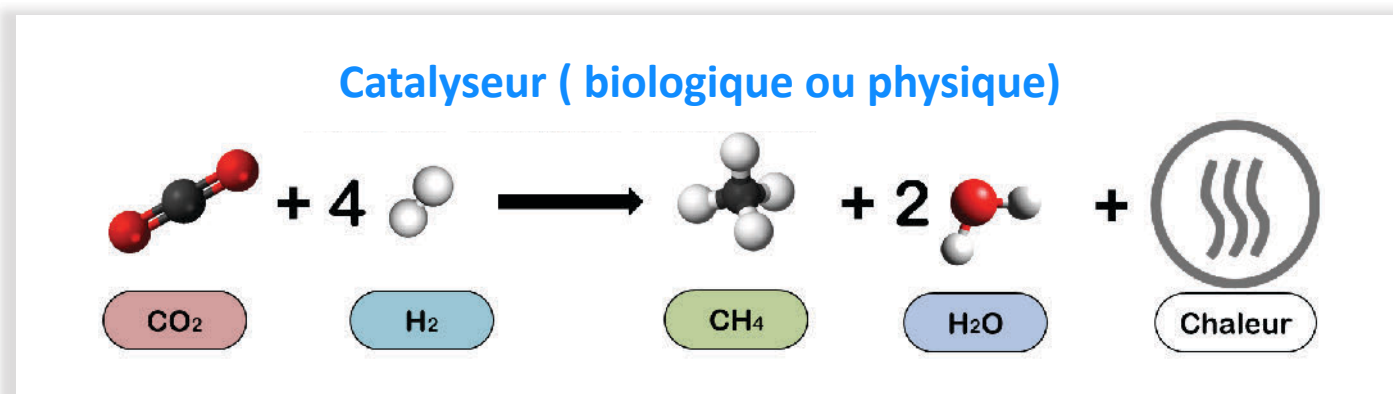
Projets :

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 Hyaunais (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.



Conversion du CO₂ Méthanation Biologique

KHIMOD
FILCEN



Solution :

- Fournisseur de réacteurs de méthanation, services et auxiliaires

Caractéristiques :

- Réacteur mili-structuré, modulaire

Projets :

- Jupiter 1000 (25 – 30 Nm³/h de SNG)
- Store&Go Troia (10 Nm³/h de SNG)
- Methycentre (12,5 Nm³/h de SNG)



Source : Khimod

enos

Solution :

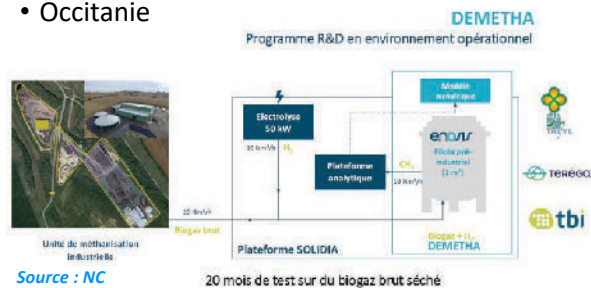
- Fournisseur de réacteur biologique et éleveurs de microorganismes

Caractéristiques :

- Microorganisme élevés (mix)
- Réacteur agité

Projets :

- Demetha (épuration de biogaz 10 Nm³/h, 50kWe électrolyse), avec Tryfil et Terega,
- Occitanie



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 réacteur biologique (Electrochaea)

Caractéristiques :

- Microorganismes sélectionnés (brevetés)
- Réacteur agité

Projets :

- Hycaunais (50Nm³/h de SNG, 1MW_e d'électrolyse, réacteur biologique Electrochaea),
- Columbus 75 MW_e (Wallonie)



Source : Electrochaea



Conversion du CO₂ Méthanation Biologique



MAN Energy Solutions



Solution:

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

Caractéristiques :

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

Projets :

- Audi 6,3 MW_e (325 Nm³/h SNG) , Werlte, 2011



Source : MAN-Es



Solution:

- Fournisseur de réacteur de méthanation (cœur de technologie) et services ingénierie

Caractéristiques :

- Réacteur Plasma froid

Projets :

- en cours de développement

Source : NC

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)
NO_x	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

.....

Thomas GAUBY, chargé de mission

.....

Rémi COURBUN, chargé de mission

.....

solutionsH2@france-hydrogene.org

.....

Réalisé avec



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

.....

Edition: Octobre 2021 - Textes : France Hydrogène
Crédits photos couverture :
Ataway, EODev, McPhy, Safra, Gaussin, Semat
Conception graphique - illustrations : © Cap Interactif agency