



La Filière Hydrogène

20 mai 2021

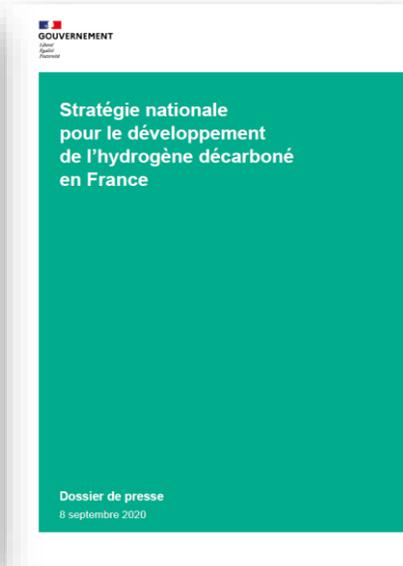
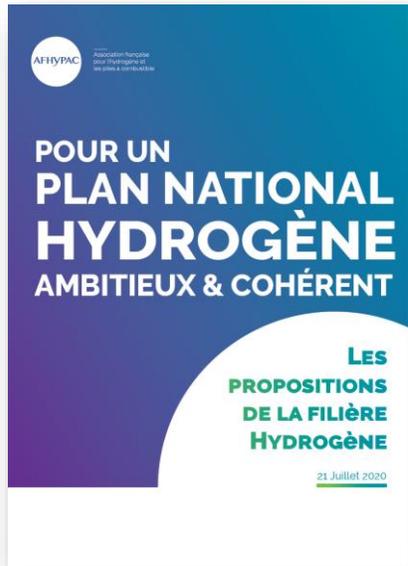
Thierry Priem

« Je crois que l'eau sera un jour employée comme combustible, que l'hydrogène et l'oxygène, qui la constituent, utilisés isolément ou simultanément, fourniront une source de chaleur et de lumière inépuisables et d'une intensité que la houille ne saurait avoir. »

Jules verne, l'île mystérieuse (1874)

L'hydrogène
une nouvelle
énergie pour
la planète



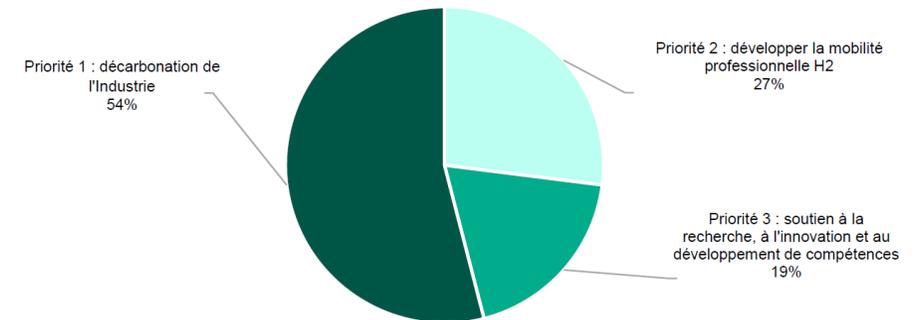


LES MESURES DU PLAN HYDROGÈNE

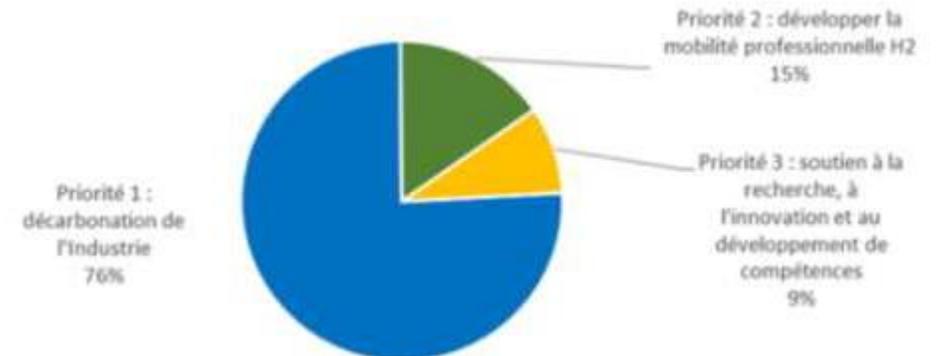
- Mise en place d'un budget de **7,2 Mds€ sur 2020-2030** dont **3,4 Mds€ sur 2020-2023**
- **3 priorités :**
 - Décarboner l'industrie en faisant émerger une **filière française de l'électrolyse : 6,5 GW d'électrolyseurs installés en 2030.**
 - Développer une **mobilité lourde** à l'hydrogène décarboné ;
 - Soutenir la **recherche, l'innovation et le développement** de compétences afin de favoriser les usages de demain.

Stratégie nationale pour le développement de l'hydrogène décarboné en France (septembre 2020)

Répartition des 3,4 Mds€ alloués sur la période 2020-2023



sur la période 2020-2030 (7,2 Md€)



French national hydrogen strategy: 3 main axis

1 Decarbonised and competitive H₂ for industry

Objective: Substitution of fossil H₂ by H₂ produced through electrolysis thanks to the emergence of a French electrolysis sector

- Projects allowing industrialisation of electrolyzers
- Demonstration and deployment of large size electrolyzers

6.5 GW of electrolysis installed by 2030

3 Prepare tomorrow's usages

Objective: support basic research, innovative demonstrators, development of key components, teaching and training of a skilled work force

- Implementation of a priority research programme Hydrogen
- Develop skills with a Campus of professions and qualifications dedicated to hydrogen

Creation of 50,000 to 150,000 jobs

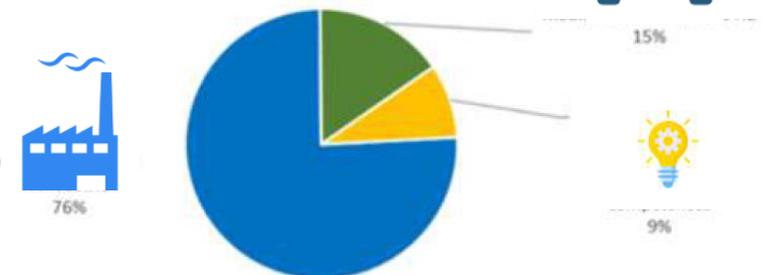
2 Professional decarbonised mobility

Objective: developing professional decarbonised mobility: Captive fleets and heavy duty vehicles

- Projects allowing industrialisation of key components for mobility
- Projects to develop territorial ecosystems (vehicles and infrastructure)

Save 6 Mt CO₂ by 2030

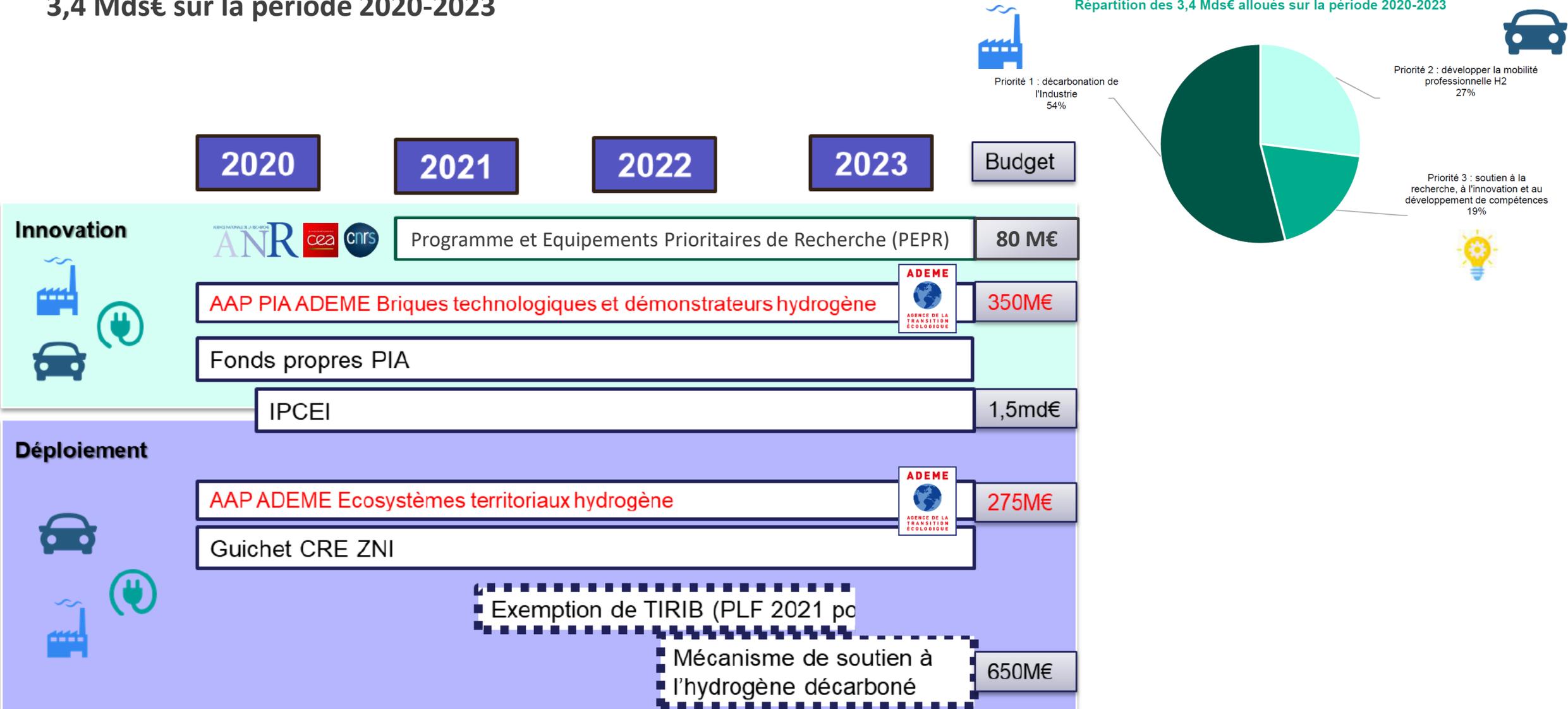
sur la période 2020-2030 (7,2 Md€)



This strategy will be carried out in cooperation with European partners.

3,4 Mds€ sur la période 2020-2023

Répartition des 3,4 Mds€ alloués sur la période 2020-2023



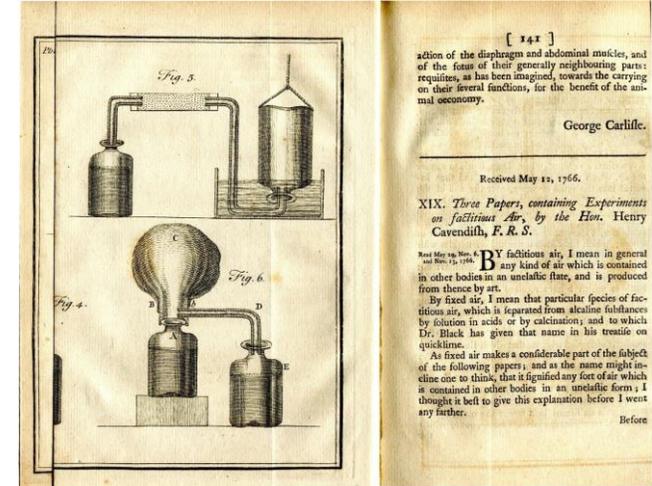
➡ 1766 :

Henry Cavendish (1731-1810) présente son mémoire « On Factitious Airs » (« Sur les airs factices »). Il y établit l'existence de gaz autres que l'air, et montre que l'« **inflammable air** » (« air inflammable ») qu'il a isolé le premier, pèse dix fois moins que l'air atmosphérique (« common air », « air commun »).



H. Cavendish

Henry Cavendish
(1731-1810)

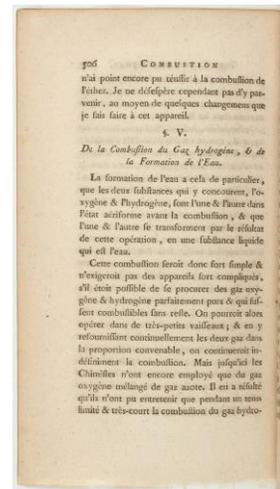
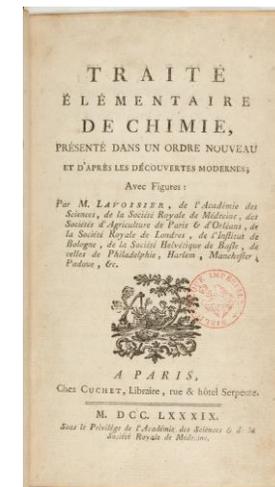


➡ 1783 :

Antoine Lavoisier (1743-1794) découvre que l'« air inflammable » de Cavendish, qu'il baptise **hydrogène** (du grec « formeur d'eau »), réagit avec l'oxygène pour former de l'eau.

https://fr.wikipedia.org/wiki/Histoire_de_la_production_d%27hydrog%C3%A8ne
<https://royalsocietypublishing.org/doi/pdf/10.1098/rstl.1766.0019>
<https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/btv1b8615746s/>

Antoine Lavoisier
(1743-1794)



➔ 1789 :

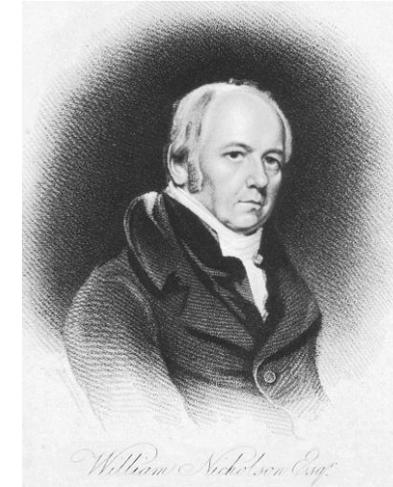
Jan Rudolph Deiman (1743-1808) et **Adriaan Paets van Troostwijk** (1752-1837) réalisent une électrolyse de l'eau en au moyen d'une machine électrostatique et d'une bouteille de Leyde sans réussir à interpréter la réaction observée.

➔ 1800 :

William Nicholson (1753-1815) et **Sir Anthony Carlisle** (1768-1842) réalisent la première électrolyse par courant continu.

➔ 1888 :

Dmitry Lachinov (1842-1902) développe une méthode de synthèse industrielle d'hydrogène et d'oxygène par électrolyse.

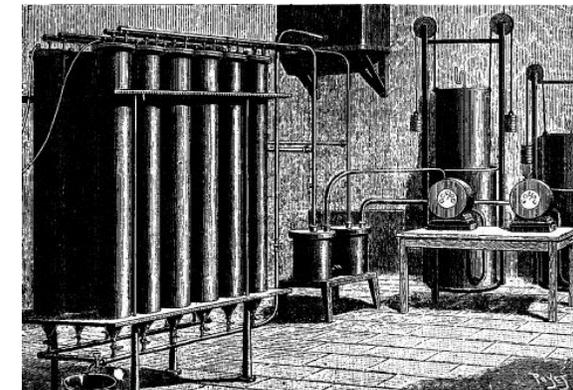


William Nicholson
(1753-1815)



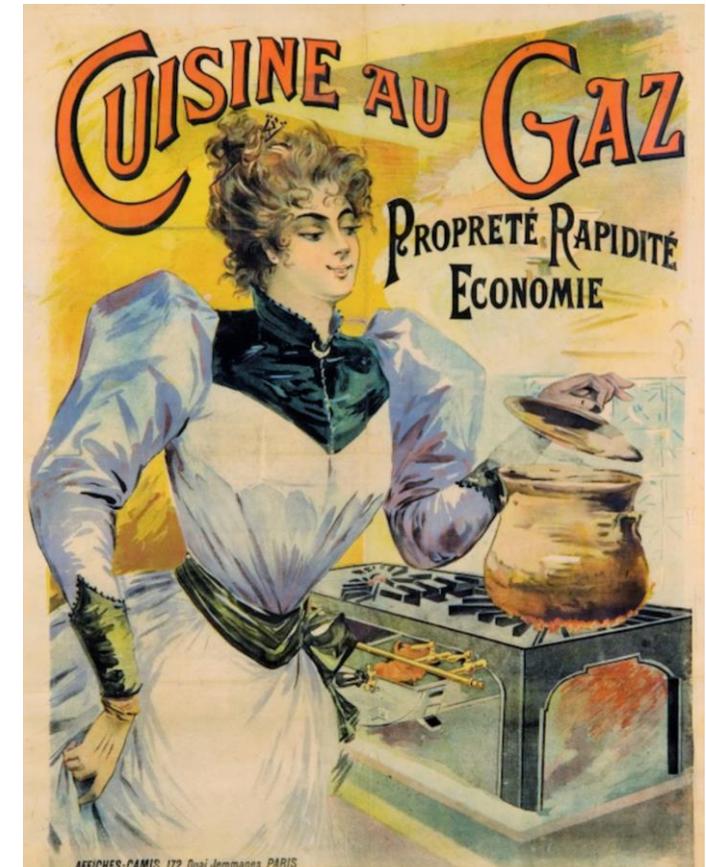
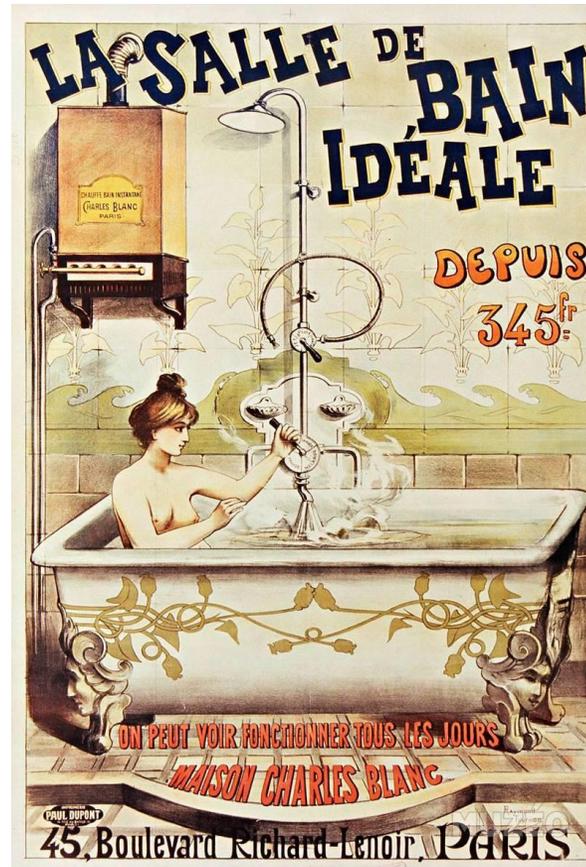
Sir Anthony Carlisle
(1768-1842)

1891 : Procédé
industriel
d'électrolyse de
l'eau

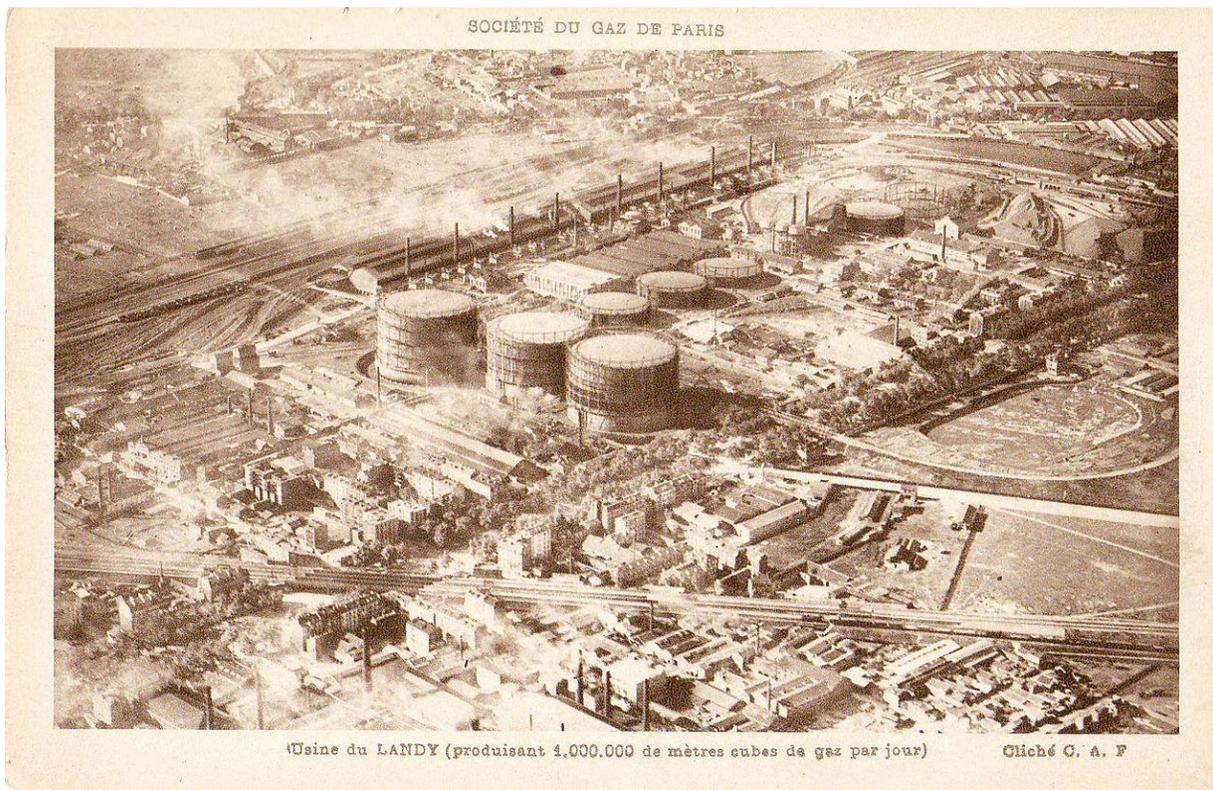


- ➔ Début XIX^{ème} – mi-XX^{ème} siècles :
Le **gaz de ville** apporte lumière et chaleur dans les
rues et dans les foyers.

EAU ET GAZ
A TOUS LES ETAGES



- Nos parents et grands-parents utilisaient l'hydrogène sans le savoir.
- Et pourtant le gaz de ville utilisé au XIX^{ème} siècle et une bonne partie du XX^{ème} siècle comportait près de 50 % d'hydrogène.



Usine de la société du Gaz de Paris à la Plaine
Saint-Denis dans les années 1920

Gaz de distillation de la houille :

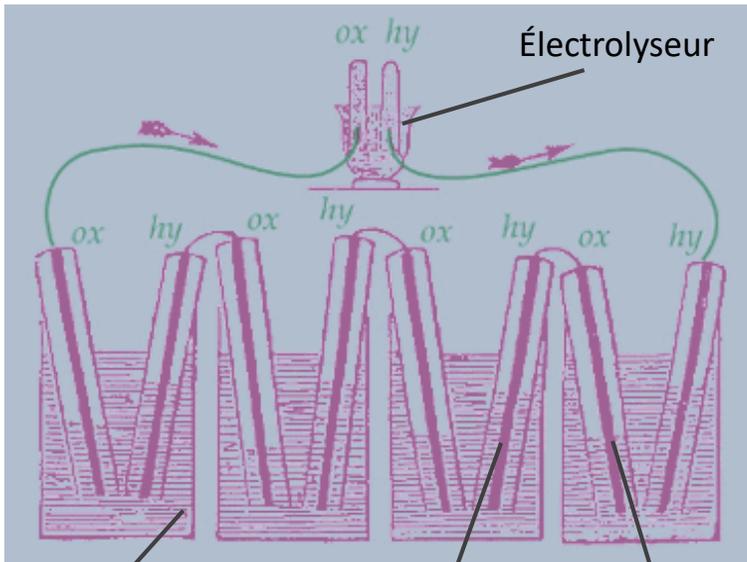
- H_2 : 48 %
- CH_4 : 36 %
- CO : 8 %
- CO_2 : 5 %



Saint-Denis, 1972
Vue aérienne des gazomètres

➡ 1839 :

Sir **William Grove** « invente » la **Pile à Combustible**



Acide sulfurique dilué

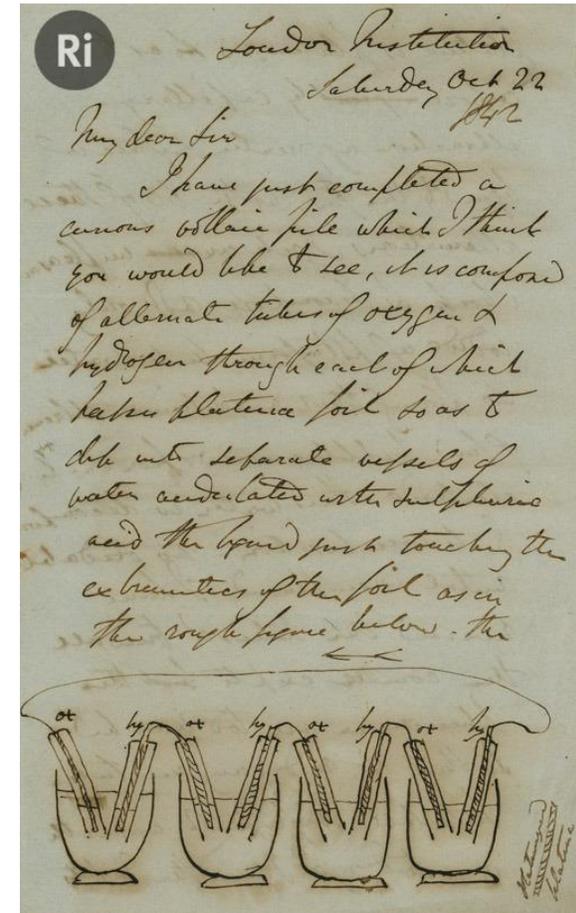
Feuillards de platine

La Pile de Grove (4 cellules en série)

- Couples redox : H_2/H^+ & O_2/O^{2-}
- Anode : $\text{H}_2 \rightarrow 2 \text{H}^+ + 2 \text{e}^-$
- Cathode : $\text{O}_2 + 4 \text{H}^+ + 4 \text{e}^- \rightarrow 2 \text{H}_2\text{O}$
- Réaction complète : $2 \text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2 \text{H}_2\text{O}$
- Tension nominale par élément : 1,23 V



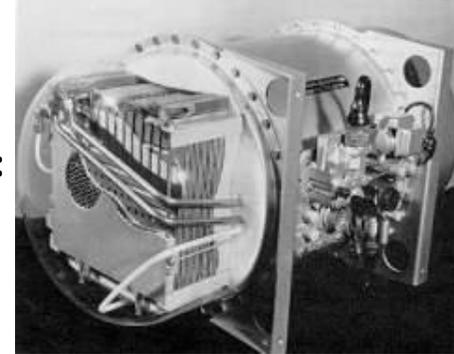
Sir William Grove
(1811-1896)





1962-1966 : Programme GEMINI

General Electrics :
Pile PEMFC de 1 kW



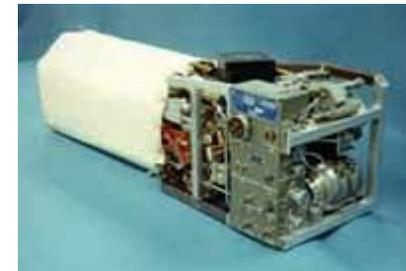
1966-1972 : Programme APOLLO

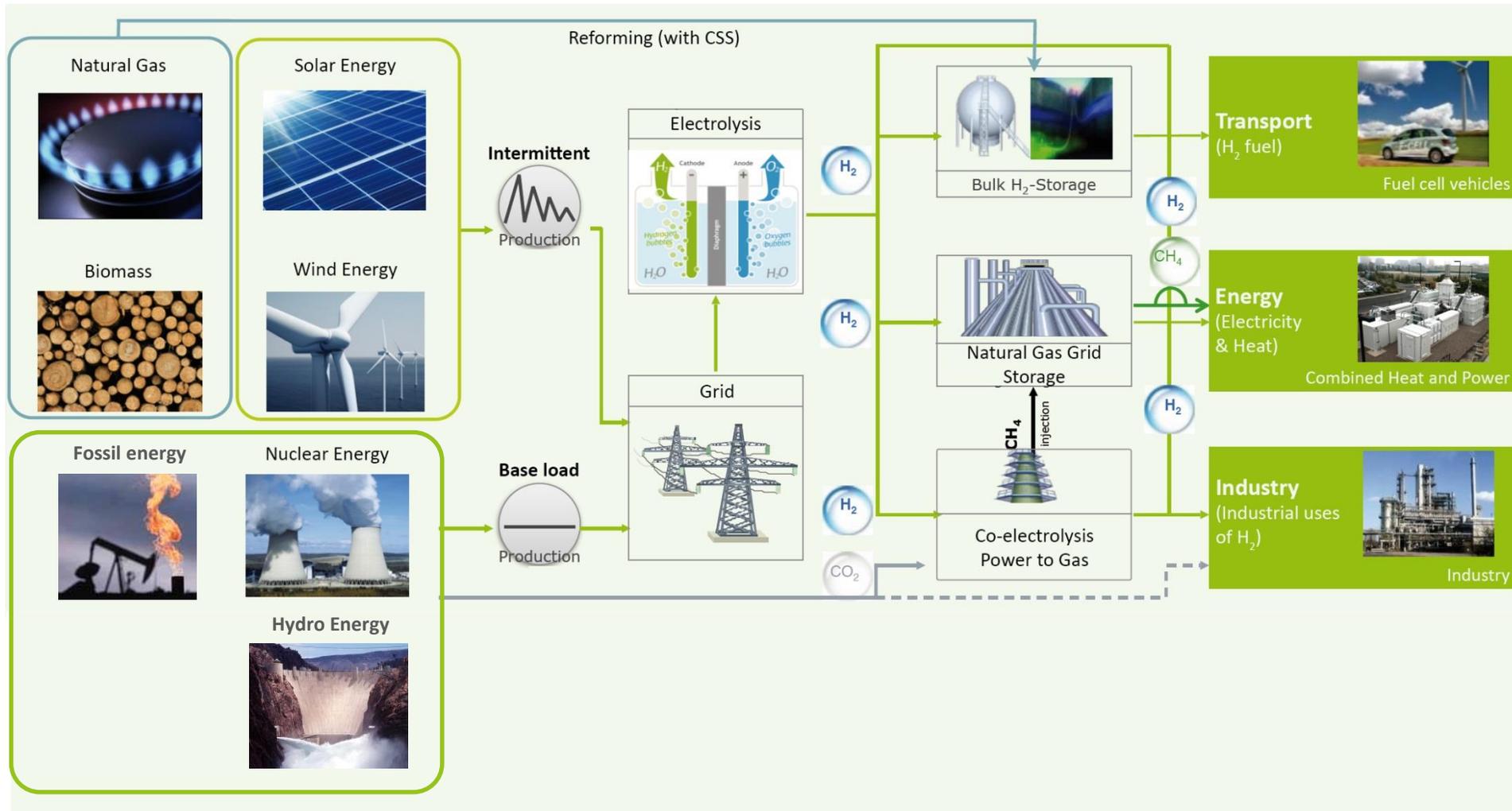
International Fuel Cells :
3 piles AFC de 1,5 kW



1981-2007 : Navette spatiale

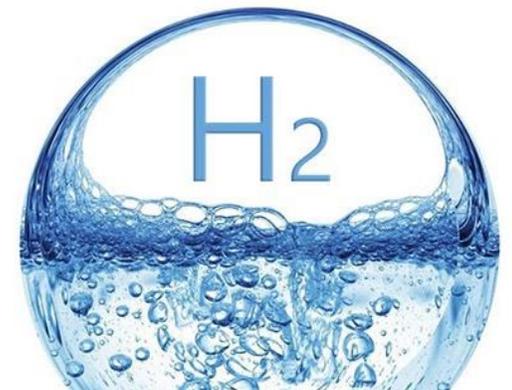
International Fuel Cells :
Pile AFC de 12 kW





1 kg d'hydrogène, c'est :

- 11,2 Nm³
- ~ 25 litres à 700 bars (poids du réservoir env. 20 kg/kg H₂)
- 33,33 kWh (pouvoir calorifique inférieur, 120 MJ)
- ~ 16 kWh électriques en sortie de pile à combustible (rendement électrique ~ 50%)
- 1 à 2 jours d'autonomie pour une maison tout confort (hors chauffage)
- l'équivalent de 2,75 kg d'essence (soit 3,7 l)
- ~ 100 km pour un véhicule de classe moyenne
- 2 à 10 € selon les méthodes de production et transport utilisées





● *Hydrogène « naturel »*



● **Gazéification du charbon**

● **Vaporeformage d'hydrocarbures**

● **Oxydation partielle de résidus pétroliers lourds**



● *Production d'hydrogène à partir de la biomasse*

● **Électrolyse de l'eau**



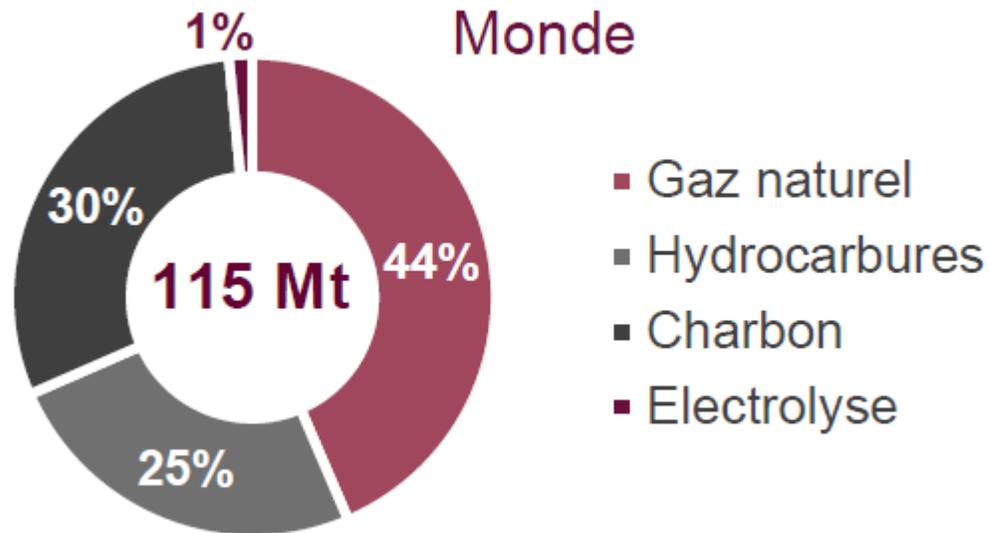
● *Dissociation thermochimique de l'eau*

● *Photoélectrolyse de l'eau*

● *Bioproduction d'hydrogène par des organismes photosynthétiques*

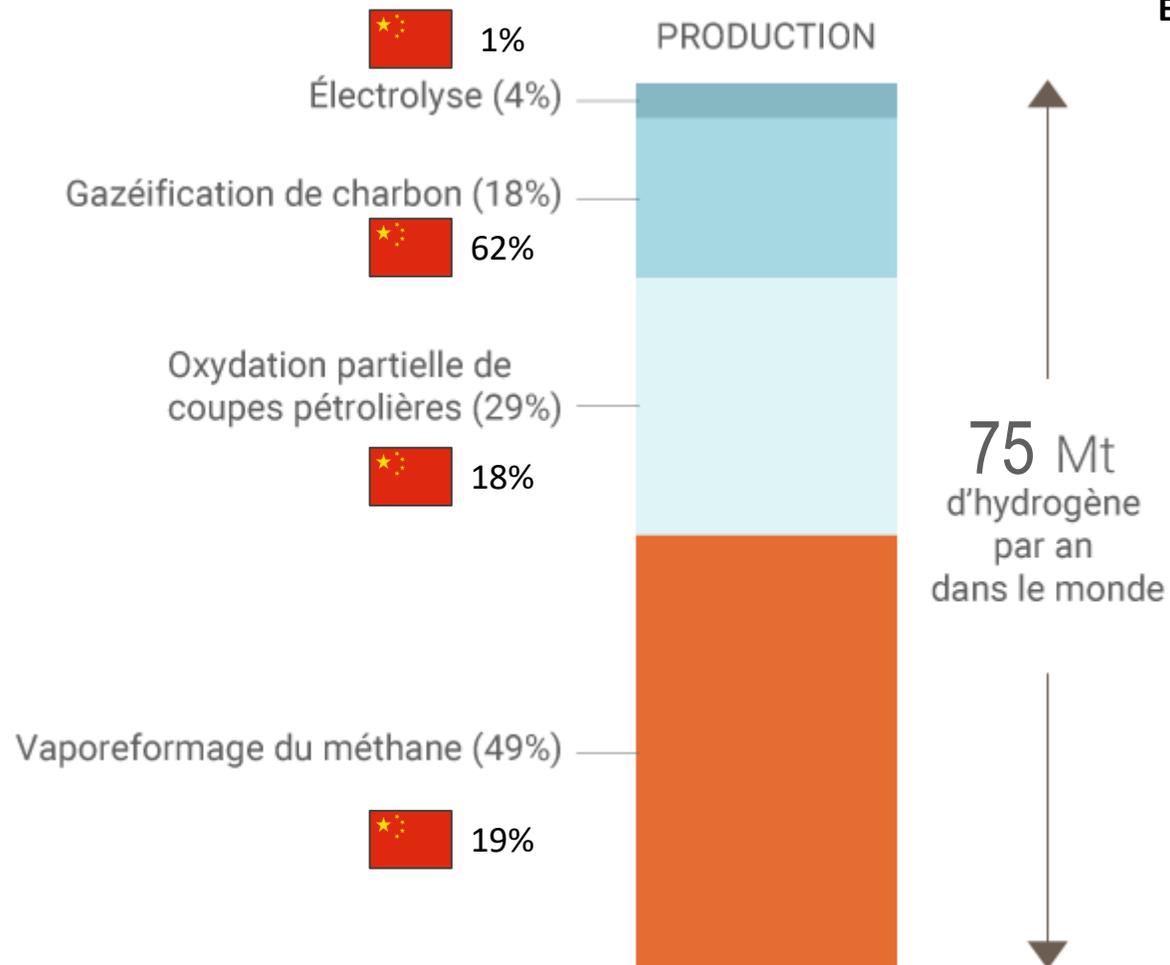
● **Procédés industriels**

● *Procédés en cours de développement ou R&D*



- 25 Mt **Pure H₂** (33% world production)
- 11.9 Mt By product from industry

Around **70 MtH₂/yr** is used today in **pure form**, mostly for oil refining and ammonia manufacture for fertilisers; a further **45 MtH₂** is used in industry **without prior separation** from other gases.



Electrolyseurs McPhy dans son site de production de San Miniato (Italie)



Usine **Gazéification du charbon** d'Air Liquide en Chine



Usine de **vaporeformage** (Air liquide)

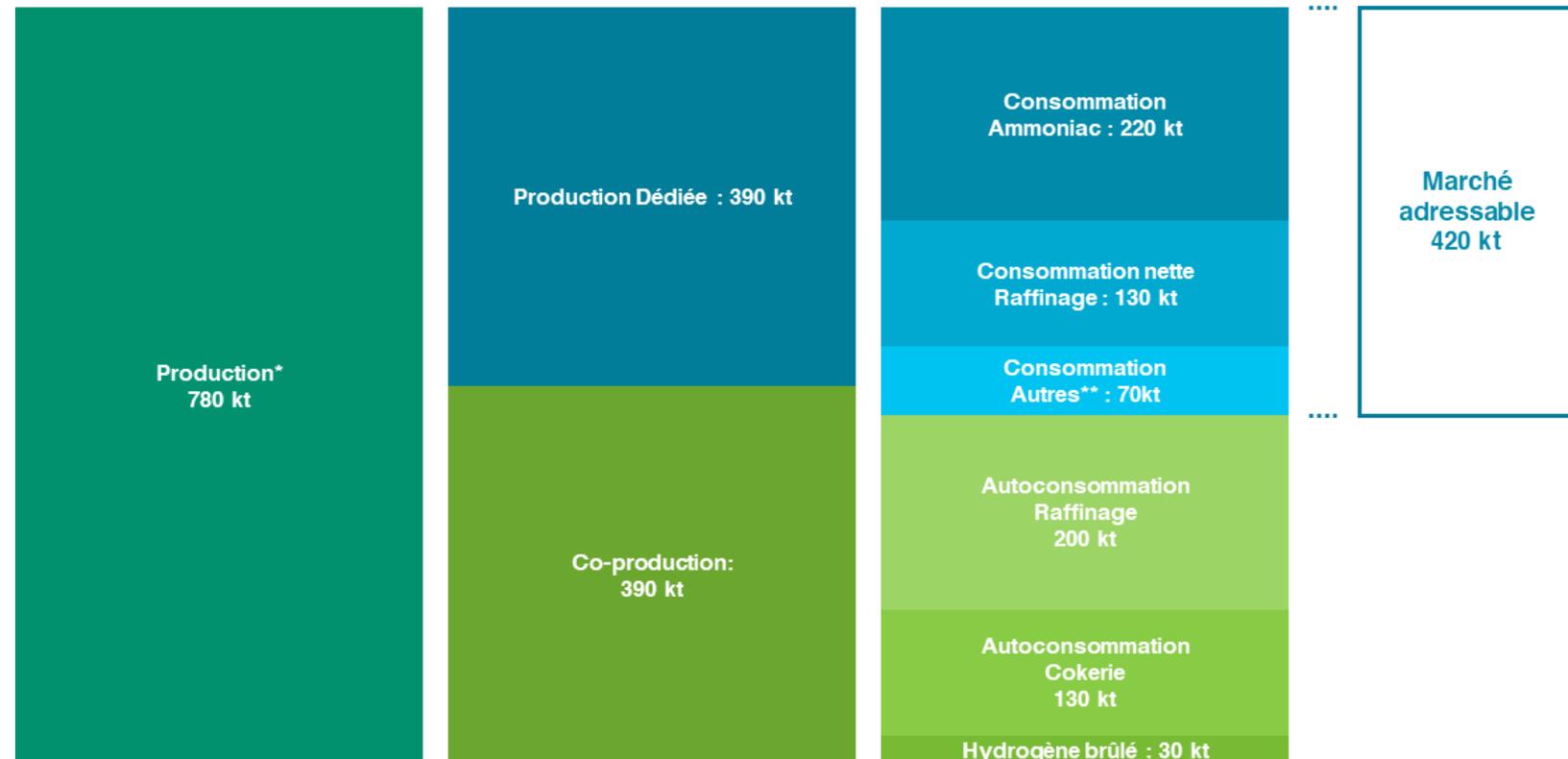
France (2019)

Une production annuelle d'environ 780 kt

Estimation de la demande en hydrogène en France en 2019

Mt/an		Europe (2006)	
Fossile	Gaz naturel	3,5	42 %
	Pétrole	3,5	42 %
	Charbon	0,3	4 %
Electrolyse		1,0	12 %
Total		8,3	100 %

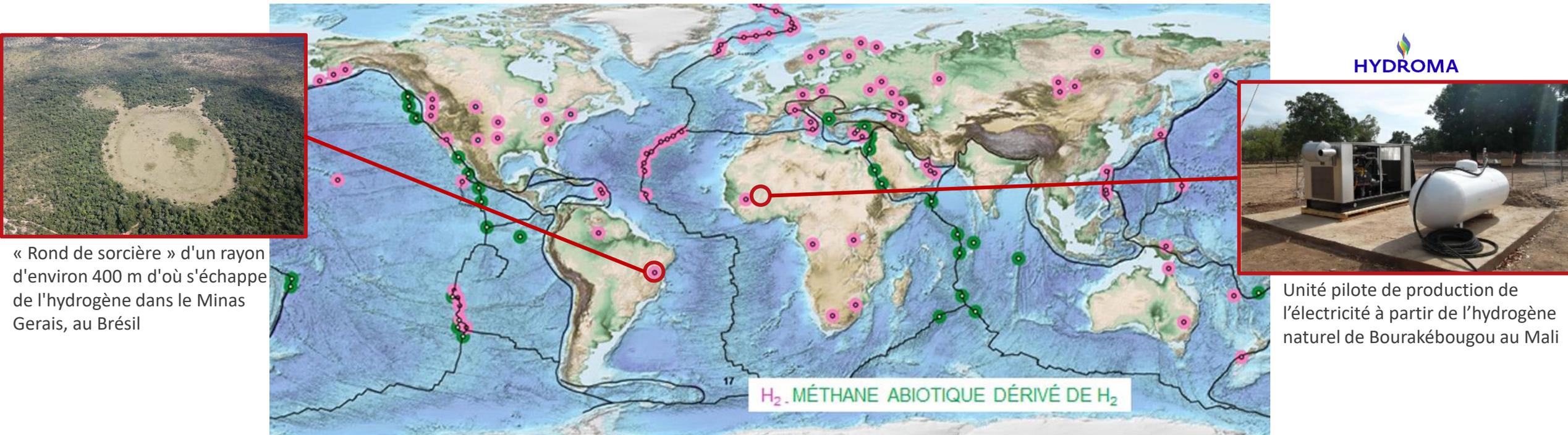
Source : ALPHEA



Sources : HINICIO & EY, 2020 | *Production : H₂ issu de procédés générant de l'H₂ pur ou en mélange avec d'autres gaz
 **Dont HMD : 40 kt, Traitement de surface du métal : 10 kt, Peroxyde d'H₂ : 7kt

Plusieurs phénomènes géologiques peuvent entraîner une génération continue d'hydrogène dans la croûte terrestre :

- **Diagénèse**, interaction eau/roche : libération d'hydrogène de l'eau lors de phénomènes d'oxydation dans différents contextes géologiques (par exemple, $3 \text{Fe}_2\text{SiO}_4 + 2 \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2 \text{Fe}_3\text{O}_4 + 3 \text{SiO}_2 + 2 \text{H}_2$)
- **Radiolyse** : la radioactivité naturelle de la croûte terrestre peut séparer hydrogène et oxygène de l'eau

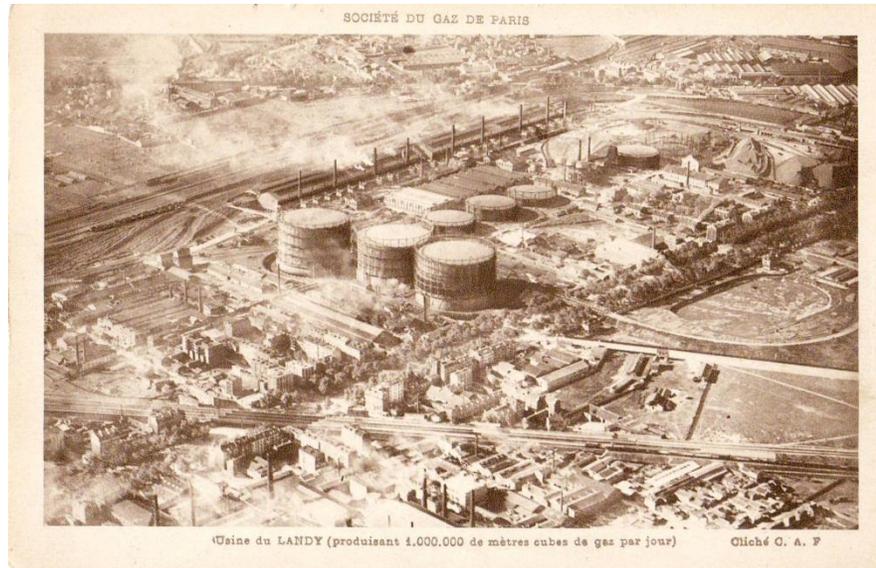


Carte non exhaustive des émanations connues d'hydrogène natif et de méthane abiologique dérivé de l'hydrogène qui réagit en particulier au niveau des fumeurs avec le CO₂

https://www.connaissancedesenergies.org/tribune-actualite-energies/lhydrogene-naturel-curiosite-geologique-ou-source-energie-majeure-dans-le-futur?utm_source=newsletter&utm_medium=fil-info-energies&utm_campaign=/newsletter/le-fil-info-energies-22-mai-2020
<https://hydroma.ca/fr/hydrogene-naturel/>
https://www.cnrs.fr/mi/IMG/pdf/hydro2019_presentation_moretti.pdf



Un procédé historique toujours d'actualité

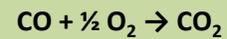
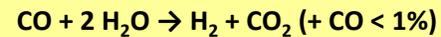
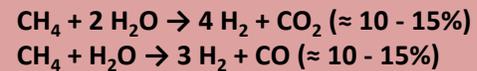
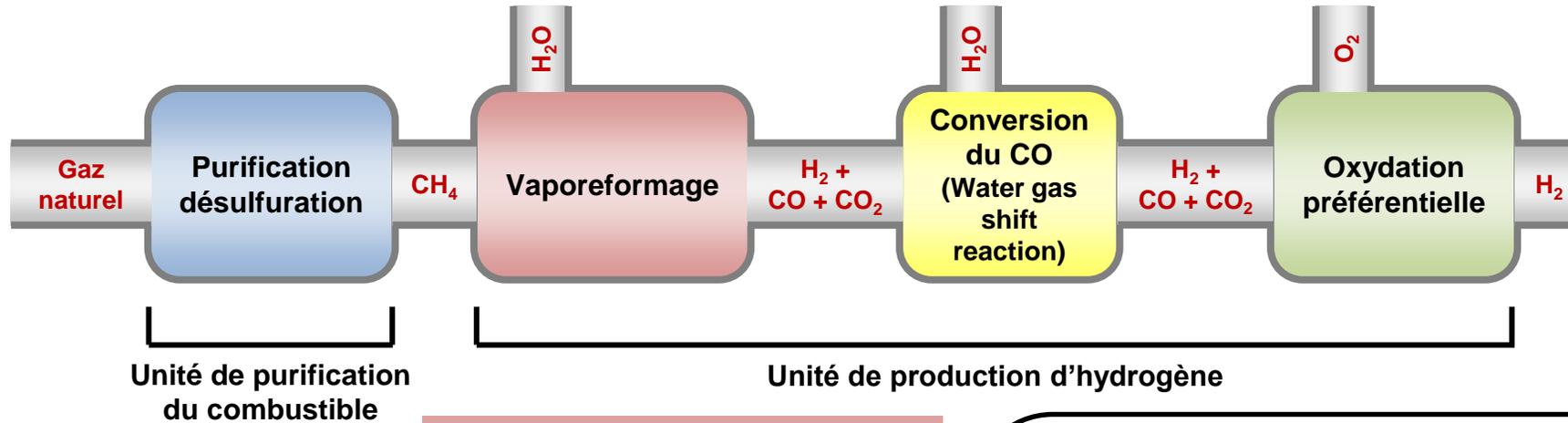
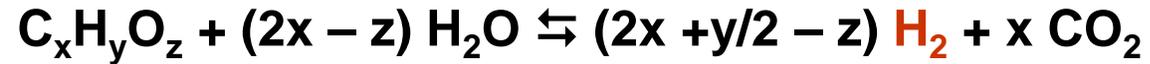


Usine de la société du Gaz de Paris à la Plaine Saint-Denis dans les années 1920

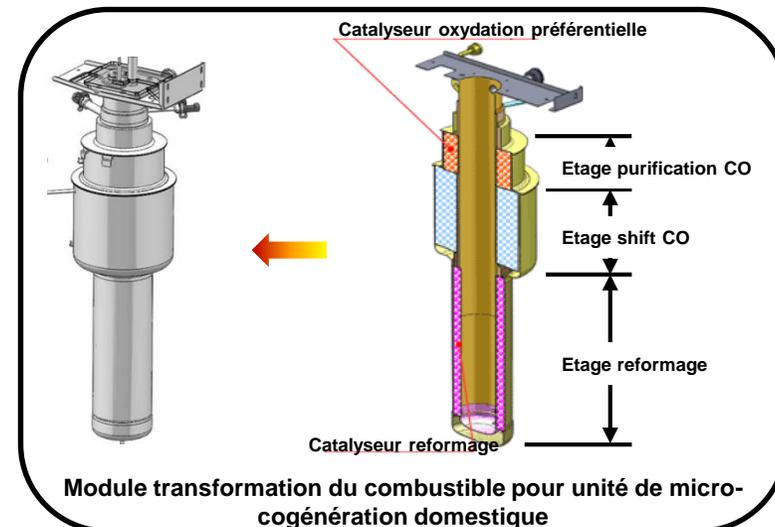


Usine Gazéification du charbon d'Air Liquide en Chine

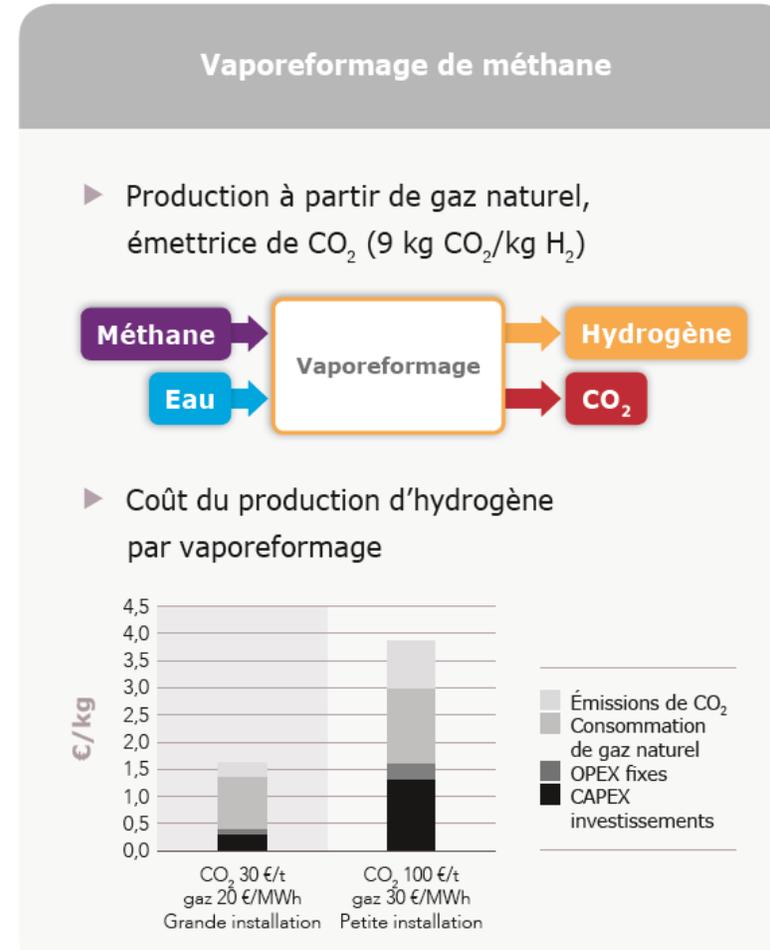
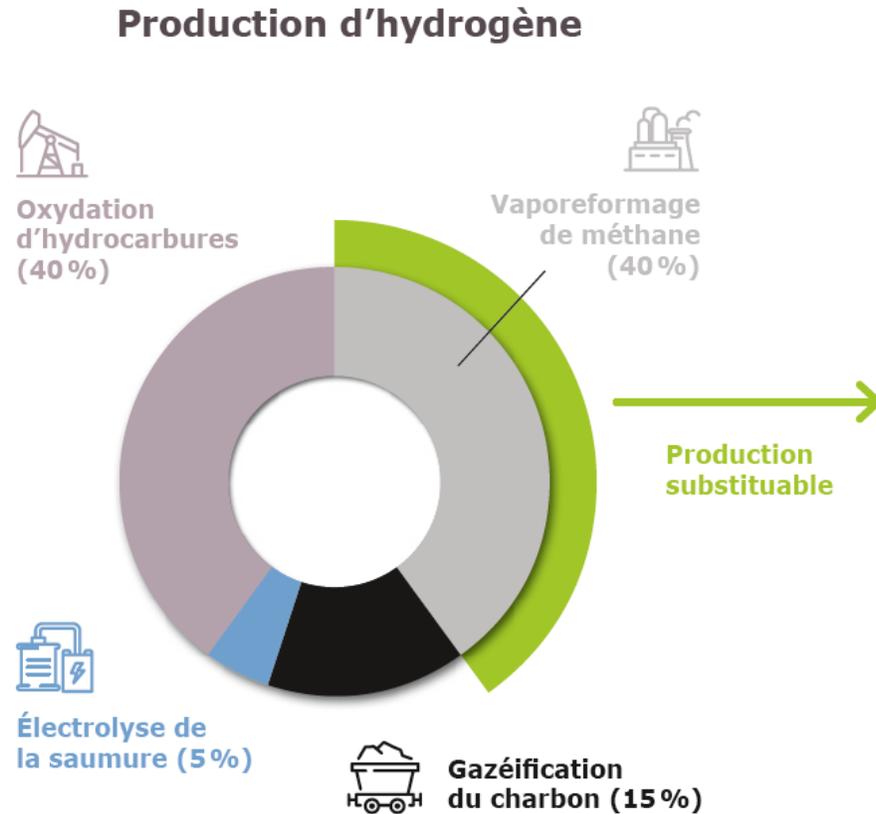
● Exemple du vaporeformage :

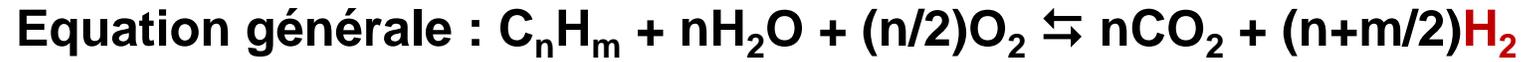


Production d'hydrogène -
Usine de vaporeformage
(Air liquide)

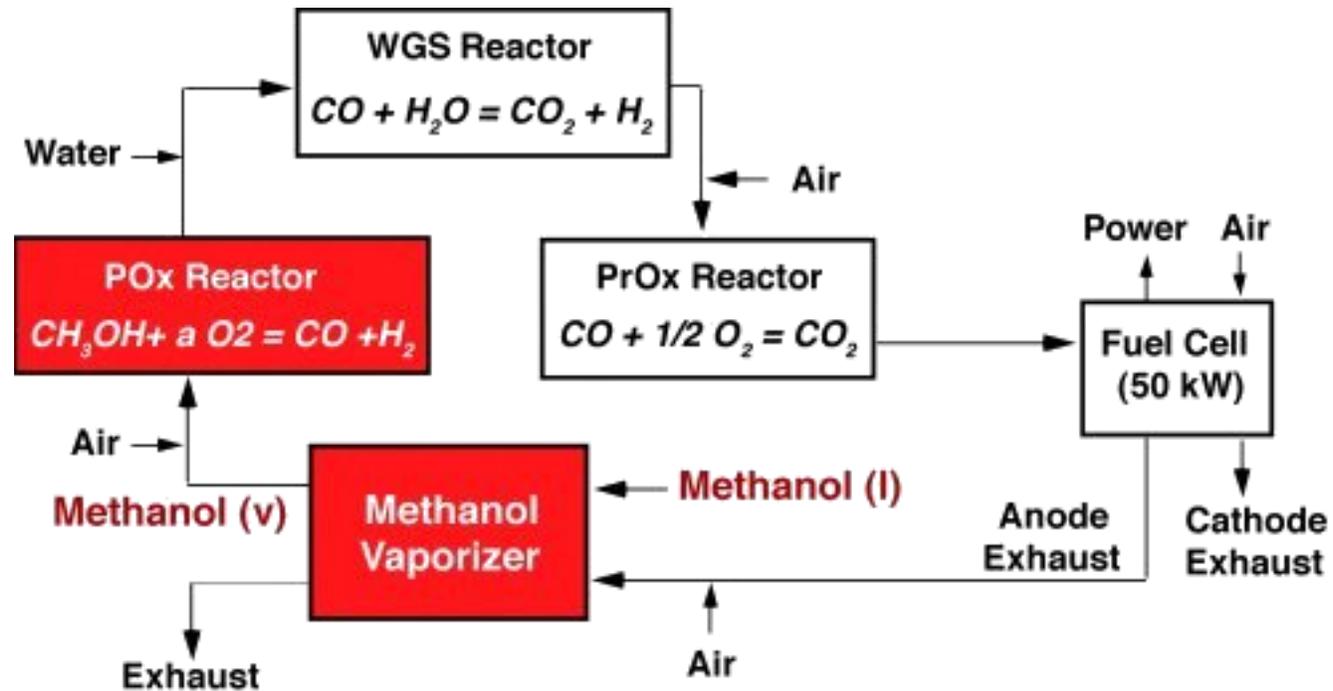


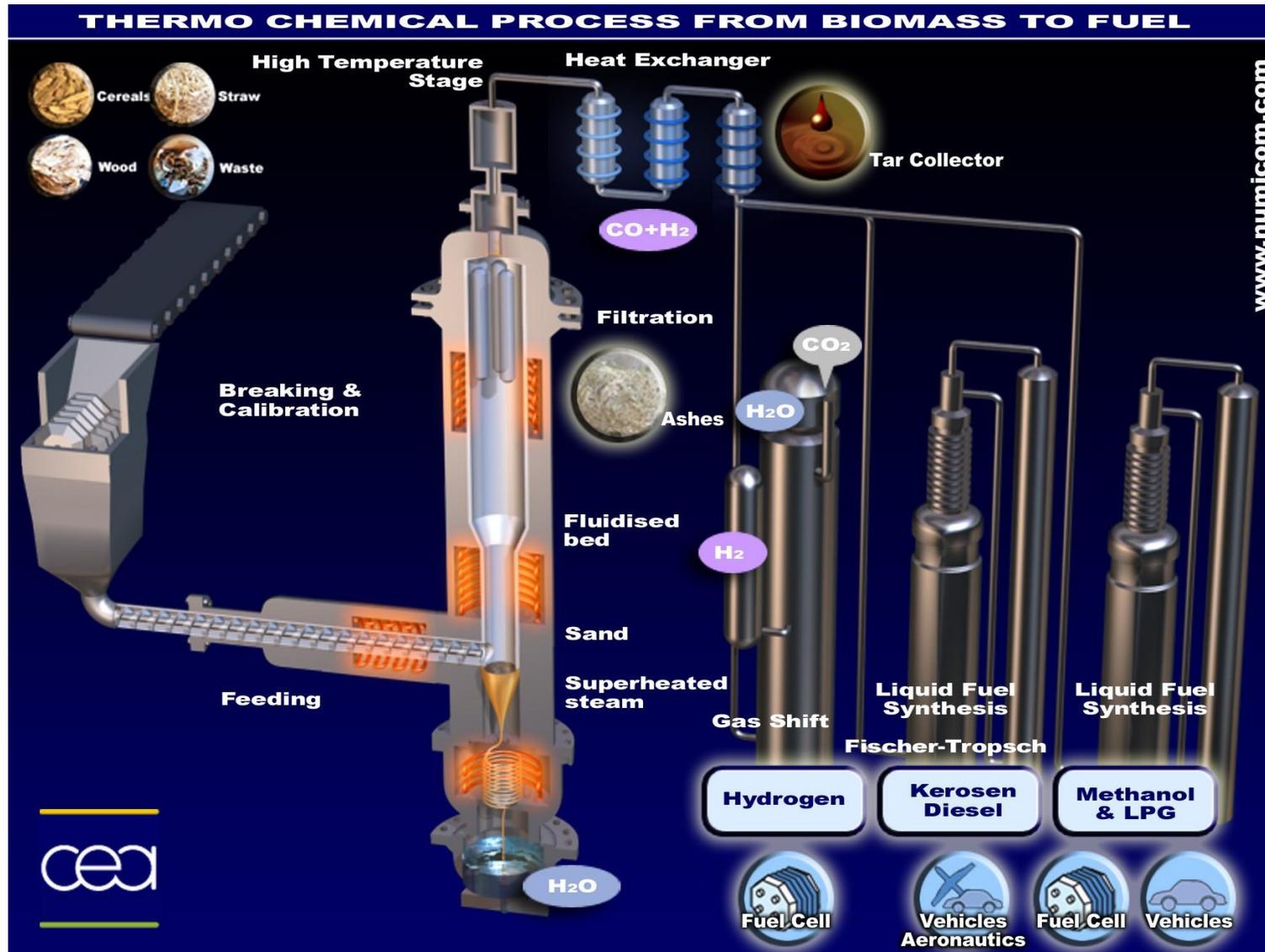
Émissions et coût de production d'hydrogène à partir du vaporeformage du méthane en France





Exemple du méthanol



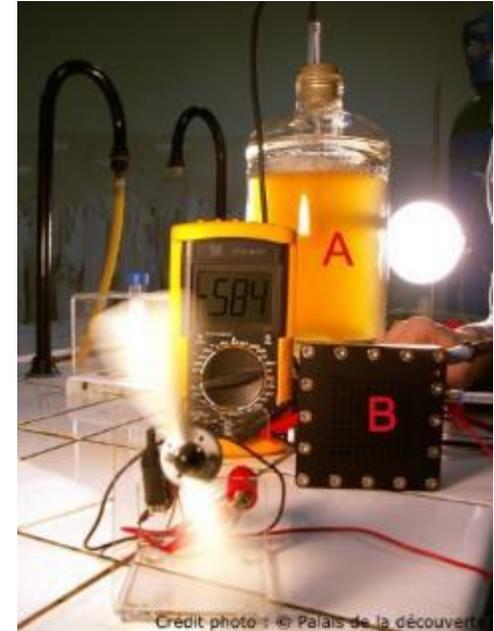


Production biologique d'hydrogène par photofermentation de composés organiques

- Les déchets et les sous-produits agricoles représentent une source importante de matière organique, potentiellement convertissables en hydrogène par voie de fermentation.
- La photofermentation, catalysée par les bactéries photosynthétiques de type *Rhodobacter capsulatus* est théoriquement capable de convertir la totalité des substrats carbonés en H₂ et CO₂, avec un rendement maximal de 12 mol H₂/mol de glucose.



ou de 6 mol H₂/mol de lactate:



Pilote raccordé à une pile à combustible

Culture photosynthétique de *Rhodobacter capsulatus* IR3 (1 litre) produisant de l'hydrogène à partir du lactate avec un débit de 2 ml/min raccordée à une pile à combustible de type PEMFC (PolyElectrolyte Membrane Fuel Cell) de 64 cm², reliée à un voltmètre et faisant tourner une petite hélice.

● Trois principaux types d'électrolyse :

- Électrolyse alcaline
- Électrolyse PEM
- Électrolyse Haute Température

Technologie	Electrolyte	Température de fonctionnement	Pression de fonctionnement
Alcaline	Solution KOH	60 – 80 °C	< 30 bar
PEM	Membrane perfluorée sulfonique	50 – 80 °C	< 200 bar
Haute Température	Zircone yttrée (YSZ)	700 – 800 °C	< 25 bar

NEL Hydrogen :

Electrolyseur alcalin (2 MW)



Siemens :

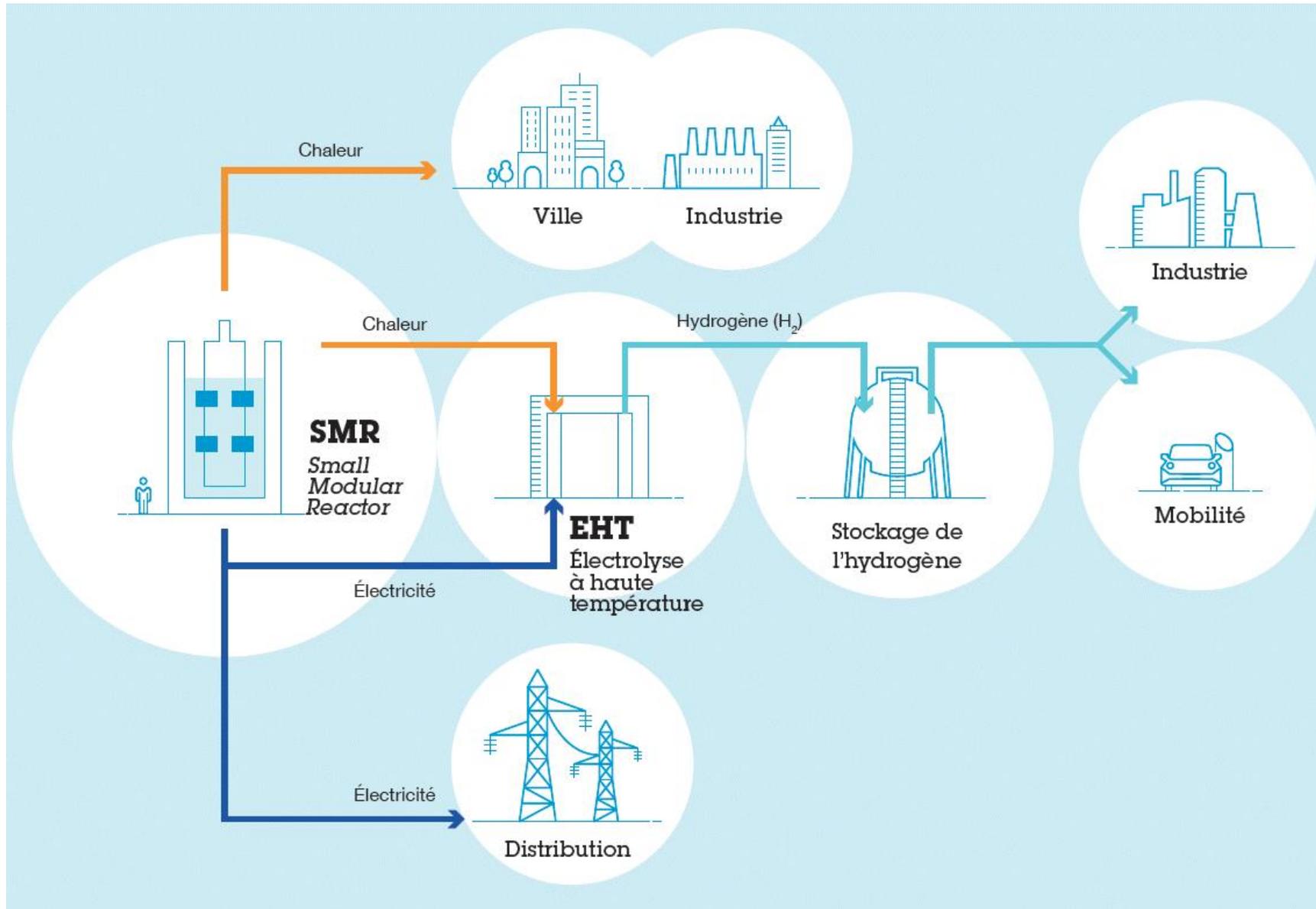
Electrolyseur PEM (300 kW – 1,25 MW)



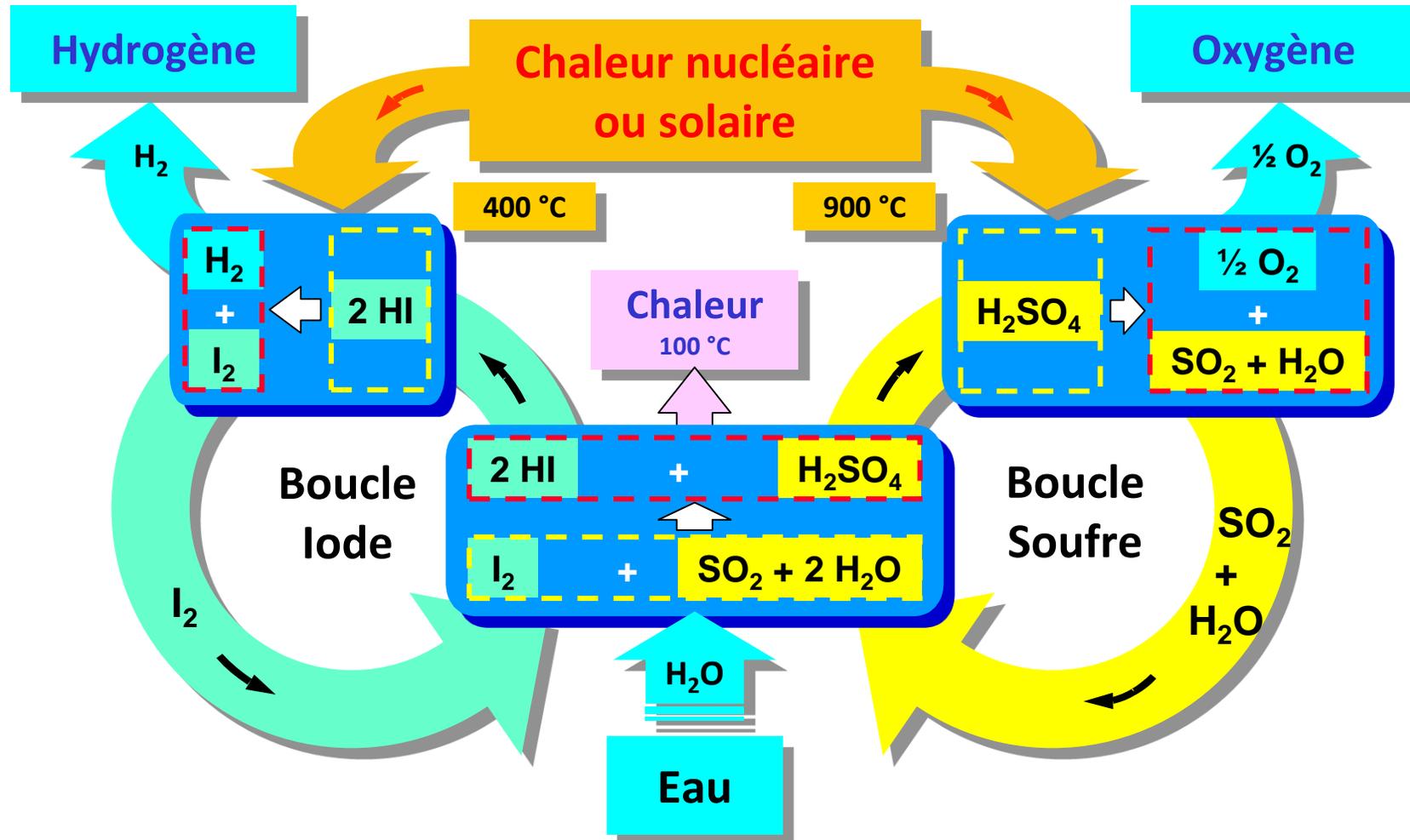
Sunfire :

Electrolyseur SOEC (150 kW)

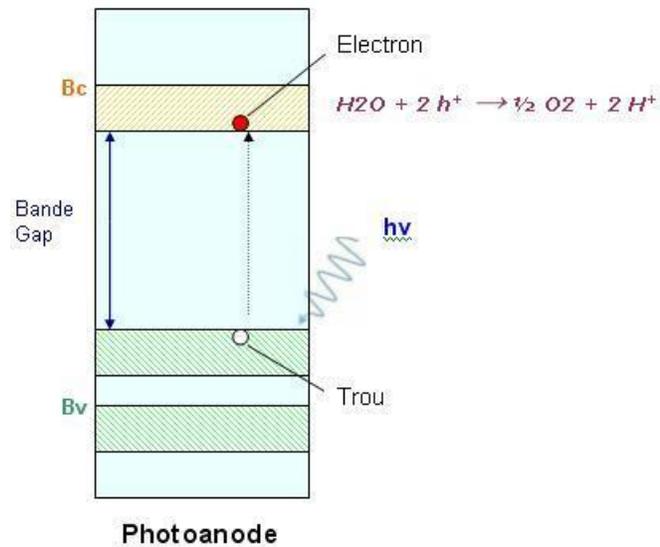
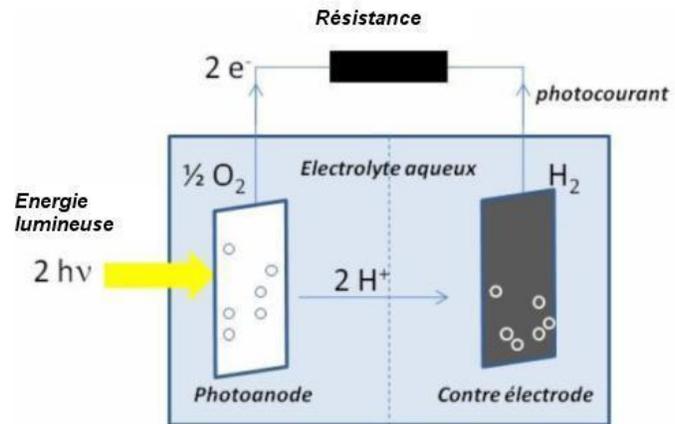




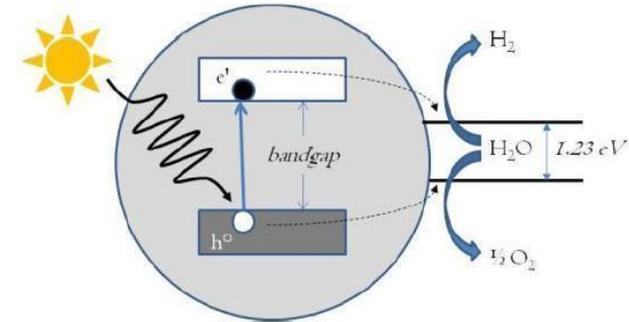
● Exemple du cycle Iode - Soufre :



Principe de la photoélectrolyse



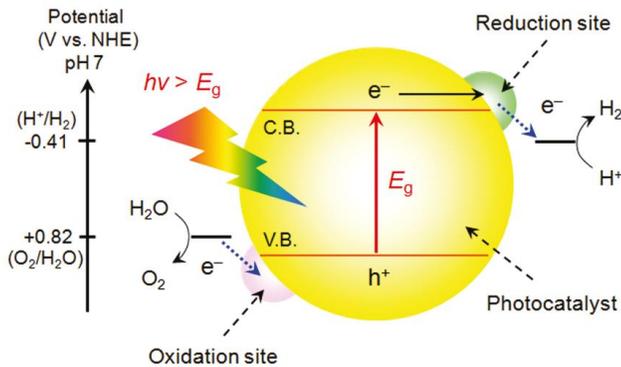
Principe de la photolyse



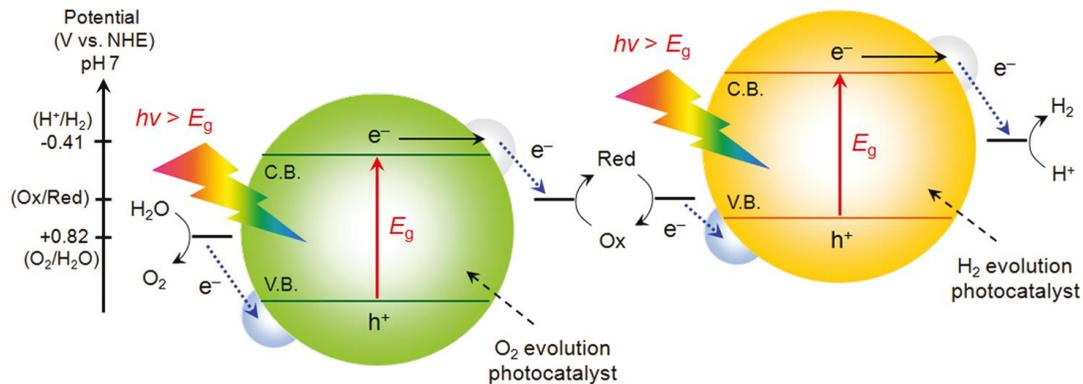
- Photoanode : $H_2O + 2h^+ \rightarrow \frac{1}{2} O_2 + 2H^+$
- Contre électrode : $2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2$

Principe

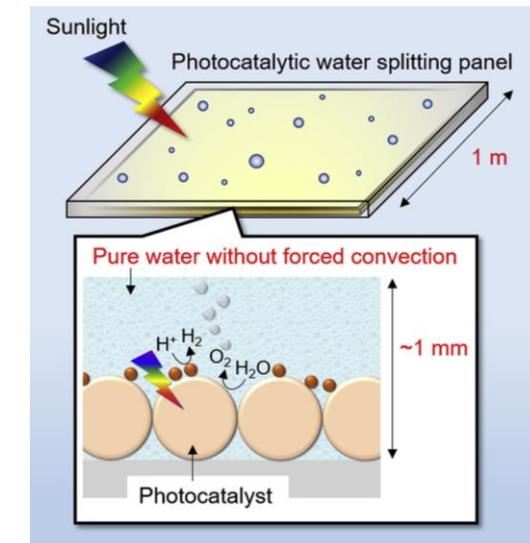
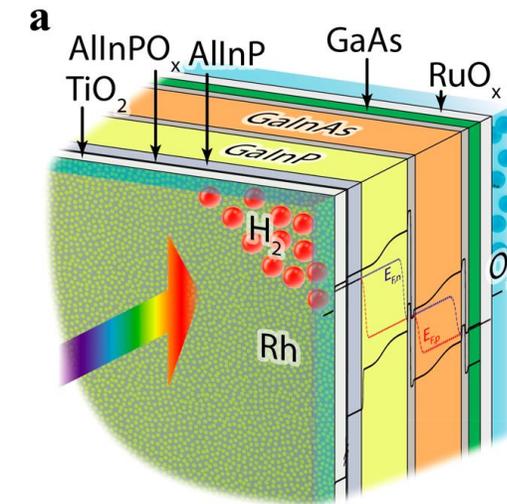
One-step photoexcitation system
(e.g., $\text{RuO}_2/\text{GaN}:\text{ZnO}$)



Two-step photoexcitation system
(e.g., $\text{Pt}/\text{ZrO}_2/\text{TaON} + \text{Pt}/\text{WO}_3$)



Exemples d'architectures de dispositifs intégrés

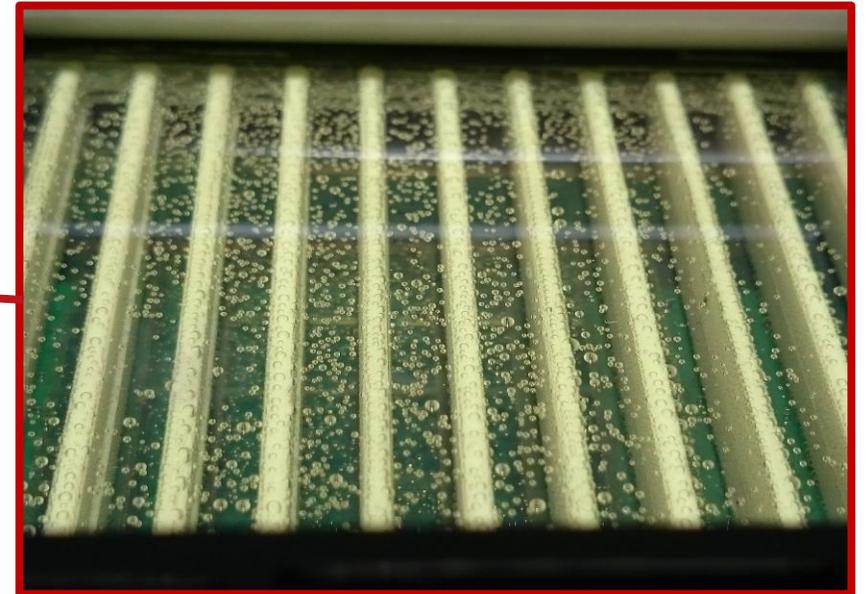
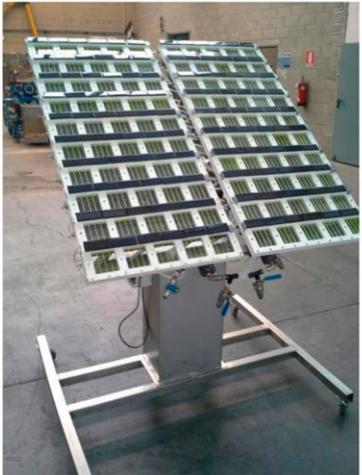


Prototype développé dans le cadre du projet FCH-JU ArtipHyction



low-temperature,
photo-electrochemical
processes for direct
hydrogen production

scaling up the photo electro-
chemical conversion to 1,6 m²
irradiated surface



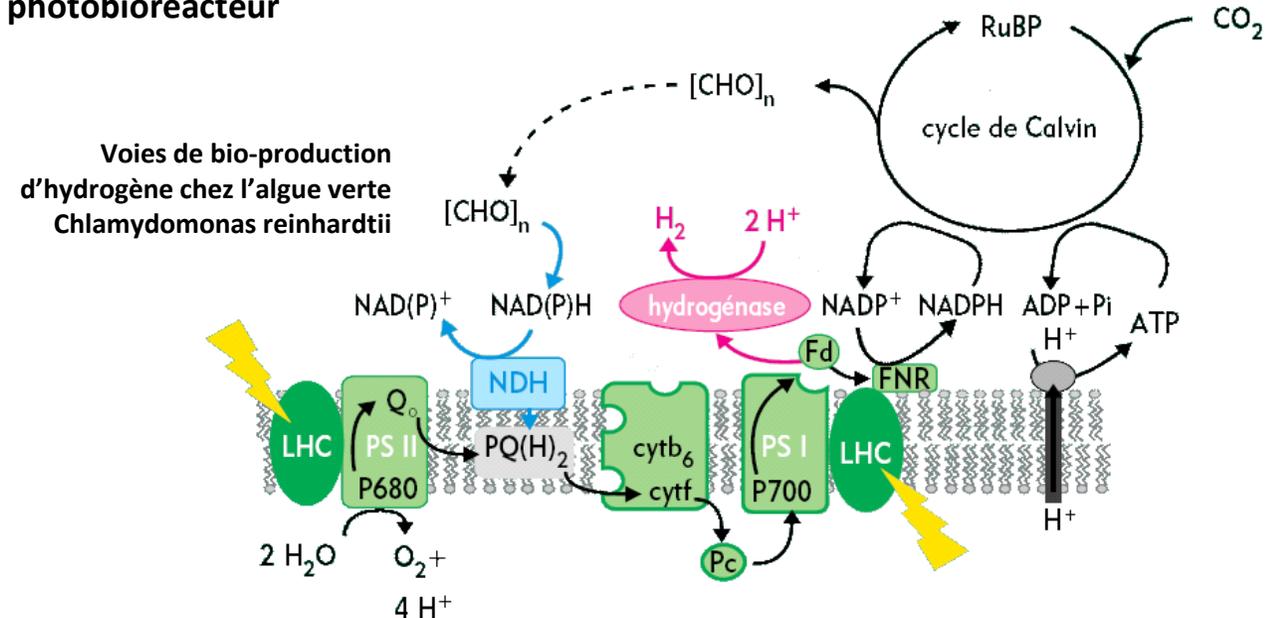
Prototype de 1,6 m² avec un rendement de 2-3%

Photoproduction d'hydrogène par des microalgues

- Certaines microalgues produisent de l'hydrogène grâce à un couplage entre la chaîne photosynthétique et une hydrogénase à Fe. Dans la nature il s'agit d'un phénomène transitoire qu'il s'agit de domestiquer pour une production continue d'hydrogène.
- Les objectifs des recherches consistent à :
 - optimiser le flux d'électrons pour un fonctionnement optimal de l'hydrogénase
 - modifier le métabolisme pour limiter les compétitions
 - mettre au point et optimiser des procédés de production en photobioréacteur



Réacteur de bio-production d'hydrogène

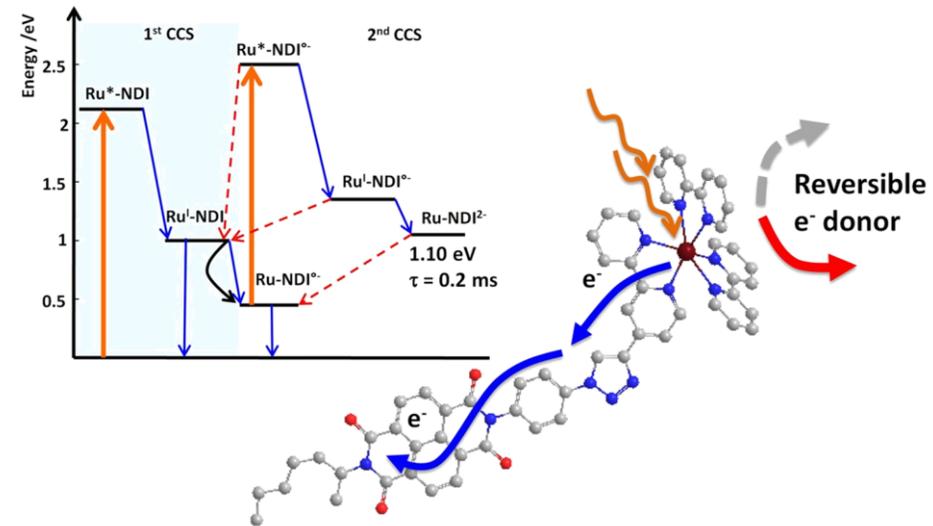
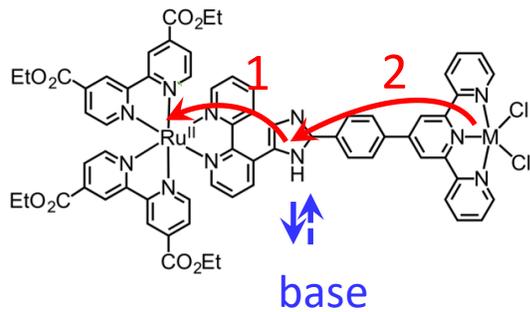


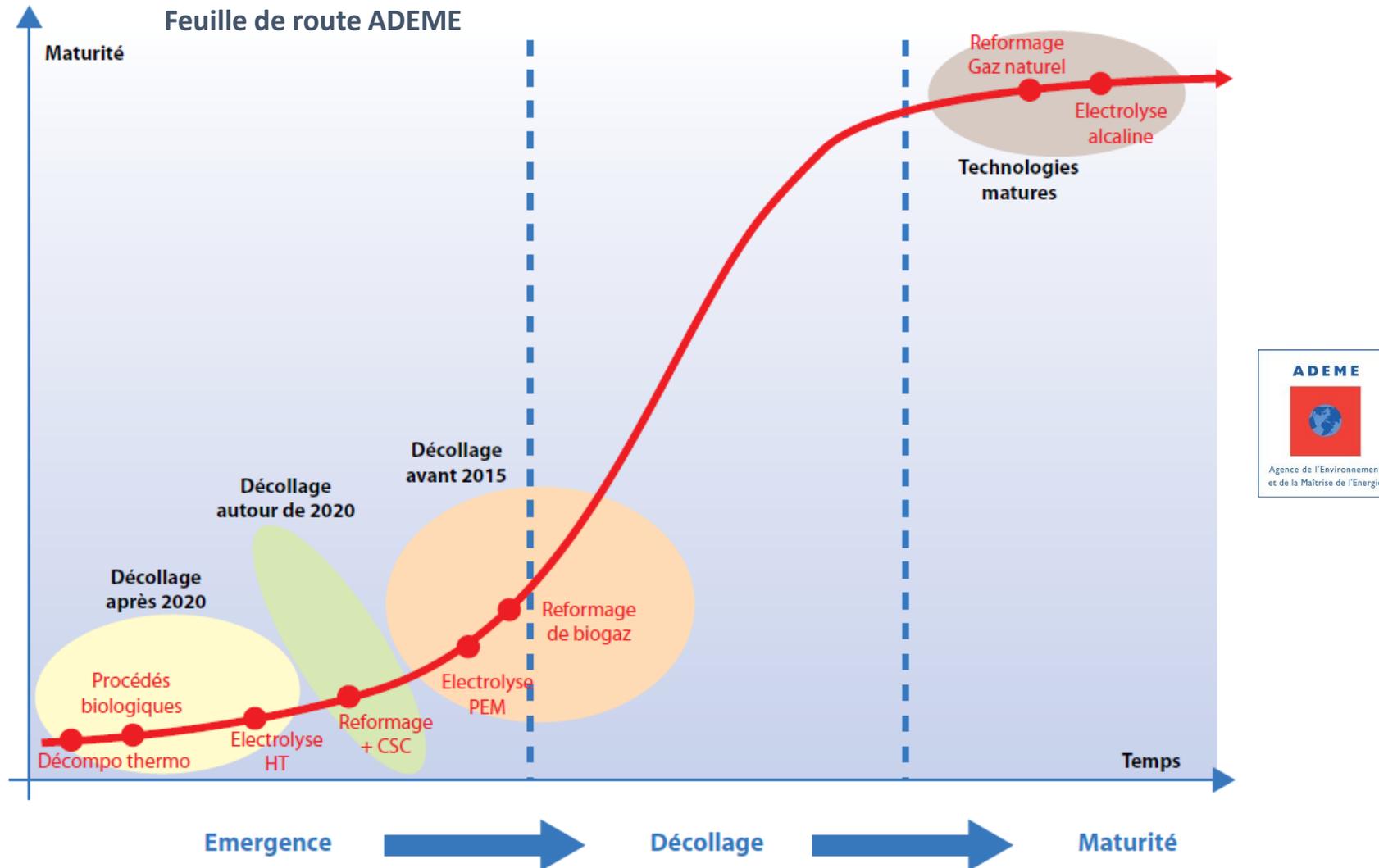
Burlacot A, Peltier G (2018) Photosynthetic electron transfer pathways during hydrogen photoproduction in green algae: mechanisms and limitations. In M Seibert, G Torzillo, eds, Microalgal Hydrogen Production: Achievements and Perspectives. The Royal Society of Chemistry, pp 189-212

Baltz A, Dang KV, Beyly A, Auroy P, Richaud P, Cournac L, Peltier G (2014) Plastidial expression of type II NAD(P)H dehydrogenase increases the reducing state of plastoquinones and hydrogen photoproduction rate by the indirect pathway in *Chlamydomonas*. *Plant Physiol.* 165, 1344-1352

Production d'hydrogène par des complexes photocatalytiques artificiels

- L'approche pour la photosynthèse artificielle s'appuie sur l'utilisation de molécules biomimétiques ayant des propriétés photocatalytiques. Les molécules synthétisées sont munis d'un chromophore photoactif et d'un catalyseur pour l'oxydation de l'eau ou la réduction de protons. Les deux modules sont connectés par un relai électronique pour contrôler le transfert de charge. Les photocatalyseurs développés seront greffés sur des électrodes pour la réalisation des photoanodes et photocathodes d'une cellule photo électrochimique.

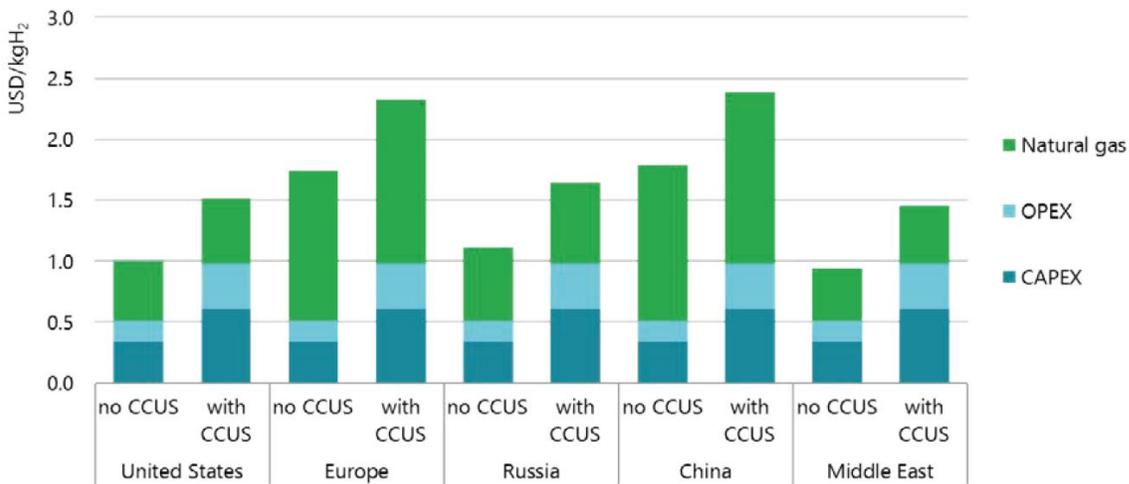




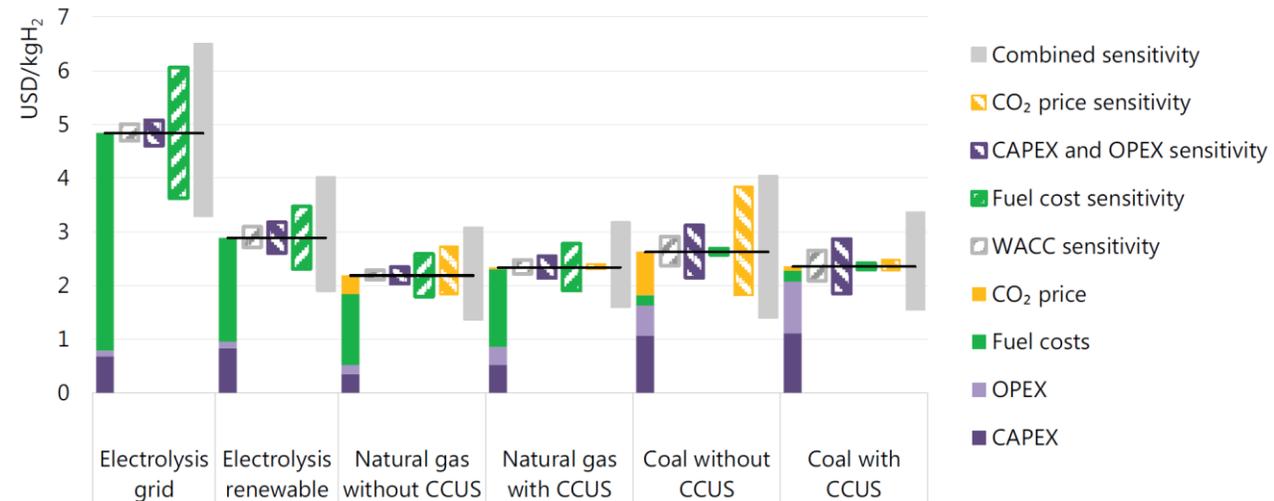
Source : http://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/adm00010045_s1.pdf

Méthodes de production actuelles ou à court terme

- le reformage (charbon et gaz naturel) ~ 1-2 €/kg
- Gazéification du charbon ~ 3 €/kg
- La biomasse (bois, cellulose) > 3 €/kg
- L'électrolyse basse température ~ 3-6 €/kg



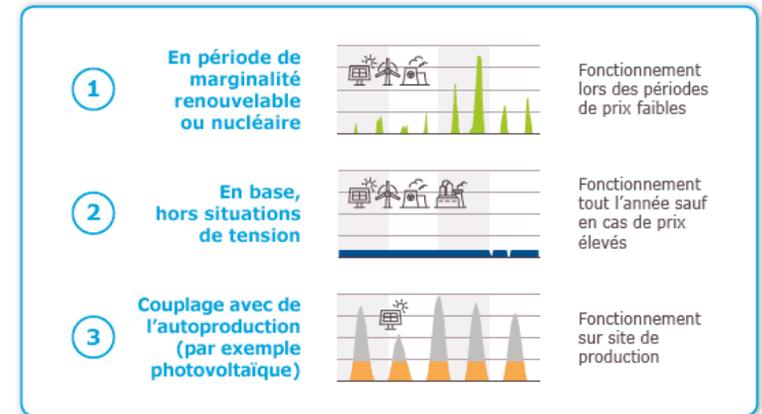
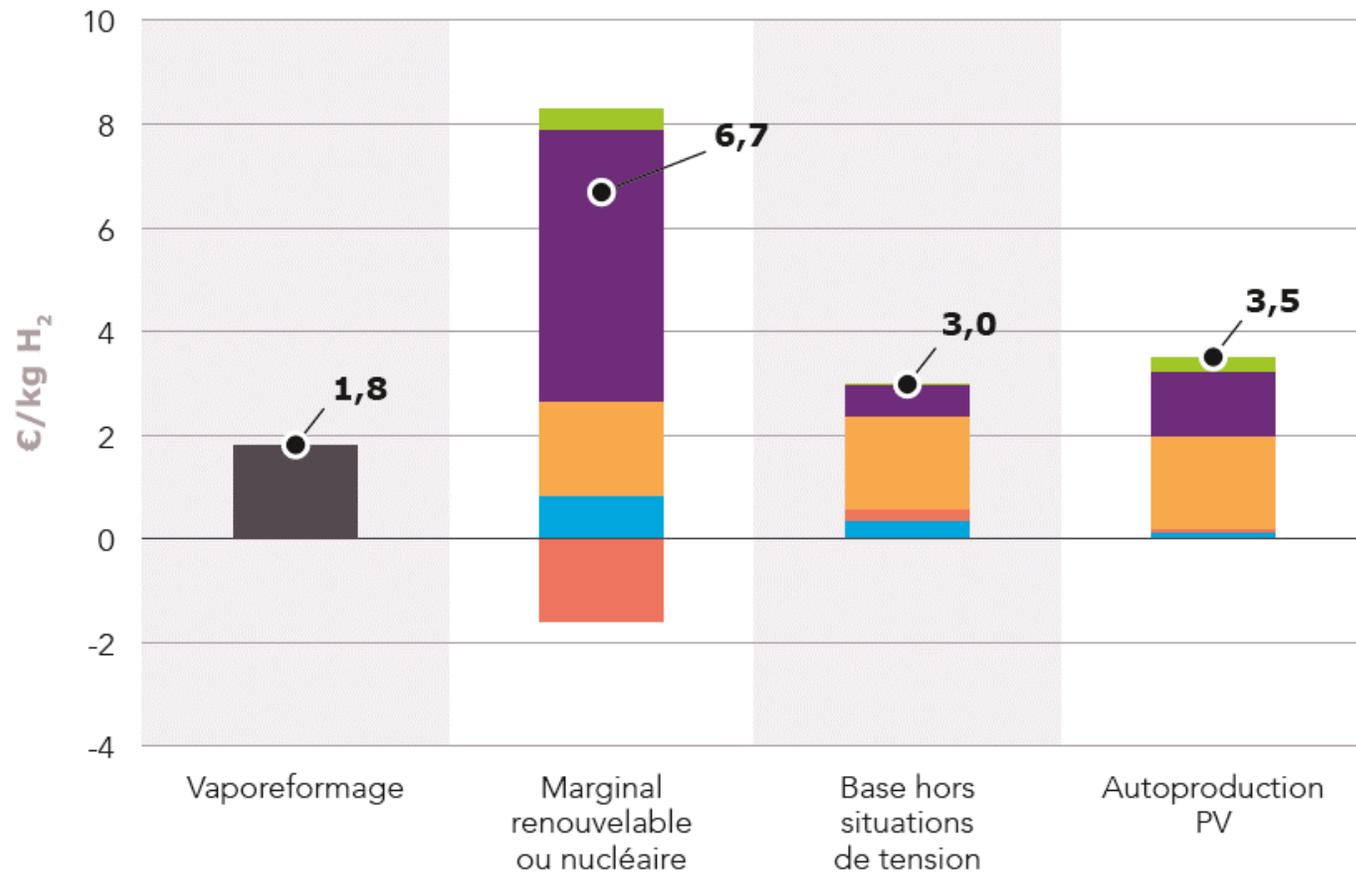
Hydrogen production costs using natural gas in different regions, 2018



Hydrogen production costs for different technology options, 2030

CCUS: Carbon capture, utilisation and storage

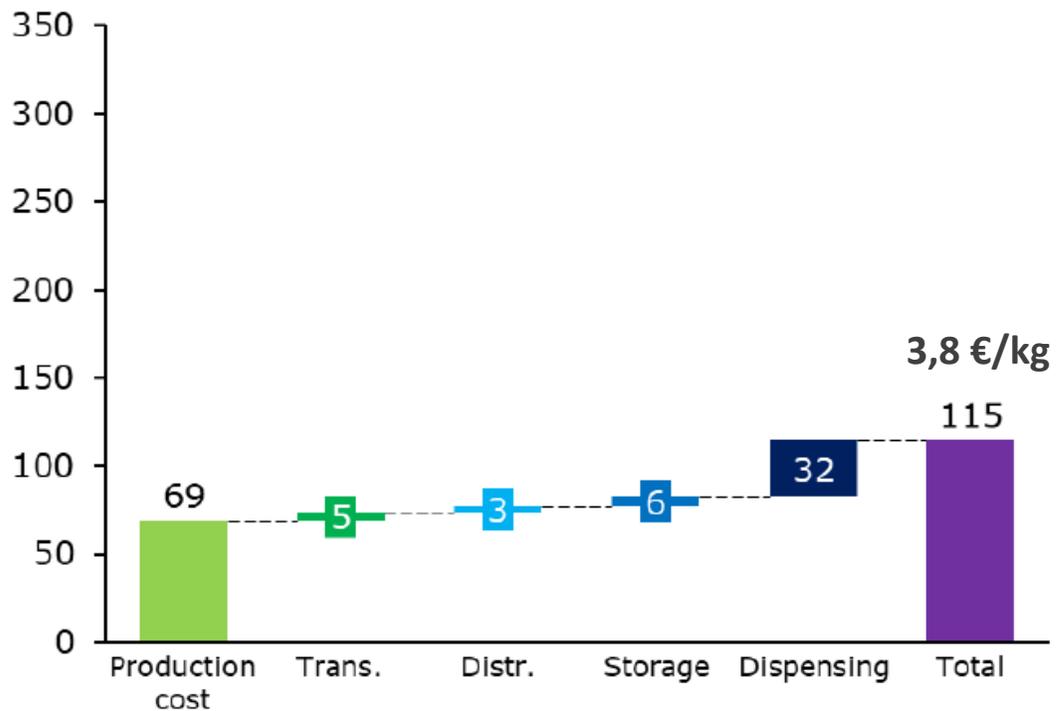
Coût de substitution de l'électrolyse au vaporeformage, pour une livraison annuelle de 630 000 tonnes en France Horizon 2035



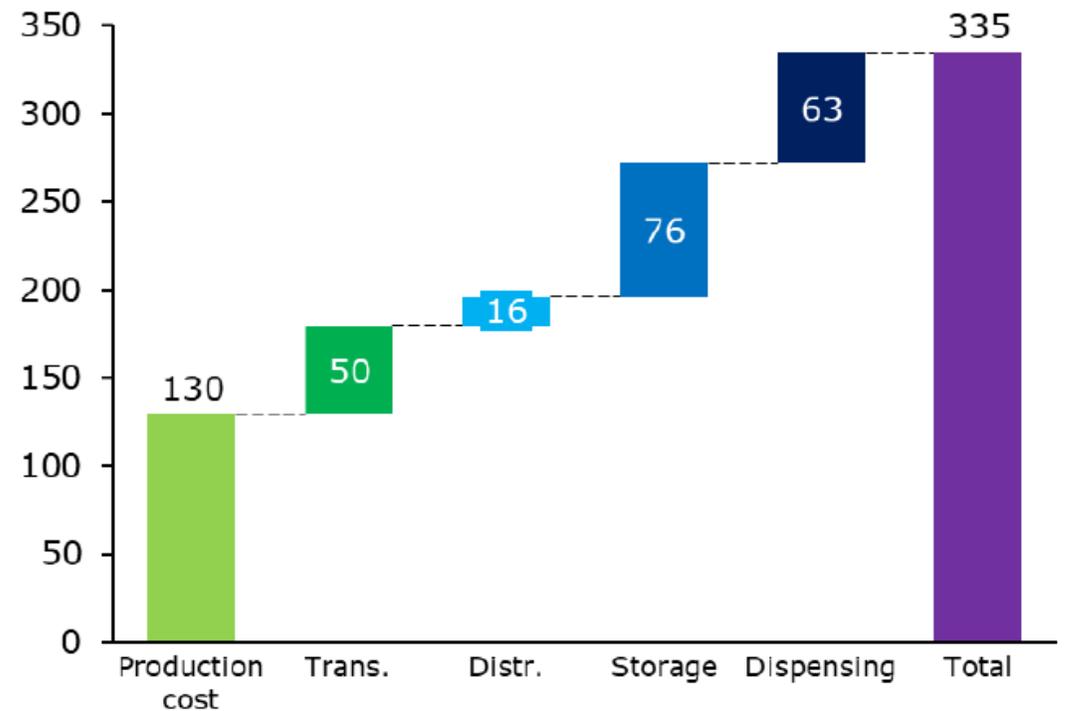
- Vaporeformage
- Coûts de stockage
- Coûts fixes d'électrolyse
- Adaptation du parc de production d'électricité
- Coûts des réseaux internes et publics
- Coûts variables de production d'électricité
- Total

Breakdown of costs for delivered hydrogen in 2020 - example cases

Low Cost Example

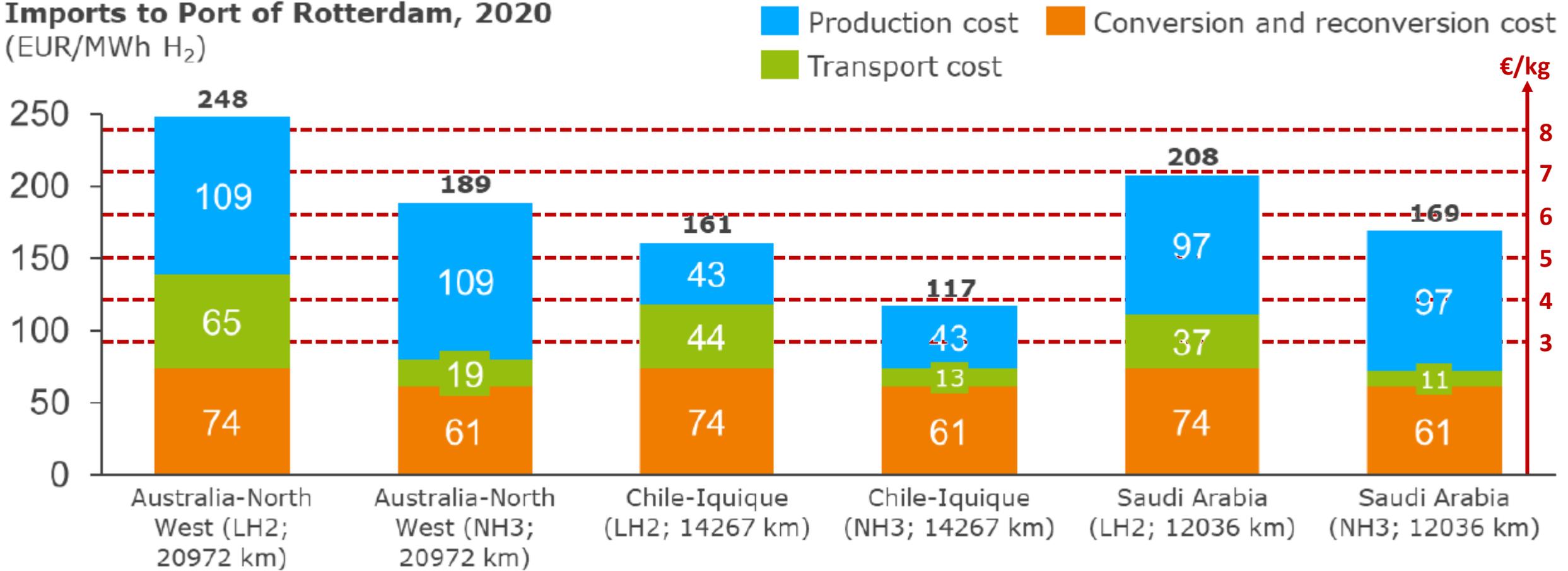
levelized cost (EUR2019/MWh H₂ LHV)

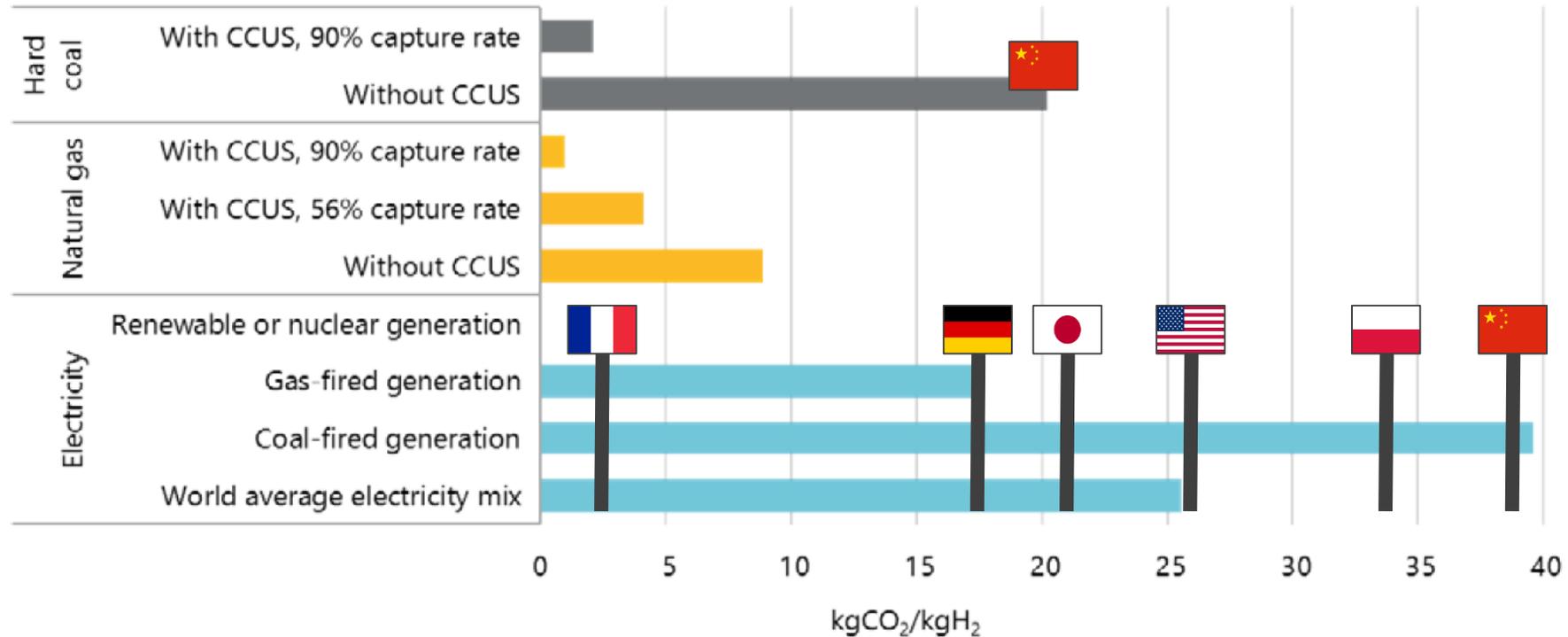
High Cost Example

levelized cost (EUR2019/MWh H₂ LHV)

Levelized costs of import of hydrogen and hydrogen carriers to Port of Rotterdam via ship in the year 2020

Imports to Port of Rotterdam, 2020
(EUR/MWh H₂)

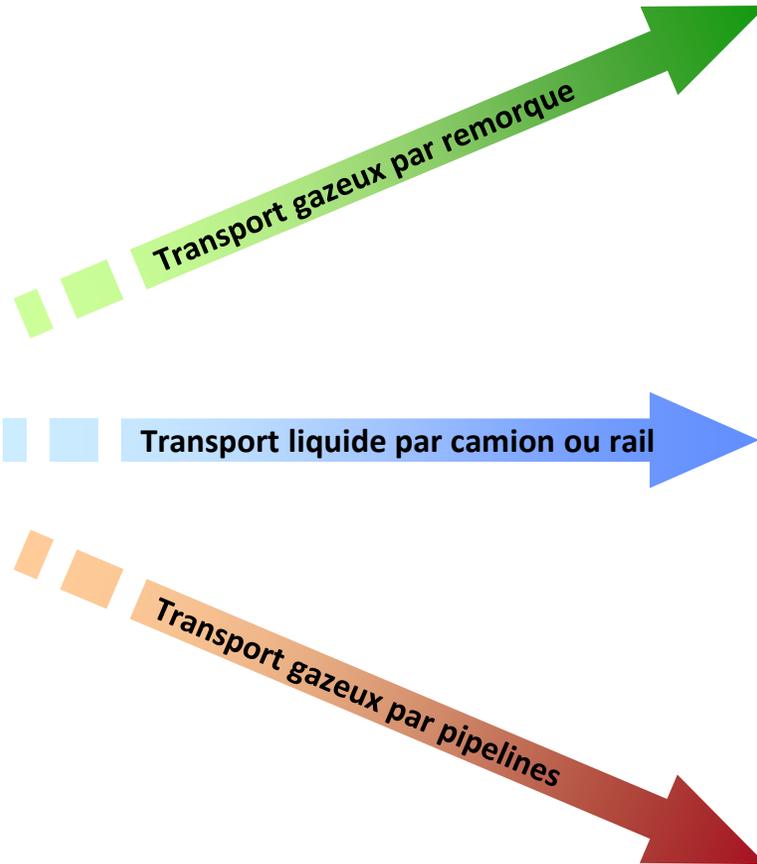


CO₂ intensity of hydrogen production

- The CO₂ intensity of hydrogen directly from natural gas is half of that from coal and nearly half that from gas-fired electricity
- The CO₂ intensity of electrolysis depends on the CO₂ intensity of the electricity.



Production centralisée
d'hydrogène



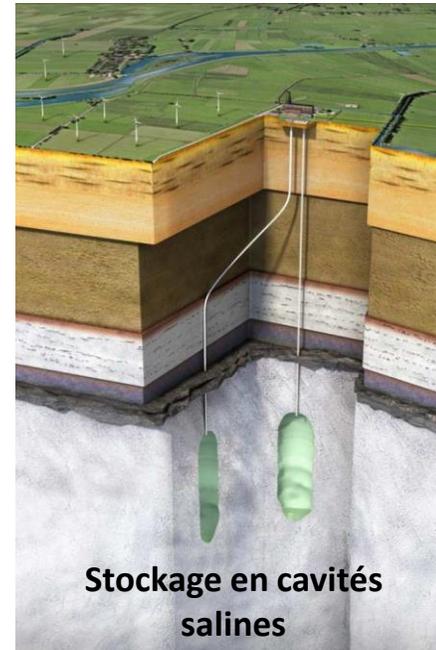
● Réseaux de pipelines

- Europe : 1500 km
- Etats-Unis : 1150 km

Infrastructure de distribution hydrogène en Europe



- Stockage géologique
- Stockage gazeux sous hautes pressions (200-700 bar)
- Stockage liquide cryogénique (- 253 °C)
- Stockage sous hydrures métalliques
- Stockage sous hydrures chimiques (NaBH_4 , LiBH_4)
- Liquid Organic Hydrogen Carriers (LOHC)
- NH_3

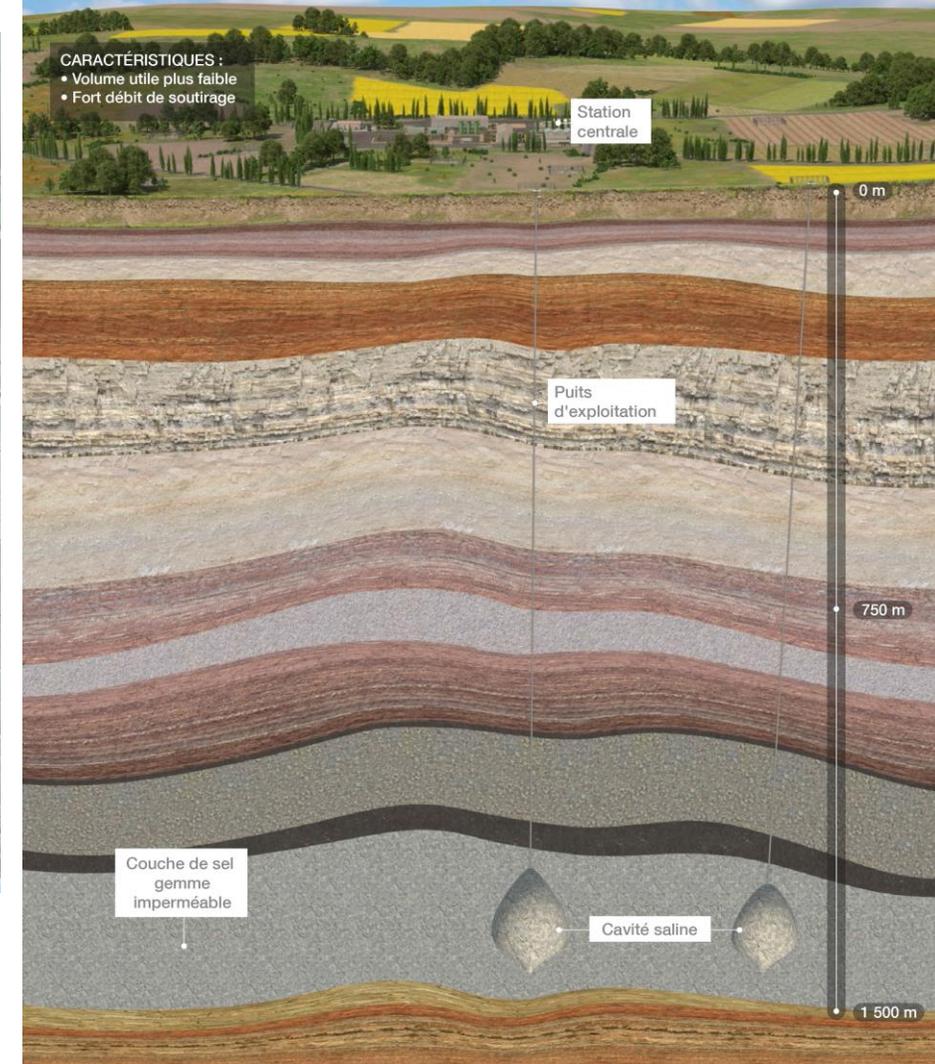




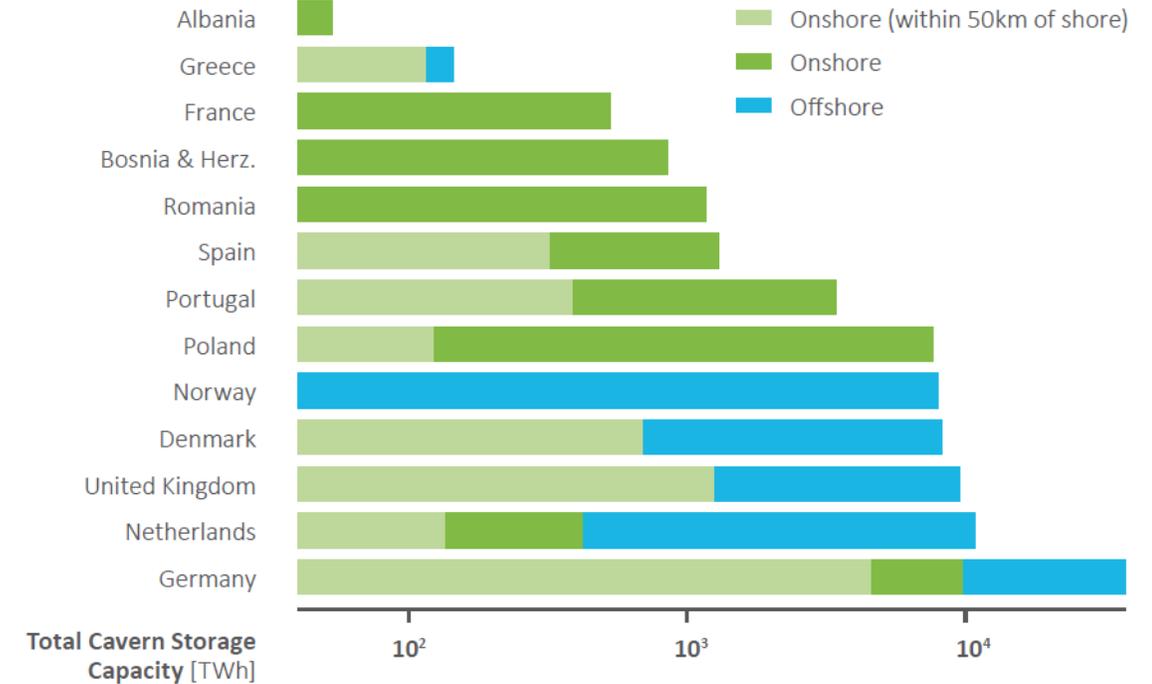
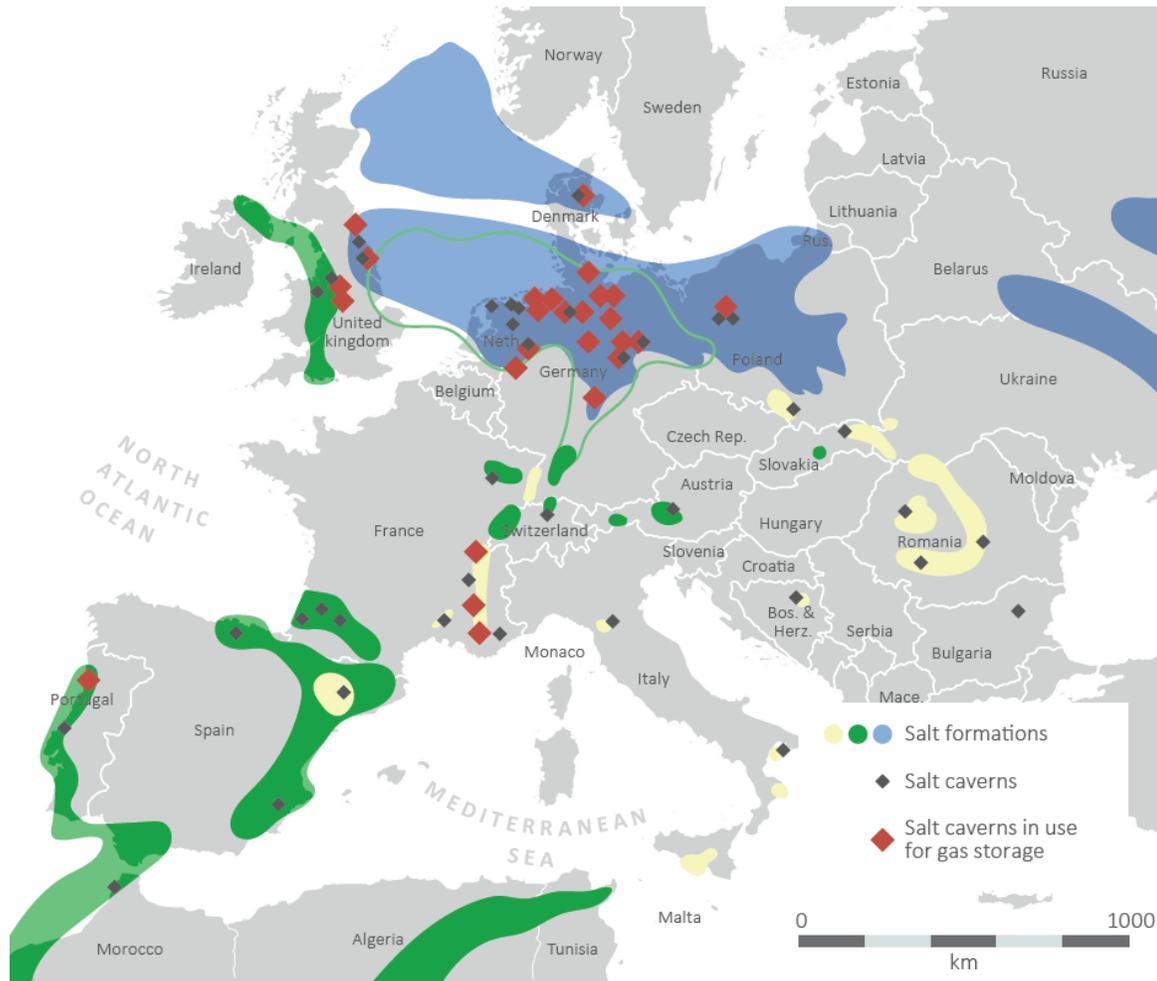
Le stockage souterrain de gaz en cavités salines

storengy

- CARACTÉRISTIQUES :
- Volume utile plus faible
 - Fort débit de soutirage

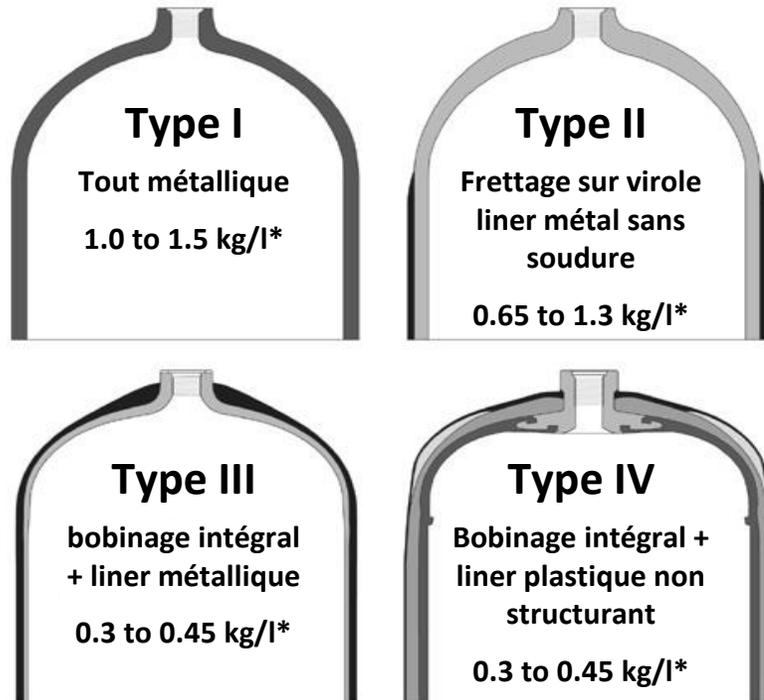


Capacité de stockage de l'hydrogène en cavités salines en Europe



Salt cavern hydrogen storage potential in Europe

Salt formations with salt caverns throughout Europe.
The red diamonds are salt caverns in use for natural gas storage

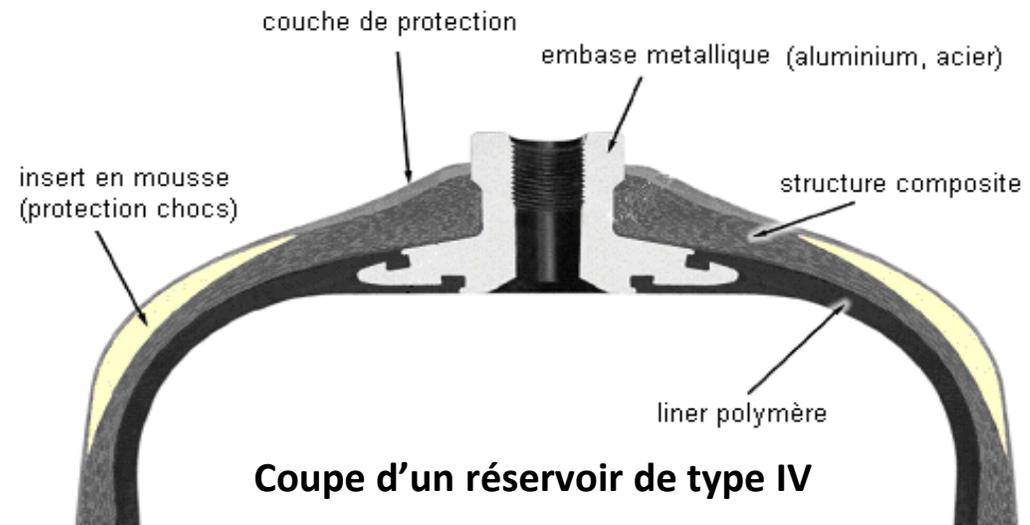


* Fourchette de masse classique pour un design de 200 bar

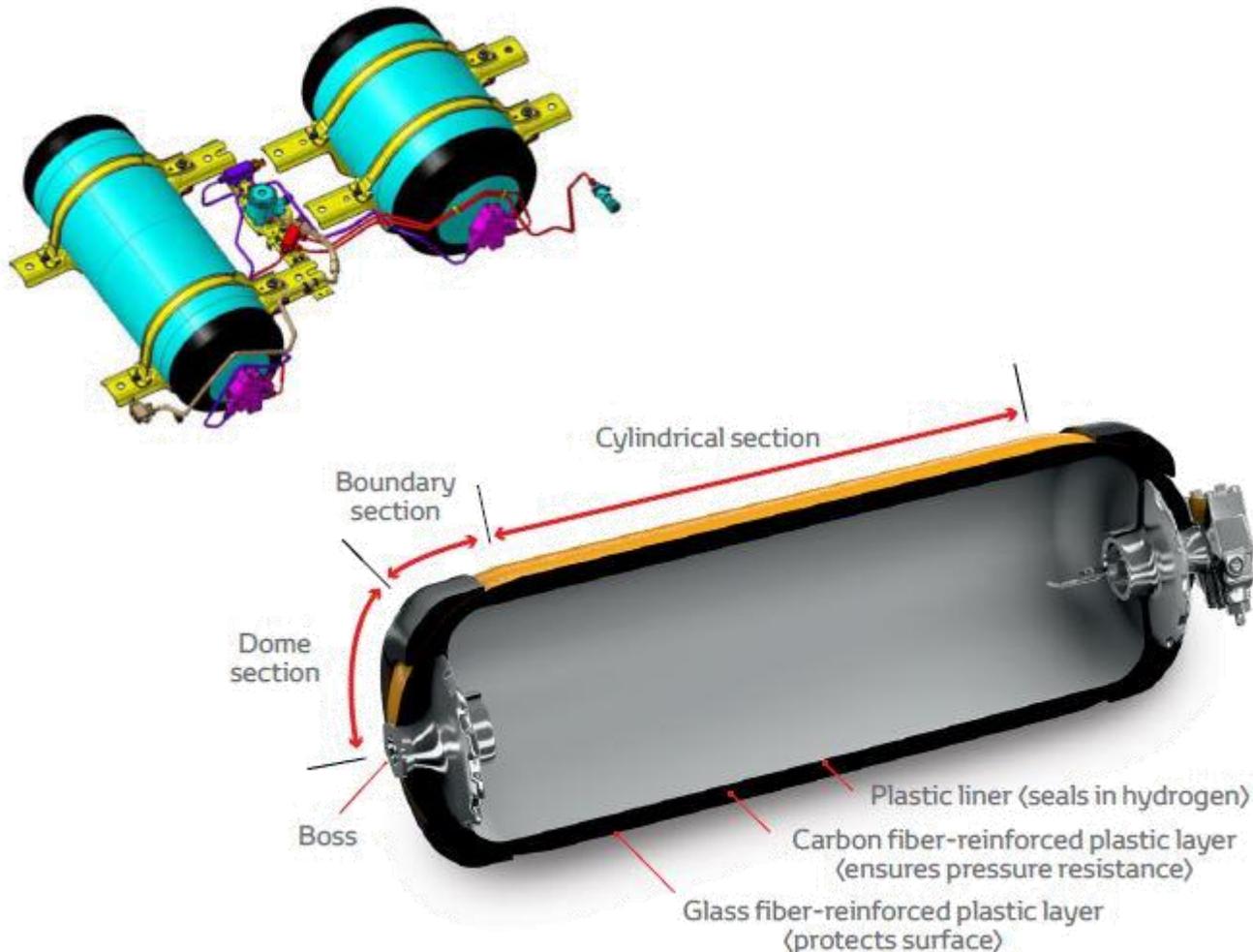
Avantages du réservoir de type IV

- pas de fragilisation à l' H_2
- bonne résistance à la fatigue
- faible masse
- pression de service élevée
- ...

Les différents types de réservoirs



Exemple de conception d'un système complet



Exemple de la Toyota Mirai



Intégration de réservoirs haute pression (700 bar, type IV) dans la Toyota Mirai

2 réservoirs d'hydrogène

- Type IV
- Volumes des réservoirs : 60 + 62.4 L
- Masse des réservoirs (sans hydrogène et sans électrovannes) : 42.8 + 44.7 kg
- Masse d'hydrogène : 5.0 kg
- Pression nominale : 700 bar
- Densité massique : 5.7 wt%

Du stockage massif



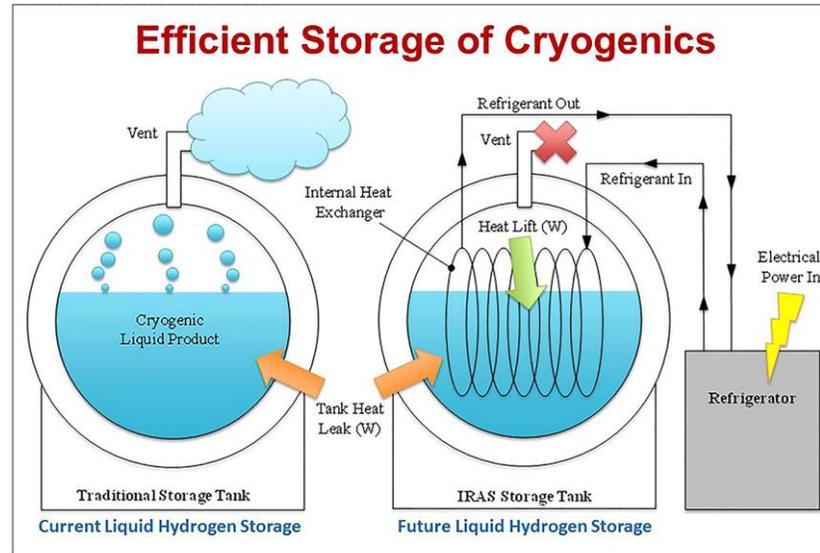
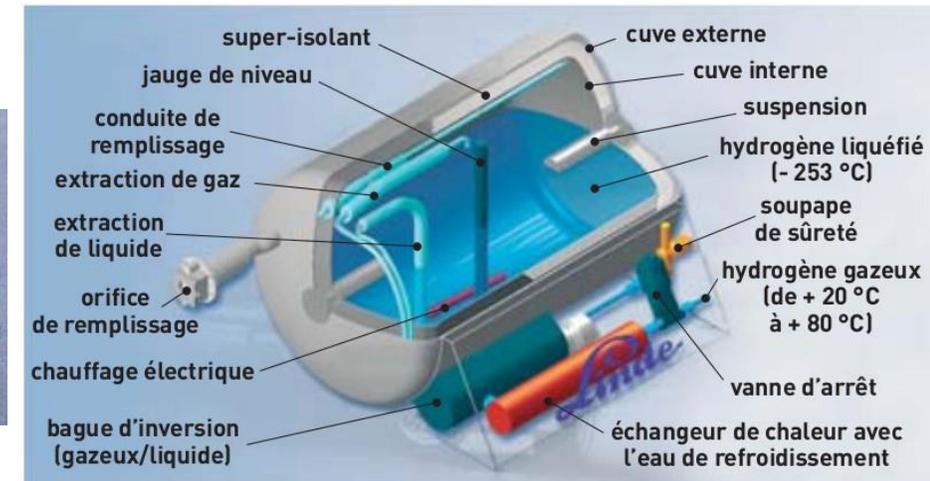
At Launch Pad 39B at NASA's Kennedy Space Center, liquid hydrogen tank that supported space shuttle launches for 30 years

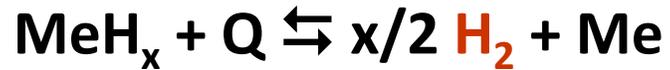
Au véhicule



Opel Hydrogen3 :
Opel Zafira
PEMFC + réservoir H₂ liquide

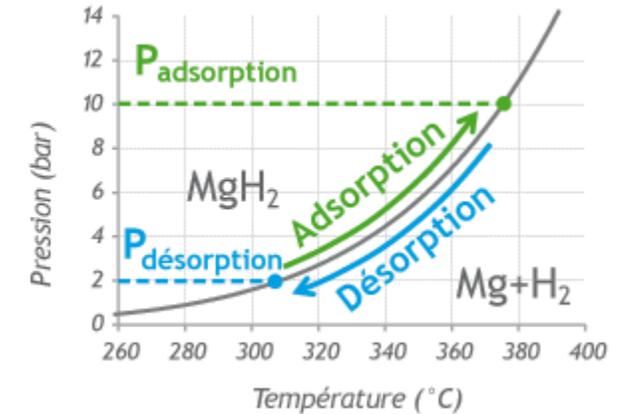
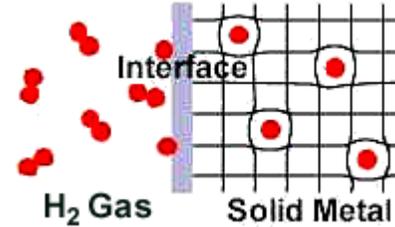
<https://www.nasa.gov/content/liquid-hydrogen-the-fuel-of-choice-for-space-exploration>
<https://www.nasa.gov/feature/innovative-liquid-hydrogen-storage-to-support-space-launch-system>

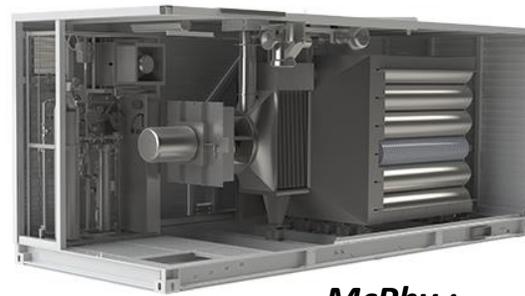


Exemples :

- Métaux : Mg, Pd ...
- Composés intermétalliques : MgNi, FeTi, LaNi₅ ...



Composés hydrures



McPhy :
réservoir intégré d'hydrure MgH₂

● Caractéristiques

- Capacité massique d'absorption
- Température d'équilibre (1 bar)
- Sensibilité aux impuretés dans H₂
- Cinétique absorption/désorption

hydrure de Mg

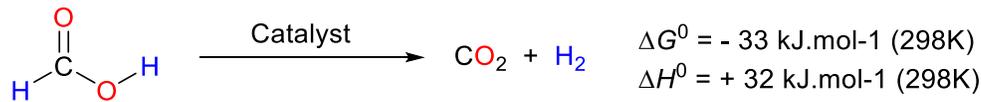
7,6 %
279 °C
O₂, H₂O
très lente

hydrure de LaNi₅

1,5 %
15 °C
O₂, H₂O, CO
très rapide

Different unsaturated organic compounds can be used as “Liquid Organic Hydrogen Carriers” (LOHC)

- Cycloalkanes (cyclohexane, methyl-cyclohexane...)
- N-Heterocycles (N-ethylcarbazole...)
- Formic acid



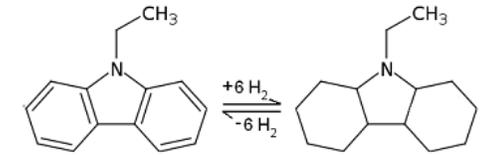
Main parameters of promising LOHC

LOHC couple	B.p., deg C	Wt. % H	T dehydro, deg C	Dehydrogenation ΔH , k J/mol H ₂	Energy density, Wh/L
Methylcyclohexane/toluene	101	6.5	280	-67.4	1345
Perhydrodibenzyltoluenes /dibenzyltoluenes	390	6.2			1735
Decalin/naphtalene	186	7.2	274	-59.0	1893
C ₁₄ H ₂₅ N/N-ethylcarbazole	281	5.8	128	-51.9	2010
Perhydroquinoline/ quinoline	214	6.5			1715
C ₅ H ₁₂ S/ C ₅ H ₆ S	113	5.8			1370
Propanol-2/acetone	56	3.4	170	-68.8	750
1,4-butanediol/ γ -butyrolactone	204	4.5	84	-42.2	1371
2,4-pentenediol/ valerolactone	140	3.8		--45.6	1105
Ammonia	-33	17.8			3170
Liquid hydrogen		100	-	-	2340 (1640)

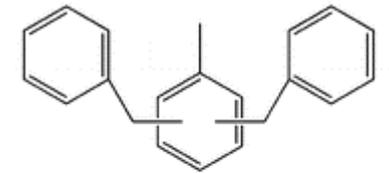
<https://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/acs.jced.5b00671>

https://arpa-e.energy.gov/sites/default/files/Soloveichik_Intro_TransportationFuels_Workshop.pdf

Reversible hydrogenation of N-ethylcarbazole

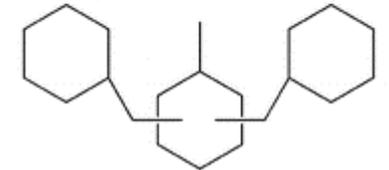


Non-Hydrogenated LOHC



Dibenzyltoluene/
Perhydrodibenzyltoluene

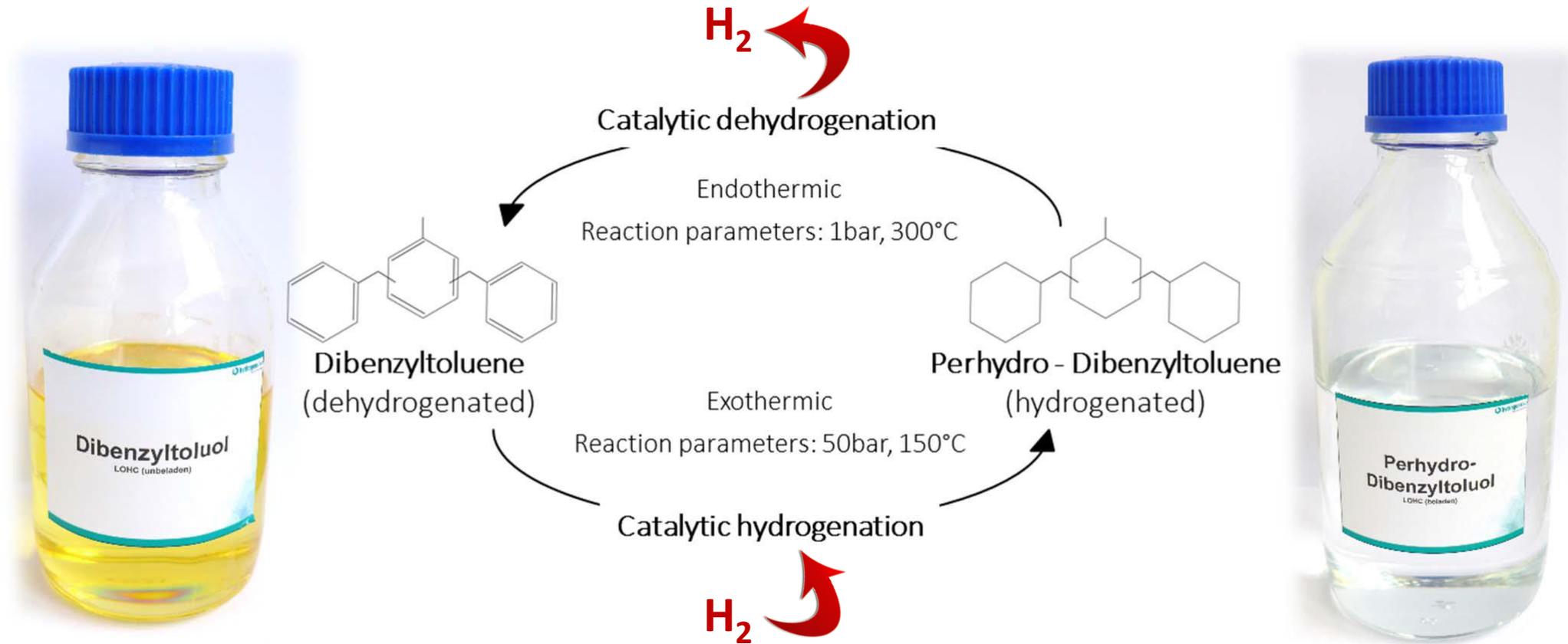
Hydrogenated LOHC



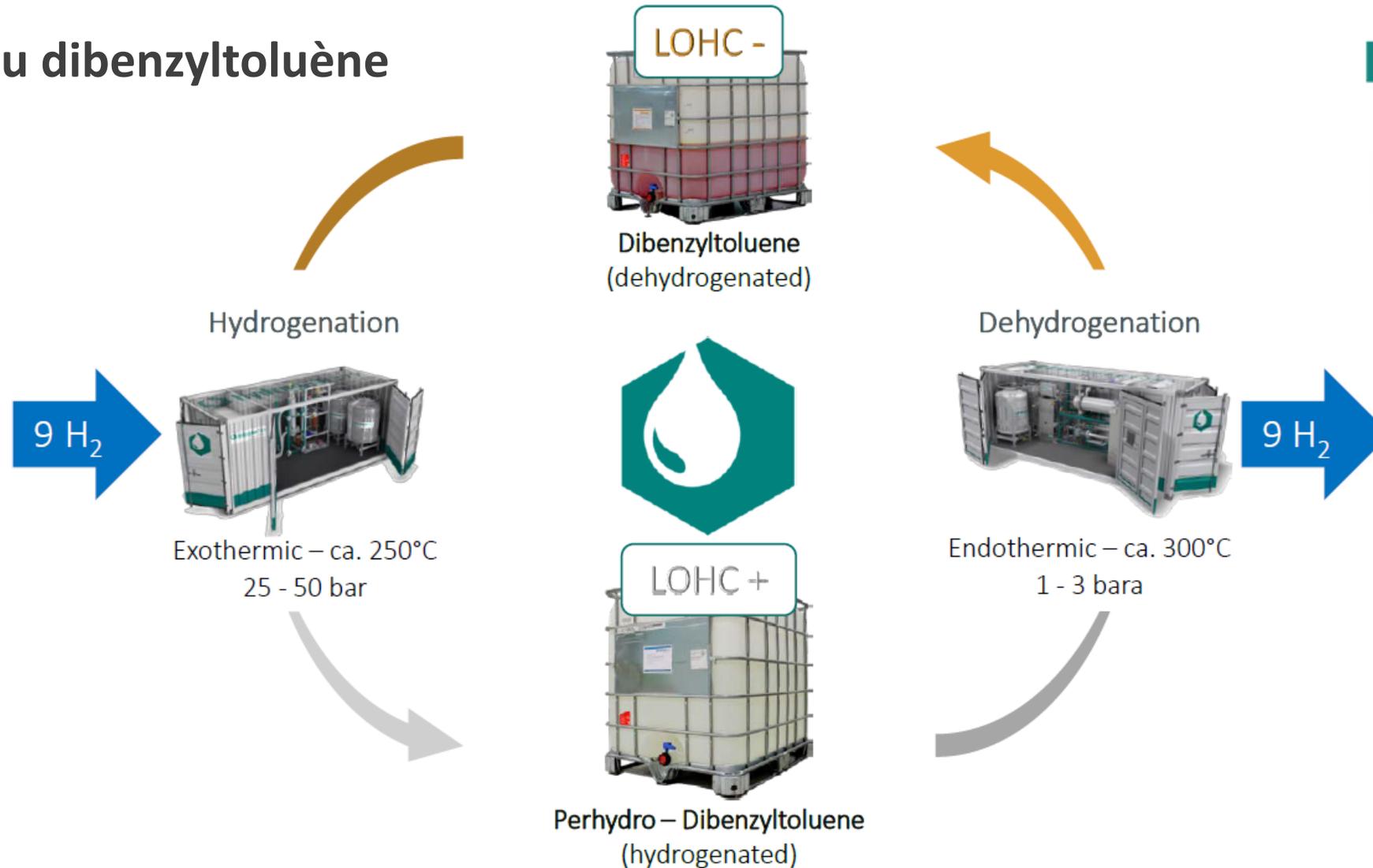
covalion



Exemple du dibenzyltoluène

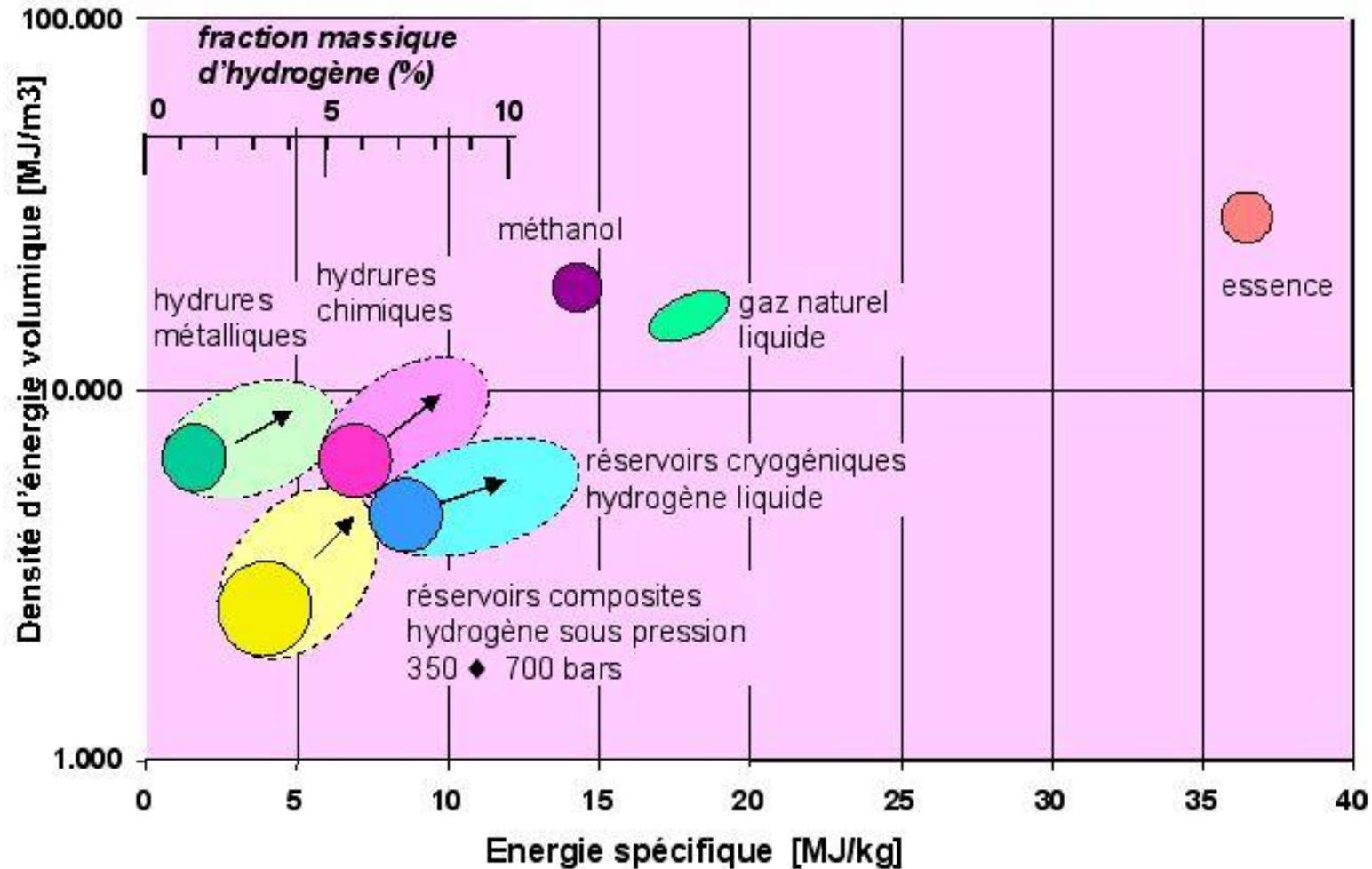


Exemple du dibenzyltoluène



<https://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/acs.jced.5b00671>

https://arpa-e.energy.gov/sites/default/files/Soloveichik_Intro_TransportationFuels_Workshop.pdf

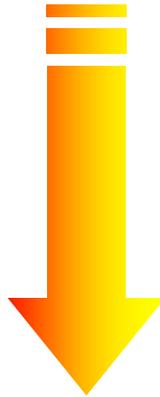




Strong R&D efforts recommended
Still remaining R&D efforts
Slight/No more R&D efforts necessary

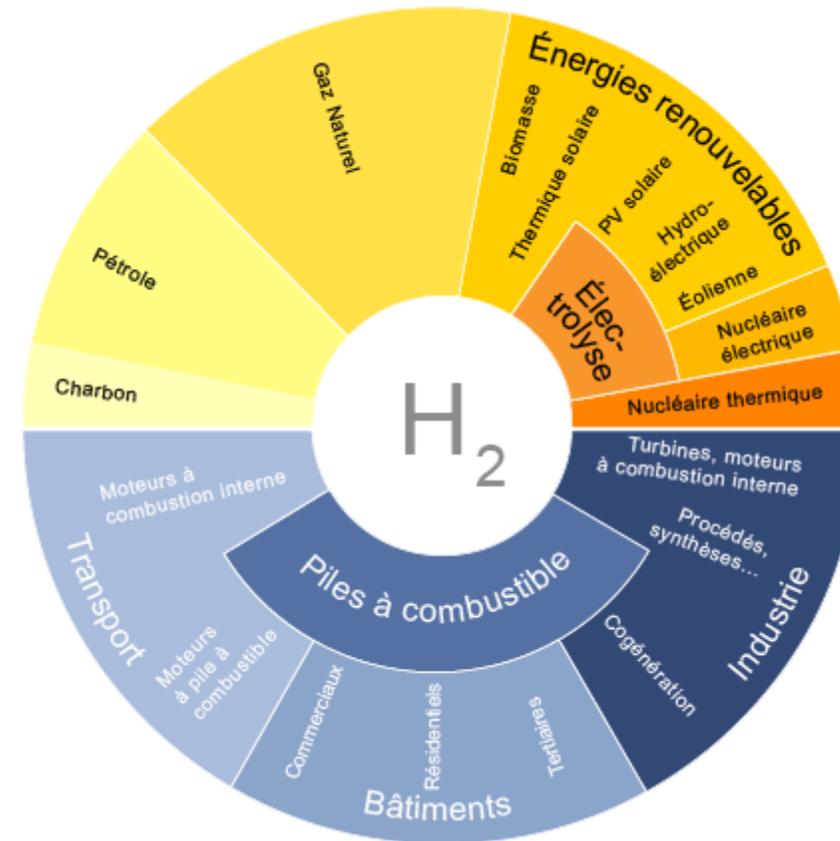
	Volumetric energy density (kWh/l)	Gravimetric energy density (kWh/kg)	Refuelling rate (kWh/min)	Hydrogen loss rate (g/h/kg)	Conformability 1 = cylindrical 5 = complex
C-H ₂ 350 bar storage system	0.5	1.3	50	0	2
StorHy C-H ₂ 700 bar storage systems Type III ¹⁾	0.8	1.3	50	0	2
StorHy C-H ₂ 700 bar storage system Type IV ¹⁾	0.8	1.5	50	0.002	2
L-H ₂ conventional	1.2	2	100	1.3	1
StorHy L-H ₂ cylindrical ²⁾	1.3	5.0	100	1	1
StorHy L-H ₂ Free-form ²⁾ demonstrator	1.2	5.9	100	0.8	4
SOLID storage Low temp. hydrides ³⁾	0.8	0.4	13	0	3
StorHy SOLID storage NaAlH ₄ Pilot tank ⁴⁾	0.7	0.3	25	0	3
StorHy SOLID storage NaAlH ₄ Forecast ⁵⁾	1.2	0.7	25	0	3
Li Ion Battery ⁶⁾	0.2	0.1	0.5 ⁷⁾	0	4
Gasoline Tank ⁸⁾	7	8	>200	0	5

Offre



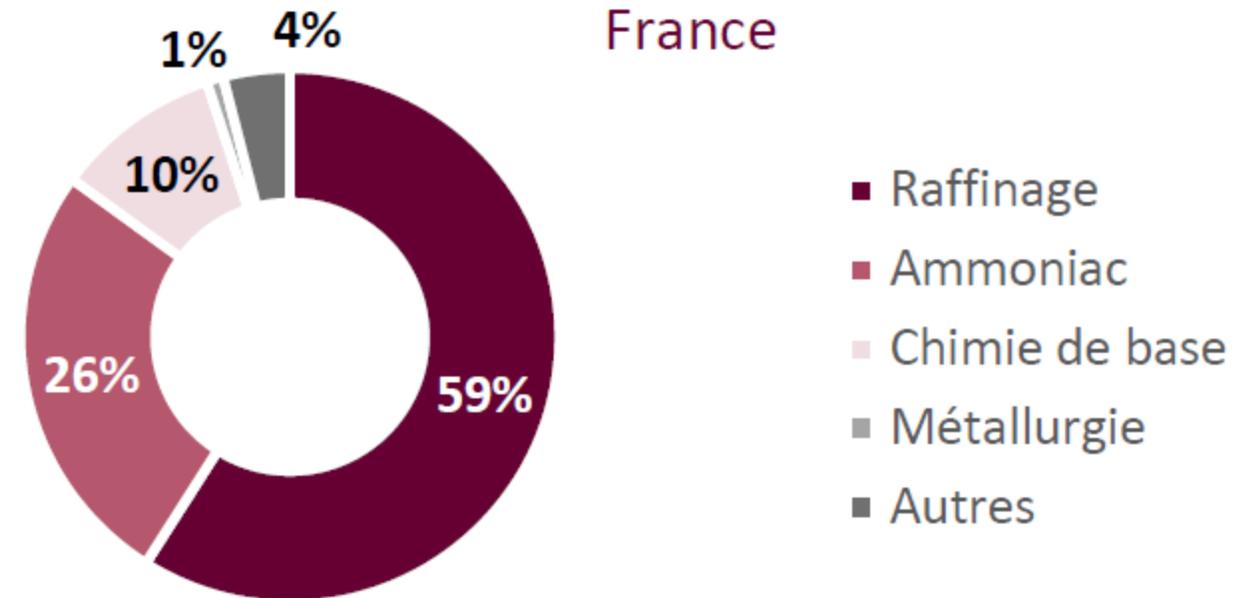
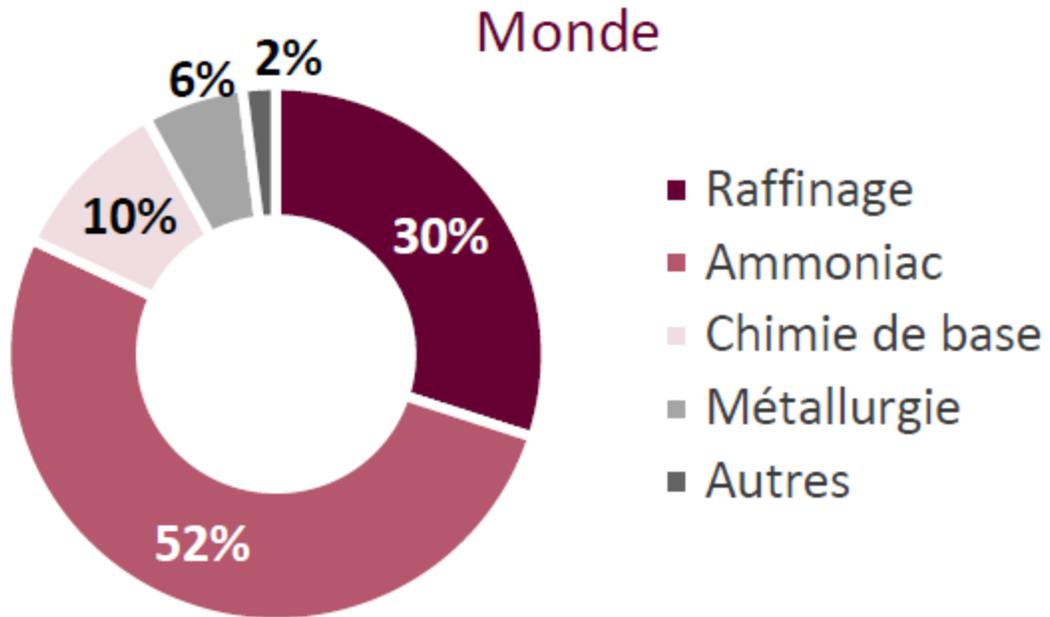
PROCÉDÉS DE PRODUCTION

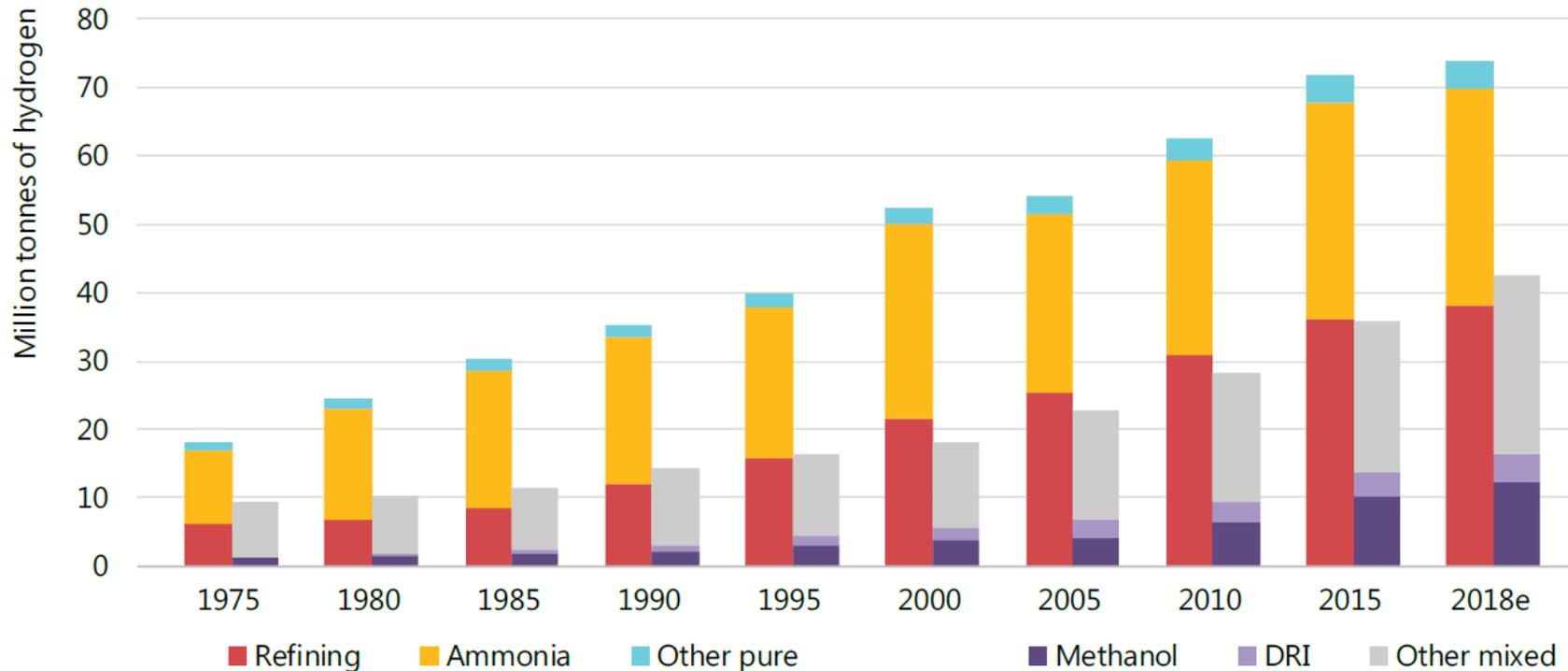
APPLICATIONS



Demande

- L'industrie chimique
- Moteurs thermiques (propulsion spatiale, turbine H₂, moteur à combustion interne...)
- Piles à combustible (résidentiel, stationnaire, transport, marchés de niche...)
- Stockage des énergies intermittentes





Notes: DRI = direct reduced iron steel production. Refining, ammonia and "other pure" represent demand for specific applications that require hydrogen with only small levels of additives or contaminants tolerated. Methanol, DRI and "other mixed" represent demand for applications that use hydrogen as part of a mixture of gases, such as synthesis gas, for fuel or feedstock.

Source: IEA 2019. All rights reserved.

Around 70 MtH₂/yr is used today in pure form, mostly for oil refining and ammonia manufacture for fertilisers; a further 45 MtH₂ is used in industry without prior separation from other gases.

● Industrie chimique

- Principalement utilisé pour la production d'ammoniac NH_3 principalement pour la fabrication des engrais azotés

● Industrie pétrochimique

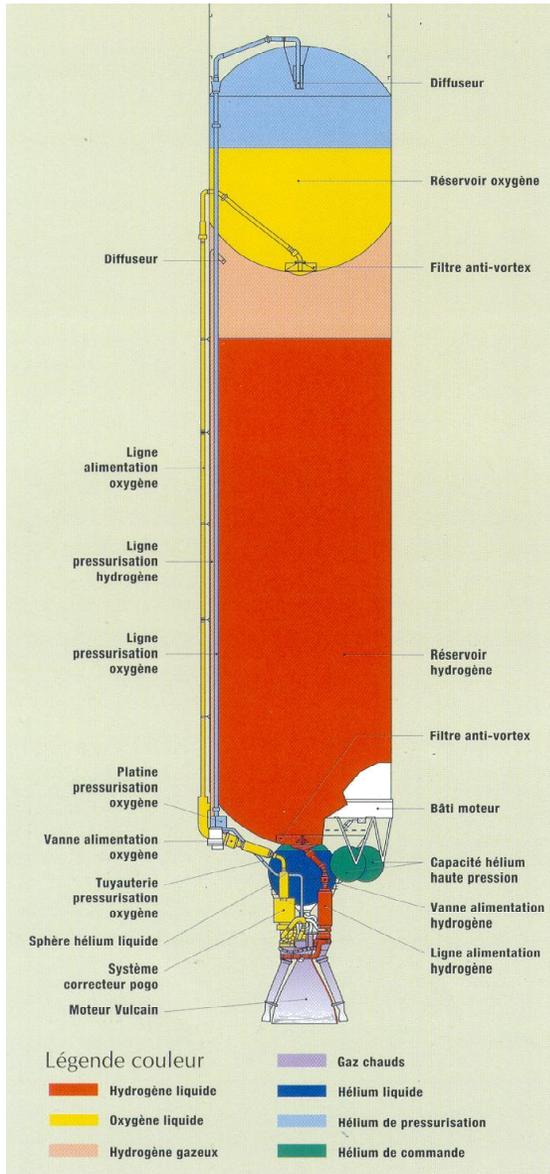
- De plus en plus utilisé pour répondre aux spécifications sur les carburants et produits pétroliers (désulfuration du fioul et de l'essence...)

● Autres applications

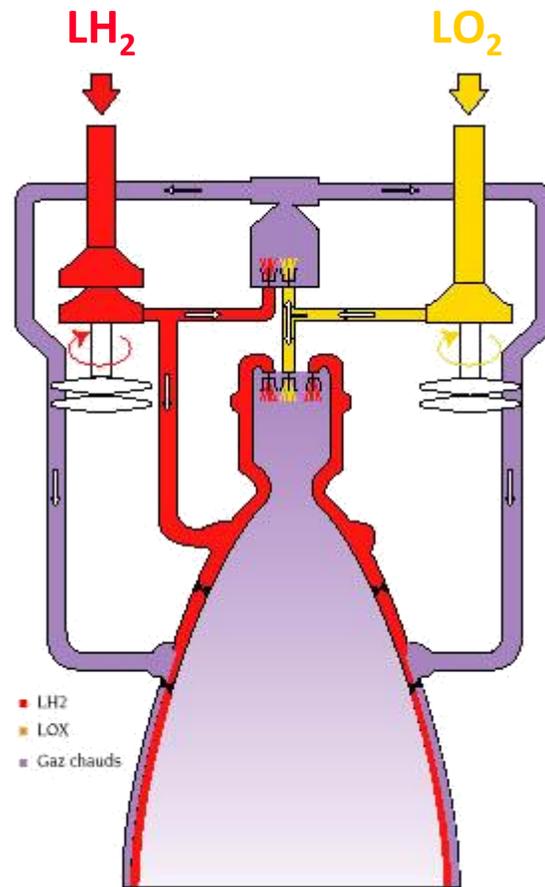
- Agroalimentaire : production d'huiles alimentaires
- Verrerie : polissage
- Construction mécanique/métallique : traitement thermique de divers métaux
- Semi-conducteurs : protection contre les impuretés
- Sidérurgie : Atmosphère de traitement thermique
- Laboratoires : Analyses et maîtrise de la qualité en milieu industriel et hospitalier

Linde
Site de production
d'hydrogène

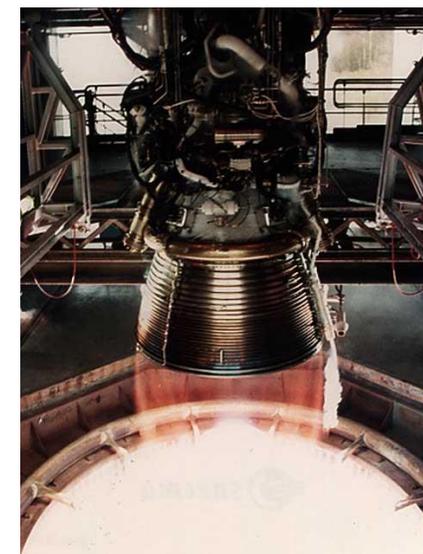




Le moteur Vulcain II pour la propulsion d'Ariane V



VULCAIN 2

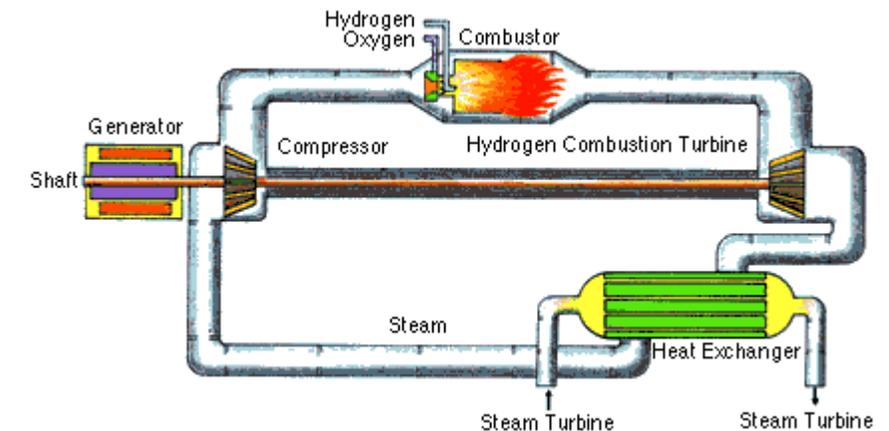
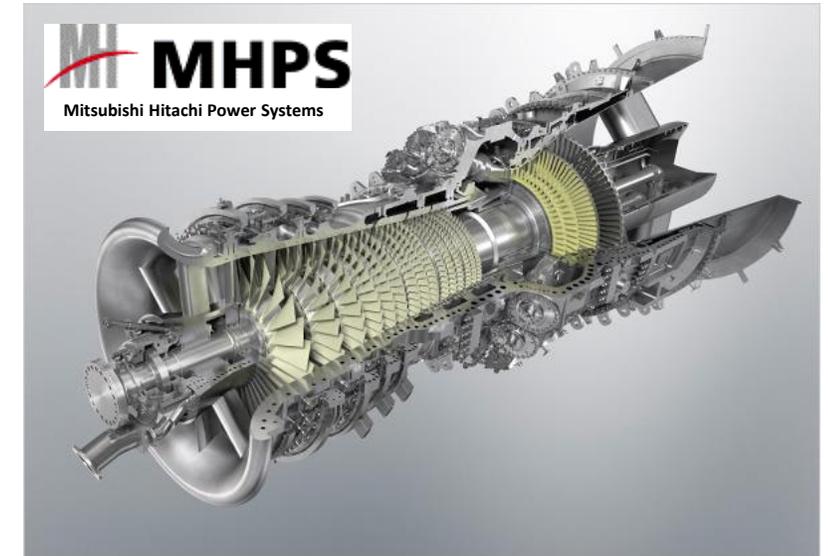


● A ce jour, les turbines H₂ présentent plusieurs limitations :

- ✦ Rendement faible
- ✦ Forte émissions de NO_x (70 – 200 ppm)

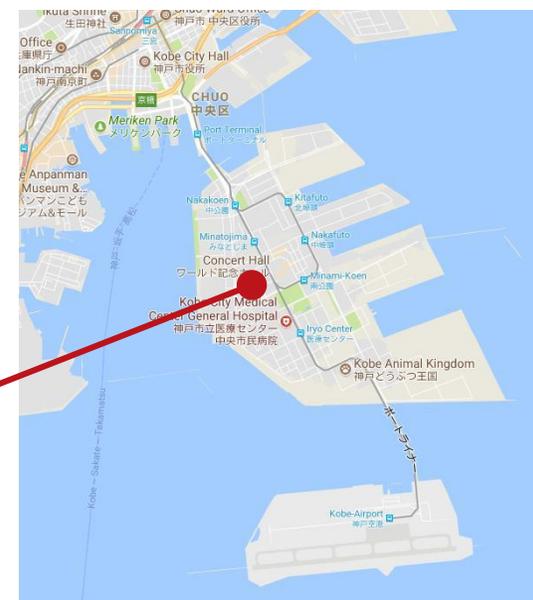
● Les enjeux technologiques des turbines H₂ sont :

- ✦ Réduction des émissions NO_x
- ✦ Augmentation du rendement
- ✦ Gestion de l'eau de combustion
- ✦ Alimentation en combustible
- ✦ Faible énergie d'allumage
- ✦ Développement matériaux



Hydrogen Power Station in Kobe

- ▶ Power and heat management system using hydrogen (30%) and natural gas as a fuel.
- ▶ Power Generation: 1 MW class
- ▶ Partners: Obayashi (Leader), Kawasaki, Kobe City, KEPCO, Iwatani, Kenes, Osaka University (~FY2018)
- ▶ Period: FY2016~FY2019



Demonstration site

https://www.icef-forum.org/pdf2018/program/cs1/Presentation_Motohiko_Nishimura_180928-02.pdf

Hydrogène : stockage tampon des énergies renouvelables (solaire, éolien...)

Exemple : projet MYRTE (Corse)



MYRTE demonstration platform



Electrolysis and fuel cell
– inside the Energy
conversion building

Hydrogen and oxygen
storage



Key facts and figures

Partners	Corsica University, CEA
Location	University of Ajaccio
Power output	100 kWe (1 st phase) / 150 kWe (2 nd phase)
Delivery schedule	Dec. 2011 (1 st phase) / Sept. 2013 (2 nd phase)
Contract signature	2009

Project highlights

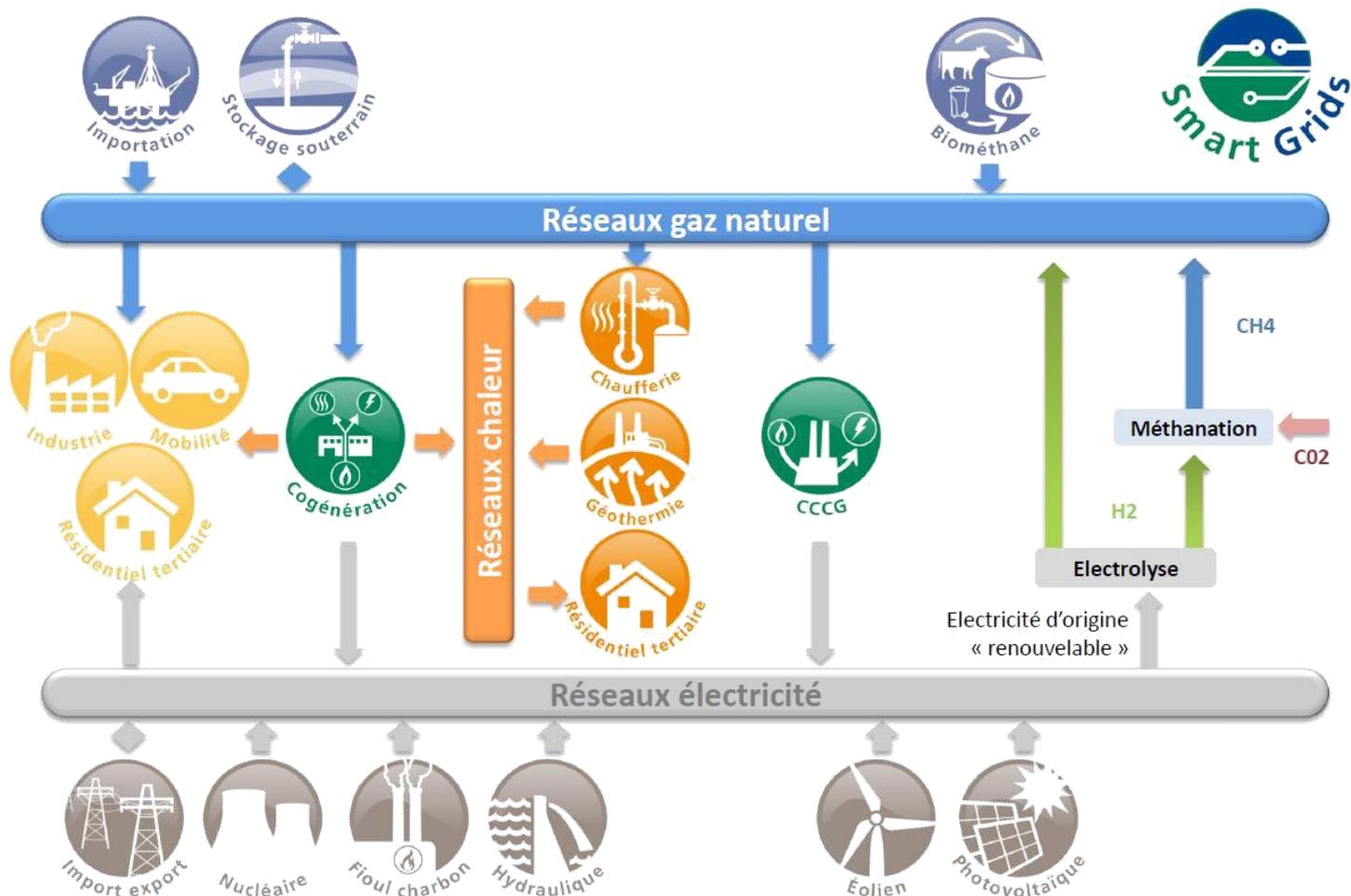
- MYRTE platform demonstrates a hydrogen energy management and storage chain coupled to 500 kWp solar panels
- AREVA Energy Storage systems delivered in May 2011
- Grid connection completed in December 2011
- Inaugurated in January 2012
- Phase 2 expected to enter in operation in September 2013



<https://www.universita.corsica/fr/recherche/plateforme-energetique-myрте/>

http://www.afhypac.org/documents/publications/colloques/JourneeH2territoires2015/jh2_cherbourg_corse_myрте_17_juin.pdf

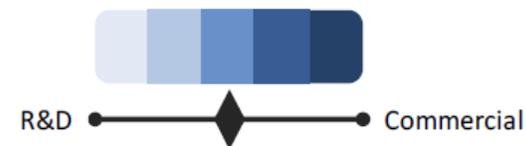
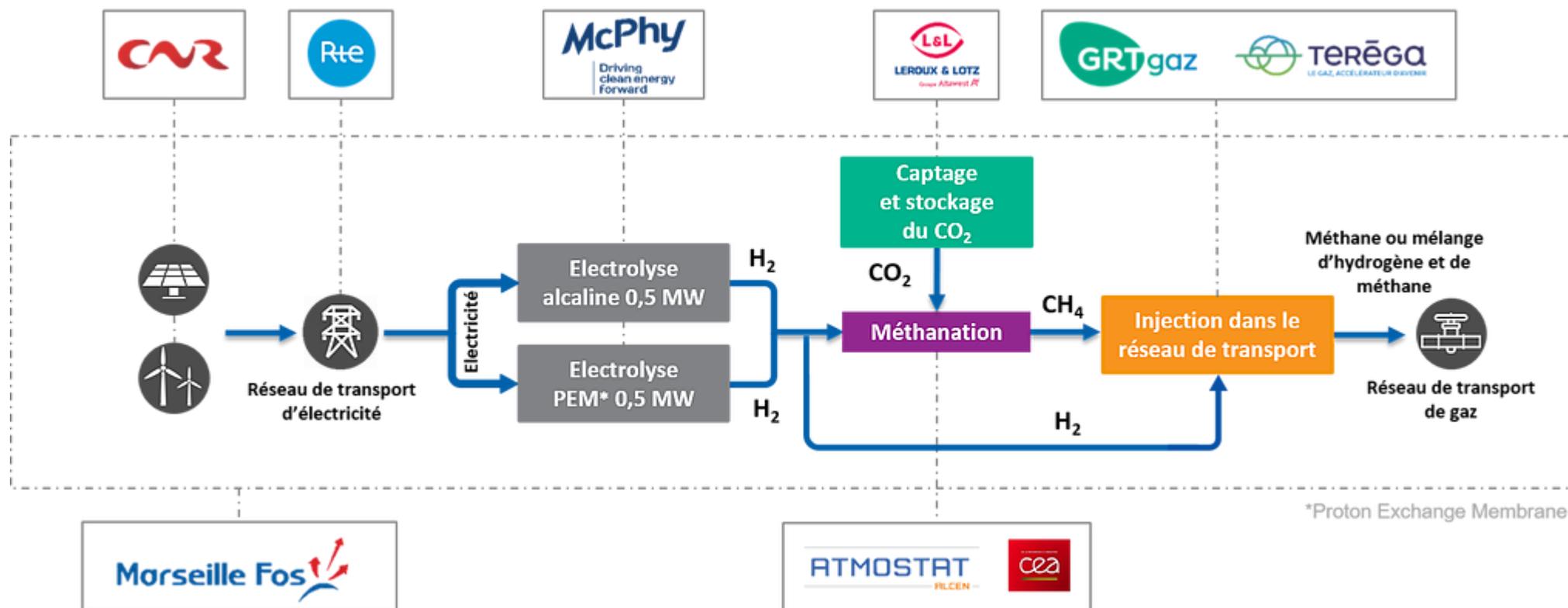
Hydrogène : participe à l'interconnection des réseaux énergétiques



E-ON: Unité pilote de Falkenhagen (Allemagne)
2 000 MWh/an



Le projet Jupiter 1000



Première démonstration mondiale (2014)

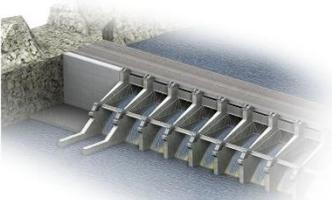


Audi e-diesel plant Laufenburg

11/17

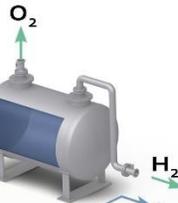
1. Renewable electricity

Renewable energy obtained from hydropower.



2. Electrolysis

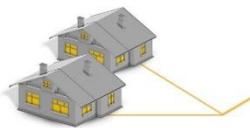
Electrolysis splits water into hydrogen and oxygen. Oxygen dissipates into the surrounding air.

O₂H₂CO₂

CO₂ from sustainable sources or from the air.

3. Conversion

A two-step process turns CO₂ and hydrogen into hydrocarbon chains.



Heat for use in residential areas or in industry.

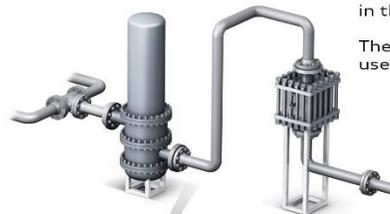


Renewable waxes for cosmetics, foodstuffs and chemical industries

Chemical synthesis

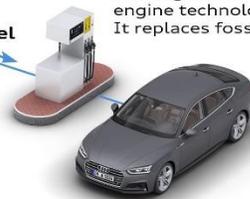
In the first step, hydrogen and CO₂ are converted to synthesis gas in the reverse water-gas shift reactor.

The Fischer-Tropsch reactor then uses this to build hydrocarbon chains.



Infrastructure compatibility

e-diesel is compatible with existing infrastructure and engine technologies. It replaces fossil fuel.

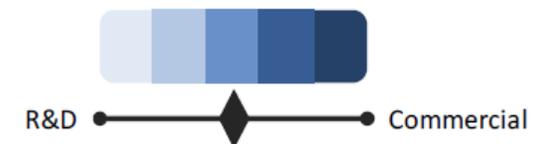


Almost CO₂-neutral e-diesel for mobility



- Industrial Power-to-Liquid showcase following the Sunfire Power-to-Liquid Process Patent
- Inaugurated in 2014
- More than 3000 kg of fuel produced
- ASTM conformity validated within Demo-SBK project

<https://www.audi-mediacycenter.com/en/press-releases/audi-steps-up-research-into-synthetic-fuels-9546>
<https://carbon-recycling2019.go.jp/dl/doc/2-5.pdf>

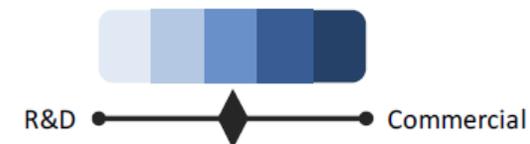
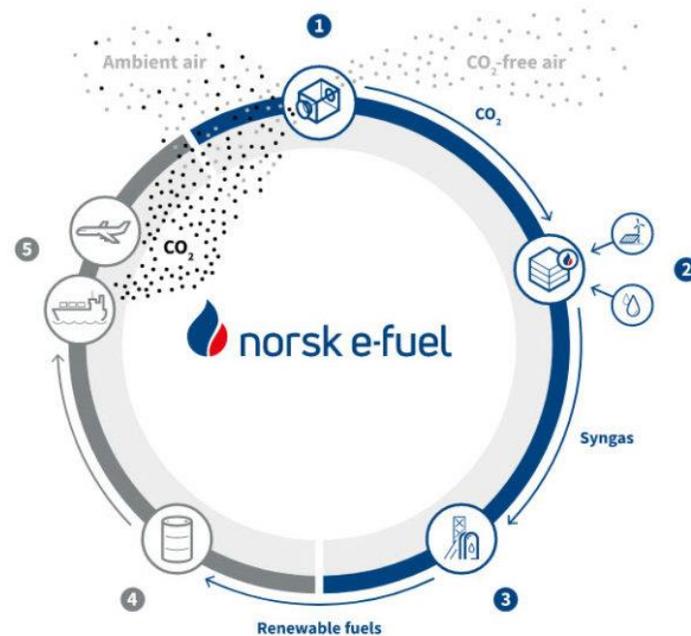


Le consortium Norsk e-Fuel va produire du kérosène zéro fossile à base d'hydrogène

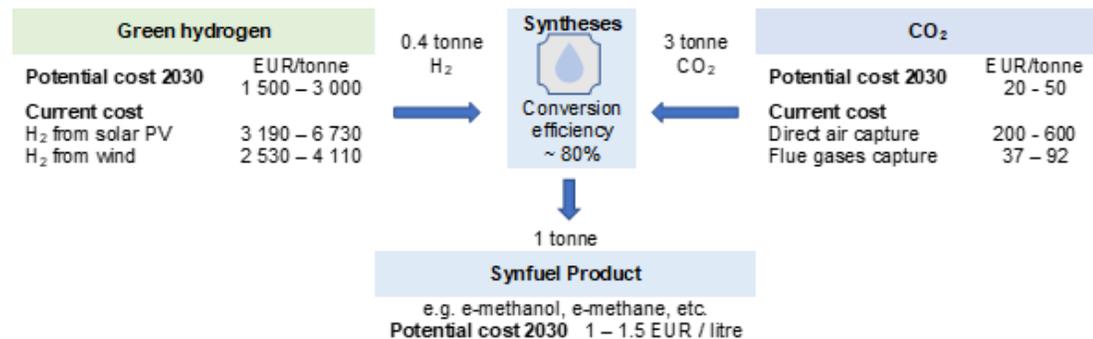


Une première unité de production de 10 millions de litres de kérosène de synthèse entrera en service en 2023 sur le site industriel Herøya à Porsgrunn dans le sud de la Norvège et à l'ouest d'Oslo.

<https://www.norsk-e-fuel.com/en/>
<https://energypost.eu/the-outlook-for-powerfuels-in-aviation-shipping/>

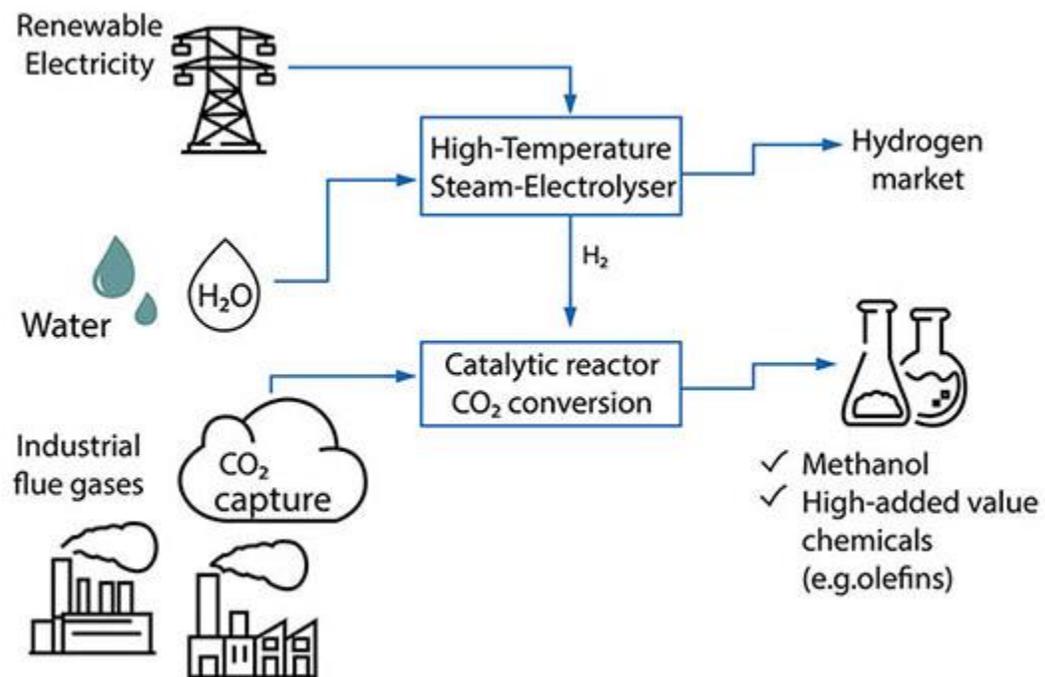


- 1 Capturing pure CO₂ from air
- 2 Syngas produced from CO₂ and water using 100% renewable electricity
- 3 Renewable fuels generated from syngas
- 4 Refined to final product
- 5 Utilisation of renewable fuels releases CO₂ back into the atmosphere



Le projet CatVIC (Catalytic Valorization of Industrial Carbon project) Un projet d'hydrogène vert sur la plateforme chimique de Roussillon

CatVIC

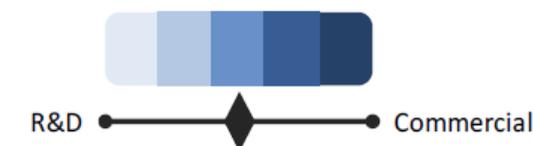
liten
ceatechOsiris
GIE Roussillon

ENTREPOSE

m2i
cec

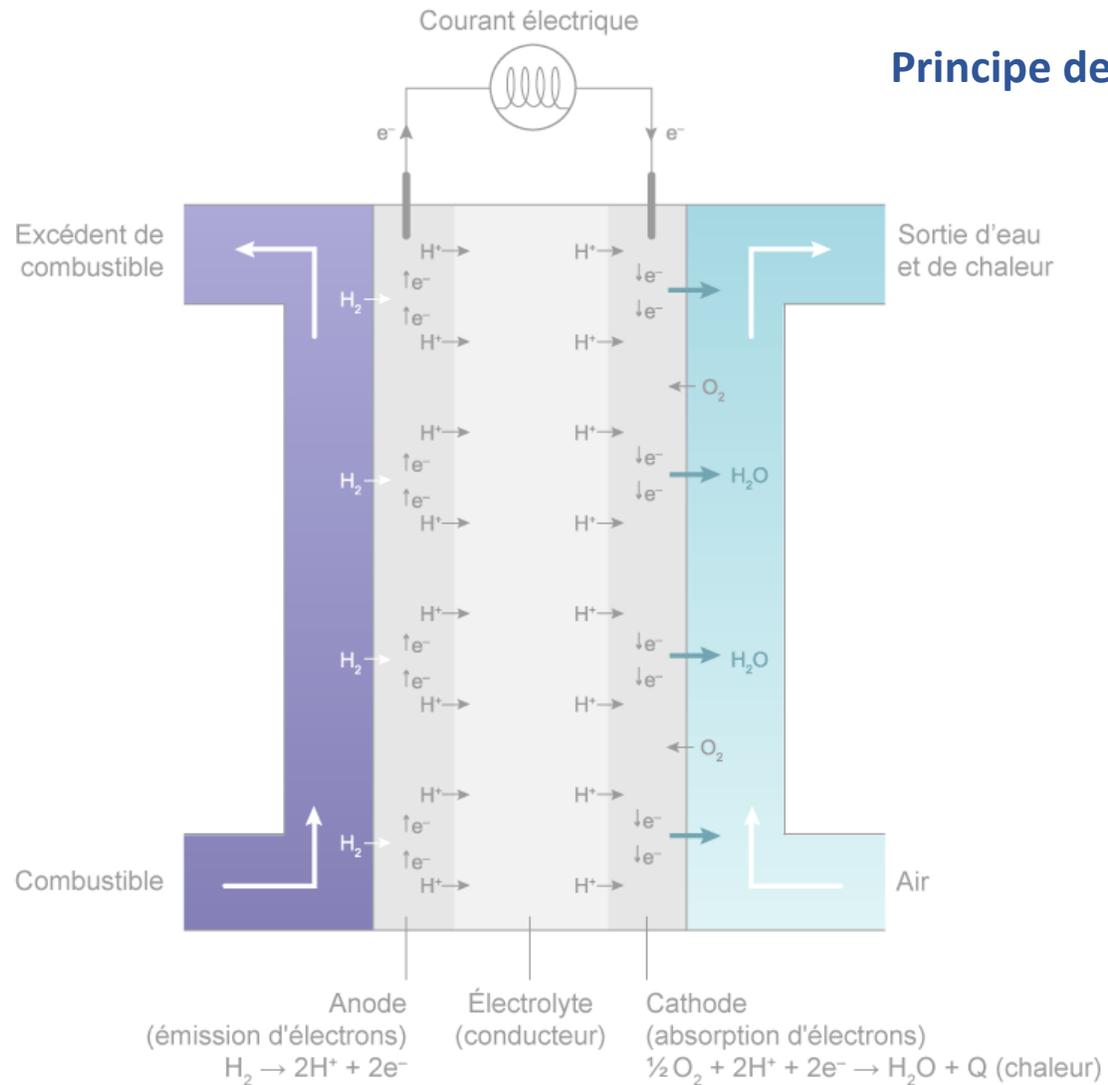
sunfire®

CLARIANT®

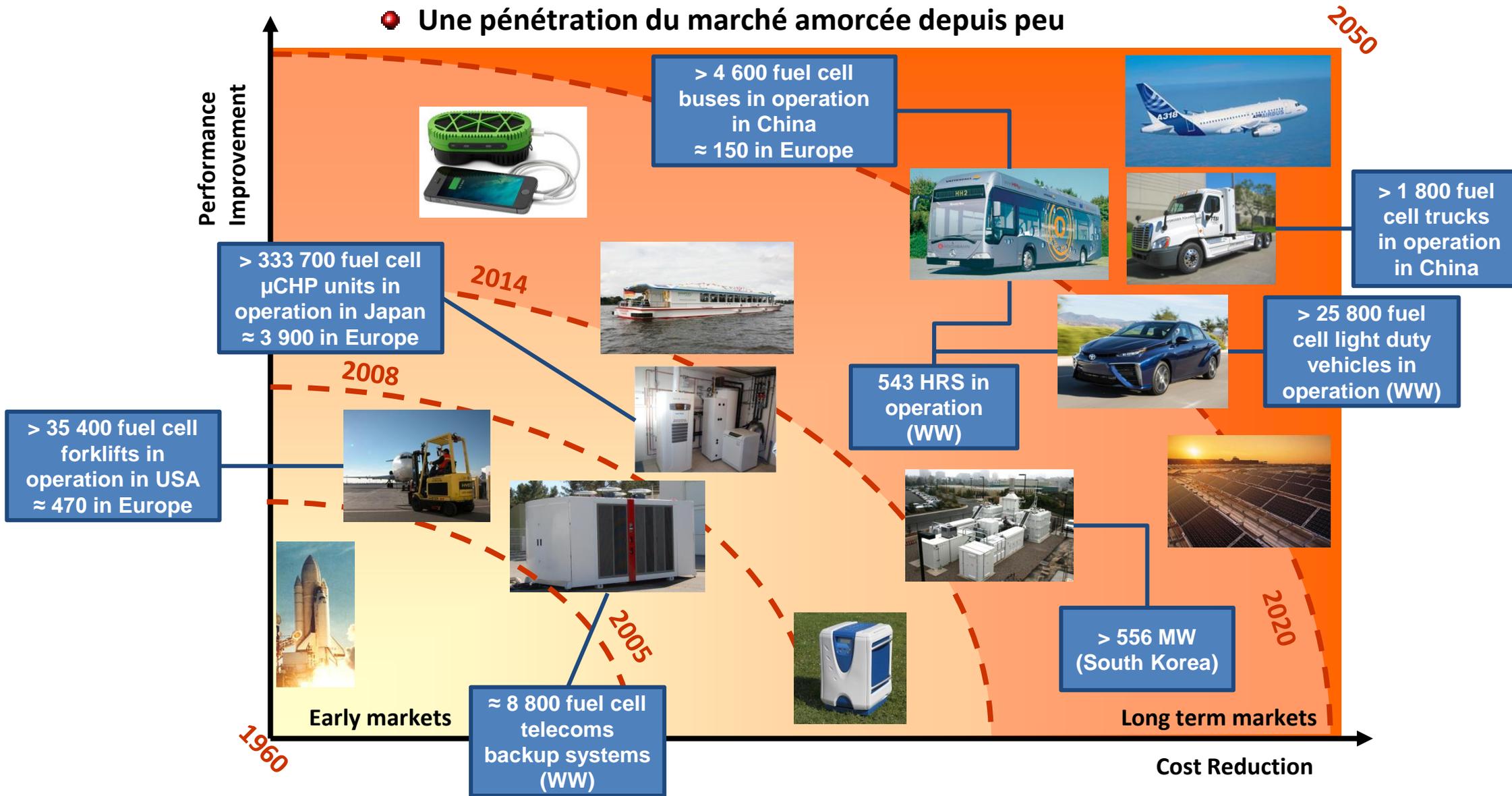


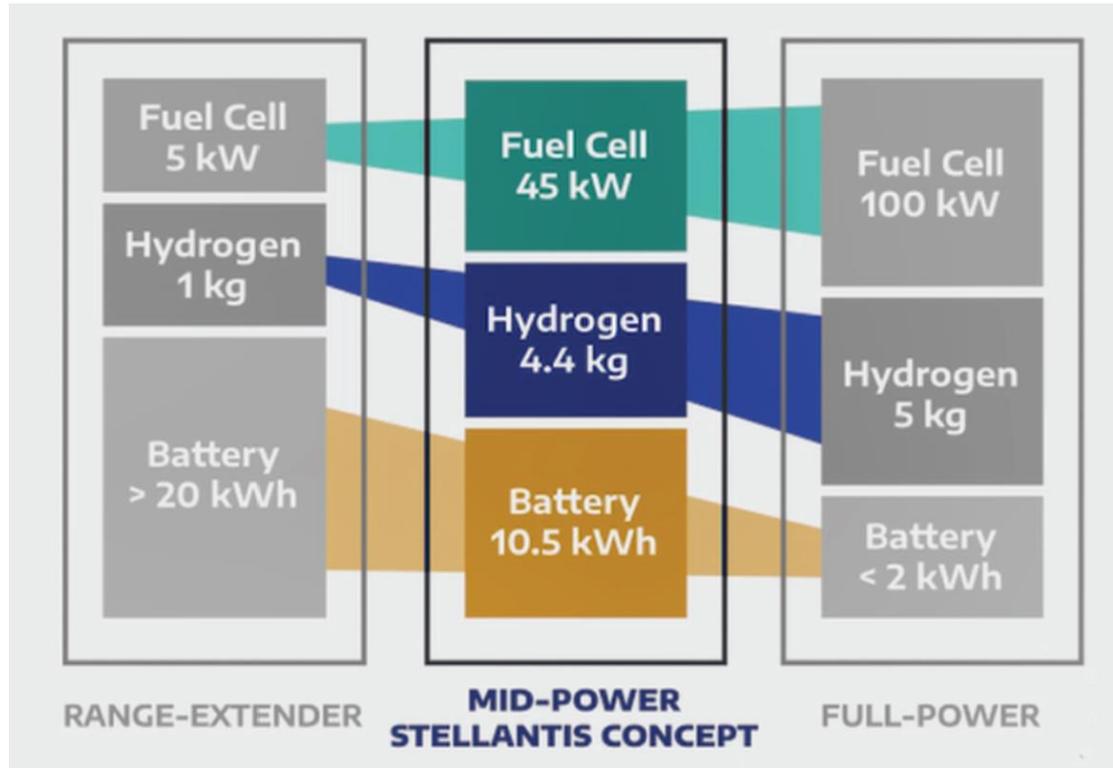
<http://catvic.eu/>

Principe de fonctionnement d'une pile de type PEMFC



● Une pénétration du marché amorcée depuis peu



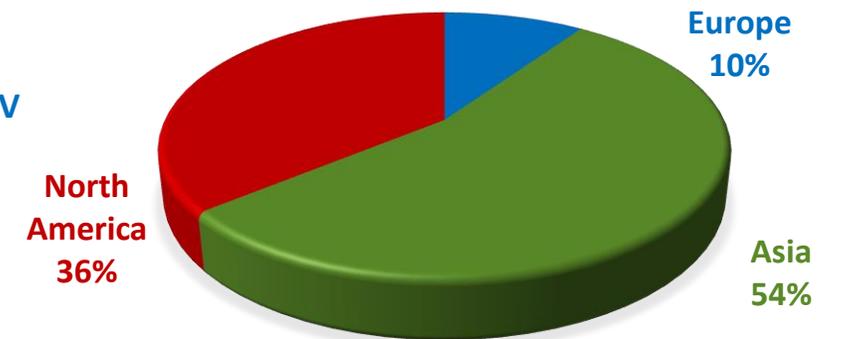


Country	FCEV	FC Bus	FC Trucks	FC Forklifts	HRS
Europe	2 480	152	27	467	195
Austria	41				5
Belgium	52	5			
Denmark	100	3			8
Finland	1				
France	400	21	1	290	41
Germany	951	79	2	162	86
Island	32				3
Italy	34	11		5	4
Luxembourg	2				
Netherlands	314	7	22		7
Norway	153	5	2	10	6
Spain	23				
Sweden	45				4
Switzerland	95	5	12		4
United Kingdom	237	16			13

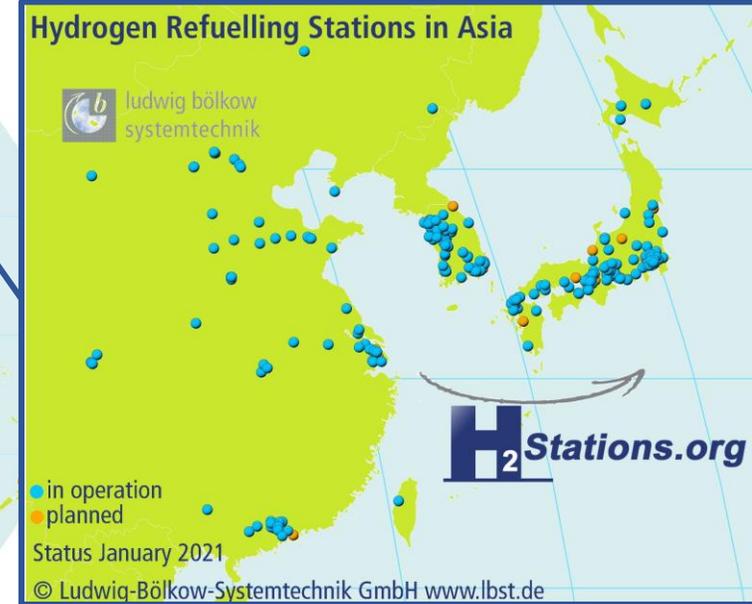
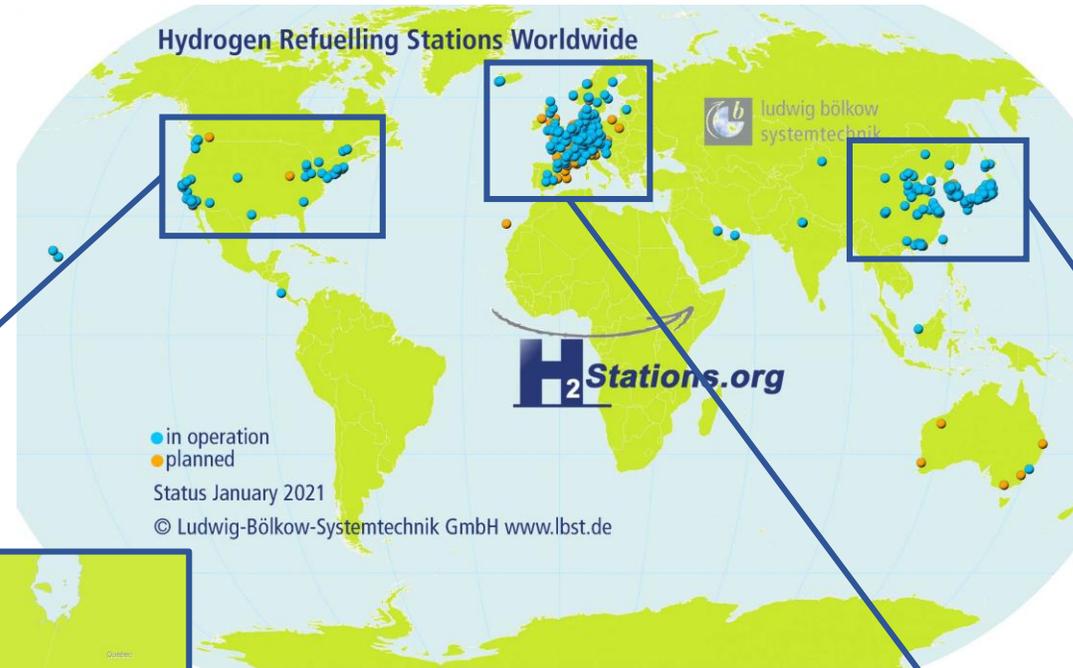
Country	FCEV	FC Bus	FC Trucks	FC Forklifts	HRS
Asia	14 068	4 433	1 819	252	293
China	80	4 297	1818	2	104
India		10			2
Japan	3 947	99		250	135
South Korea	10 041	27	1		52
North America	9 302	61	2	35 400	54
Canada	100	1	2	400	9
United-States	9 202	60		35 000	45
South America	4	2			1
Brazil	-	1			1
Costa Rica	4	1			
Total	25 854	4 648	1 848	36 119	543

World

➤ 25 800 FCEV

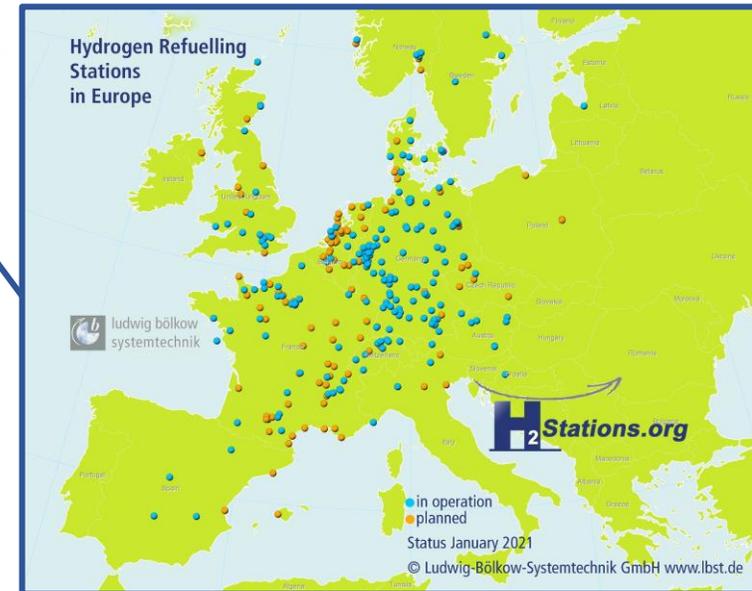


World network of Hydrogen Refuelling Stations 553 HRS as of January 2021



195 HRS in operation (public and non-public) in Europe as of January 2021

- **Germany: 86**
- **France: 41**
- **UK: 13**



<https://www.tuvsud.com/en-in/press-and-media/2021/february/record-number-of-newly-opened-hydrogen-refuelling-stations-in-2020>



Range (WLTP): 650 km

Li-ion battery 1.2 kWh – 31,5 kW x 10 s
84 cells
(311 V – 4.0 Ah)



Permanent magnet
synchronous motor
134 kW
300 Nm

PEMFC
system
(128 kW)

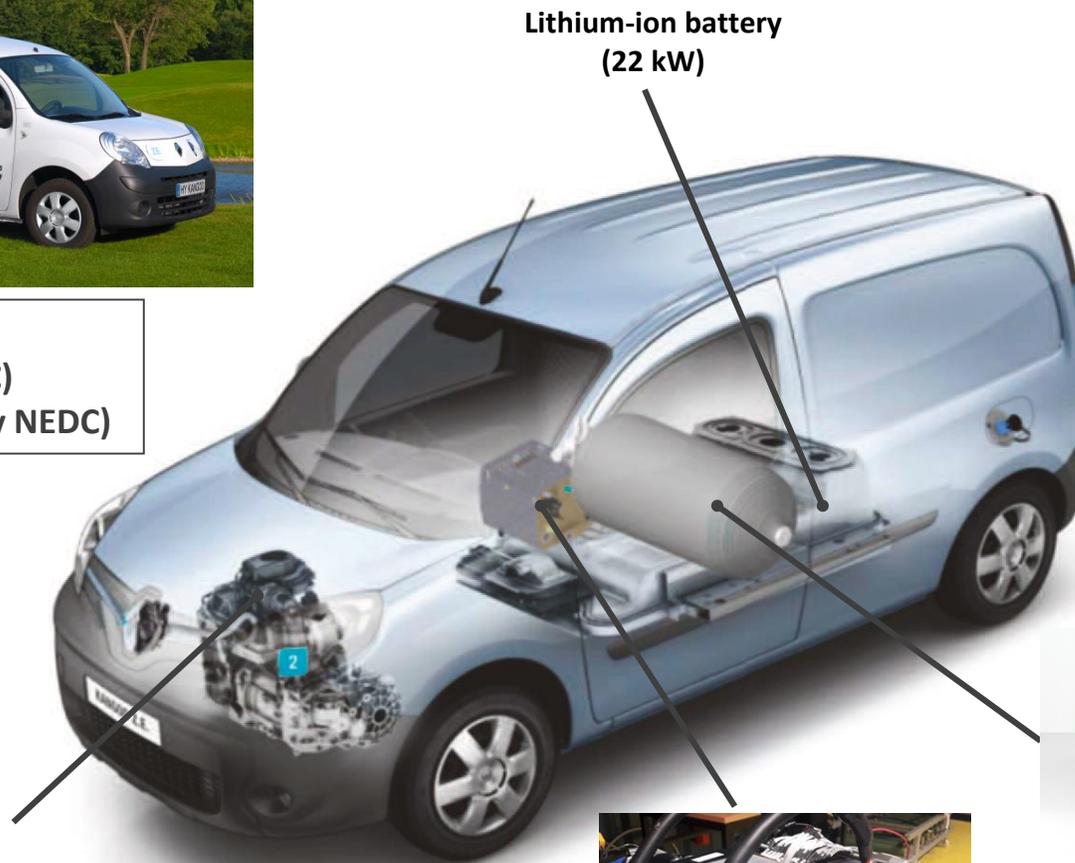
3 type IV hydrogen tanks
(5,6 kg, 700 bar)



RENAULT



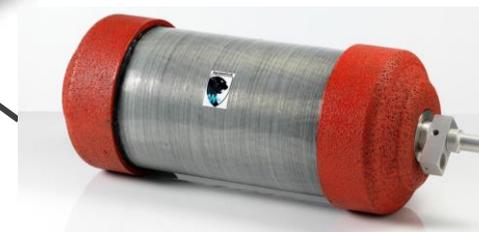
Range:
290 km (NEDC)
160 km (battery only NEDC)



**Lithium-ion battery
(22 kW)**

**Synchronous
motor with
wound rotor
44 kW
226 Nm**

**Fuel cell system
(5 kW)**

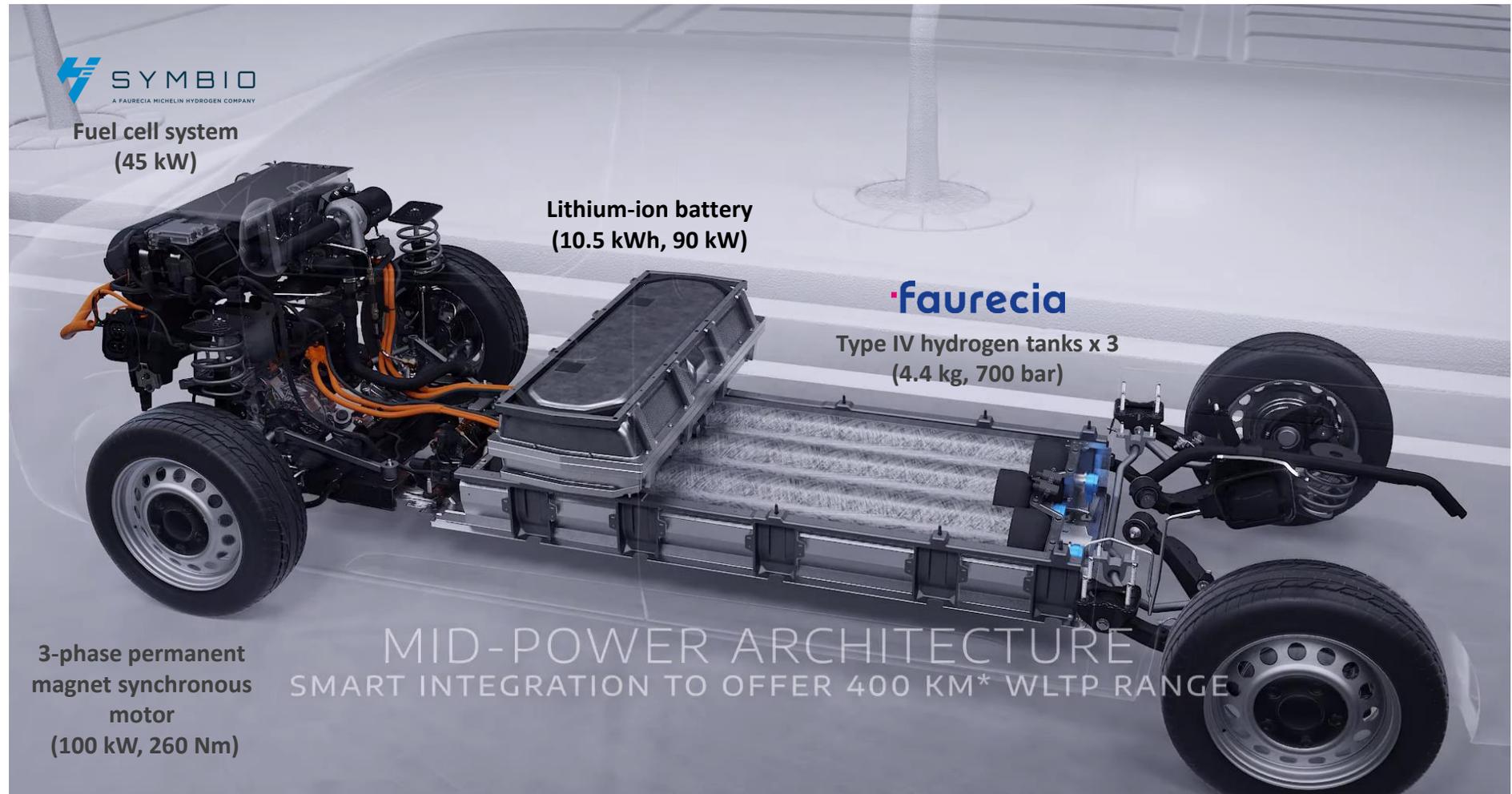


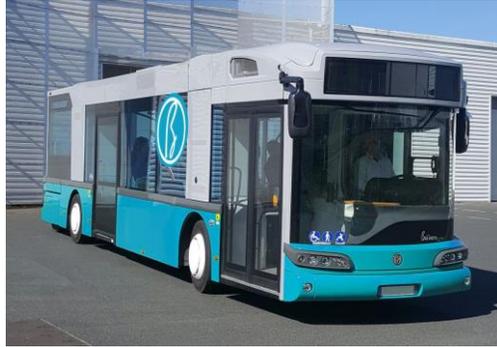
**Hydrogen tank
(1,78 kg, 350 bar)**





Range:
400 km (WLTP)
50 km (pure battery)



Le transport public

Businova H2 de SAFRA

 La mobilité lourde

XCIENT Fuel Cell de Hyundai

 Le ferroviaire

Coradia iLint d'Alstom



Et demain ...

 Le maritime

 L'aéronautique

Introducing Airbus ZEROe

Turboprop		 <100 Passengers  Hydrogen Hybrid Turboprop Engines (x 2)	 1,000+nm Range  Liquid Hydrogen Storage & Distribution System
Blended-Wing Body		 <200 Passengers  Hydrogen Hybrid Turbofan Engines (x 2)	 2,000+nm Range  Liquid Hydrogen Storage & Distribution System
Turbofan		 <200 Passengers  Hydrogen Hybrid Turbofan Engines (x 2)	 2,000+nm Range  Liquid Hydrogen Storage & Distribution System

AIRBUS

➤ Rendez-vous le 27 mai à 18h30 avec Paul Palies

Production
d'hydrogèneAREVA H₂GenMcPhy
energy

AIR LIQUIDE

GENVIA

Stockage
d'hydrogèneSTELIA
COMPOSITES

Raigi

McPhy
energy

MAHYTEC

AD-VENTA
INNOVATIVE ENGINEERING

PLASTIC OMNIUM

faurecia

Distribution
hydrogène

AIR LIQUIDE

atawey
ANYTIME. ANYWHERE. ENERGYMcPhy
energyWH2
L'Hydrogène Vert

ENGIE

GRTgaz

Composants &
systèmes piles à
combustibleHelion
HYDROGEN POWERaxane
FUEL CELL SYSTEMSPRAGMA
INDUSTRIES

GROUPE PLASTIVALOIRE

faurecia

Produits intégrés

SYMBIO

MICHELIN

RENAULT
TRUCKS

SAFRAN

ALSTOM
TransportGAUSSIN
MANUFACTURIÈRERENAULT
La vie, avec passion

Sylfen

PowiDian
POWER IN ALL MERIDIANS

Safra

Des grands groupes aux
PME et aux startups



Participants sélectionnés avec des activités hydrogène actuelles ou annoncées (non exhaustif)¹

XX%

Part potentielle de la valeur ajoutée en France



Transport

Industrie/
Bâtiments

Upstream/
électricité

Production
d'hydrogène propre

>60%

Transmission et distribution

60-90%

Vente au détail

~50%

Usages finaux et applications

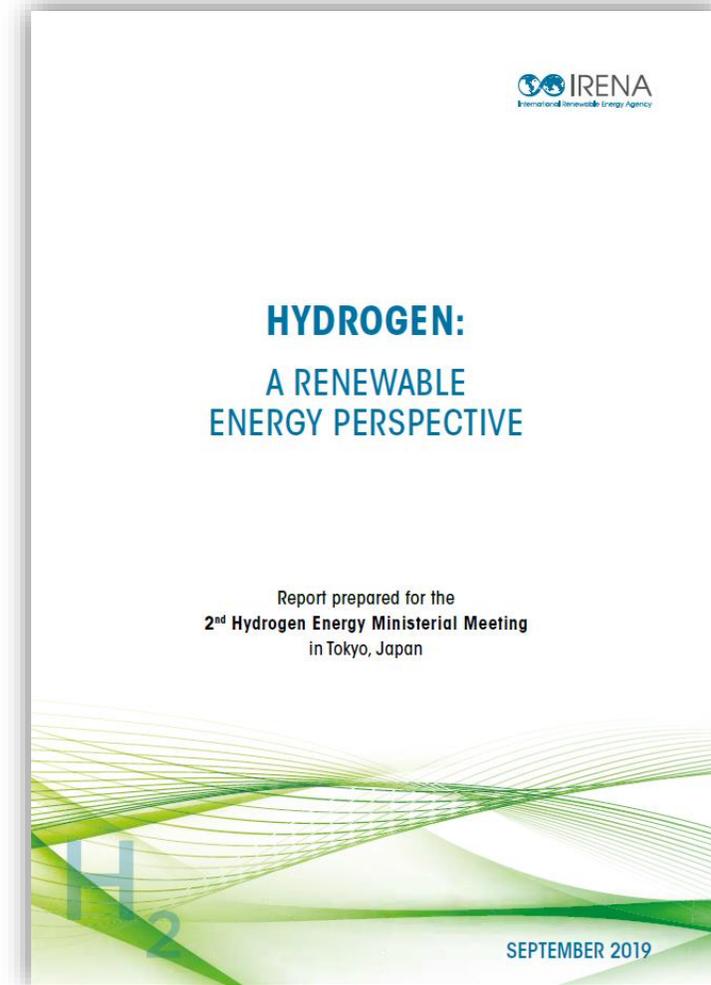
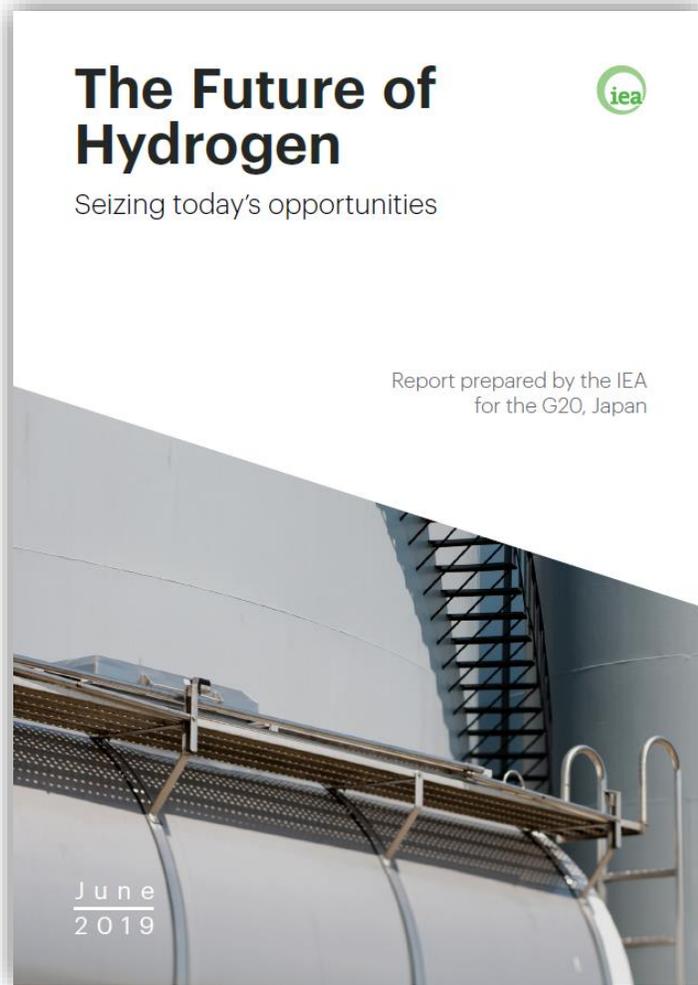
Composants

Equipement

50-80%

Usages²

1. Basé sur les membres du Conseil de l'hydrogène, FCH JU et/ou la participation dans des projets clés en cours, AFHYAPAC; Matched to value chain par activité principale. Participants français en couleur, participants étrangers en gris.
2. Exemples sur les usages de transport basés sur les projets de déploiement récents ou annoncés.



https://webstore.iea.org/download/direct/2803?fileName=The_Future_of_Hydrogen.pdf
https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/Sep/IRENA_Hydrogen_2019.pdf

Merci de votre attention

cea

