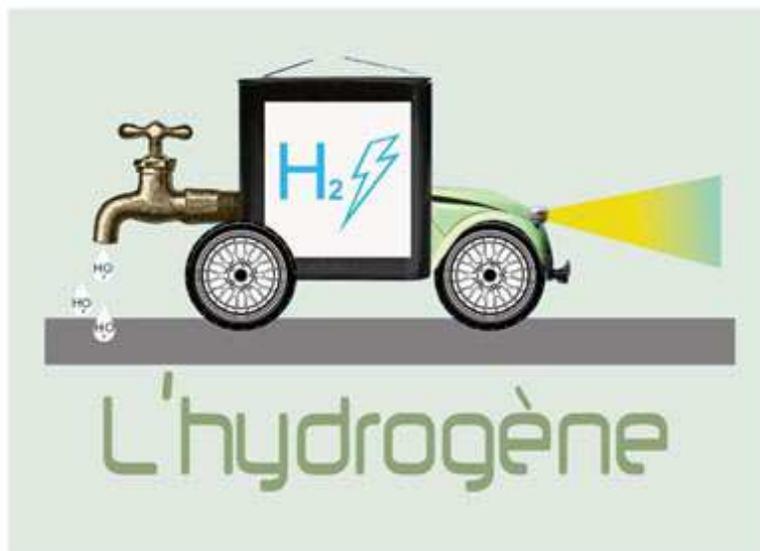


# L'hydrogène



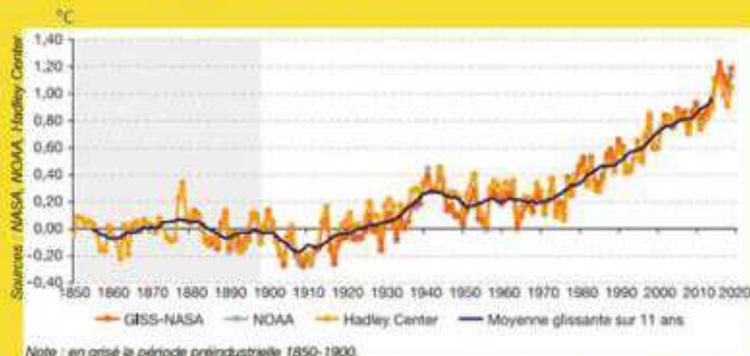
# LE CHANGEMENT CLIMATIQUE DES CONSTATS ÉTABLIS

En juin 2021, a été publié le 6<sup>ème</sup> rapport du GIEC\*

## 1,09 °C

C'est le réchauffement de la température de surface de la planète sur la période 2011-2020 par rapport à 1850-1900.

*Ce réchauffement s'accélère. Durant les 50 dernières années, la température globale à la surface de la Terre a connu une augmentation sans équivalent depuis*



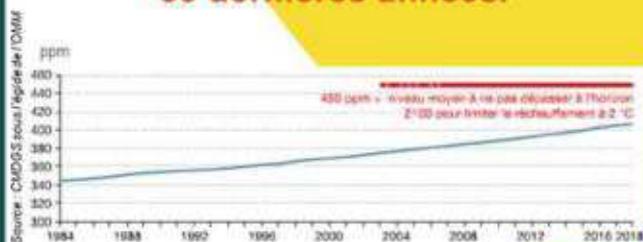
Élévation de la température annuelle moyenne mondiale entre 1850 et 2019

**La perte de masse des calottes glaciaires du Groenland et de l'Antarctique a été 4 fois plus importante au cours de la période 2010-2019 que pendant la période 1992-1999.**



Evolution du niveau moyen des mers du globe depuis 1993

**Le nombre de catastrophes naturelles dues au climat a été multiplié par 5 ces 50 dernières années.**



Concentration en CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère

## 20 cm

C'est l'élévation du niveau moyen mondial de la mer entre 1901 et 2018.

*Depuis 1900, le taux d'élévation du niveau moyen mondial de la mer a augmenté plus rapidement qu'au cours de tout autre siècle précédent depuis au moins 3 000 ans.*

Il existe une relation quasi linéaire entre les émissions cumulatives de CO<sub>2</sub> et le réchauf-

*La teneur en CO<sub>2</sub> de l'atmosphère terrestre, voisine de 260 ppm\* avant la période industrielle, a augmenté dans le dernier tiers du 20<sup>ème</sup> siècle pour atteindre 415 ppm\* en 2019.*

*Elle poursuit sa croissance au rythme voisin de 2 à 3 ppm\* chaque année.*

*Certaines régions se réchauffent plus vite que d'autres. C'est le cas du bassin méditerranéen par exemple qui pourrait subir une augmentation de température de 3 °C l'été dès 2050 pour un réchauffement moyen de 2 °C.*



Depuis le développement des activités industrielles, les réservoirs terrestres et océaniques ont absorbé la moitié des émissions anthropiques\*.

**Les émissions restantes persistent dans l'atmosphère, entraînant l'accroissement des concentrations des GES\*.**



# L'HYDROGÈNE

Vecteur de la transition énergétique



Une exposition d'ArmorScience

L'HYDROGÈNE

ArmorScience

# L'HYDROGÈNE, VERS UN AVENIR DÉCARBONÉ ?

Depuis Jules Verne, nombreux ont été les visionnaires qui ont anticipé l'avènement d'une société de l'hydrogène.

*«Oui, mes amis, je crois que l'eau sera un jour utilisée comme combustible, que l'hydrogène et l'oxygène qui la constituent fourniront une source de lumière et de chaleur inépuisables et d'une intensité que la houille ne saurait avoir» .*

Cyrus Smith, personnage principal de *L'Île mystérieuse* (J. Verne, 1875)



<http://www.capcomspace.net/>

*"De plus, l'hydrogène permet d'apporter une solution à trois problèmes distincts: le stockage, la décarbonisation des secteurs du transport et de l'industrie ainsi que la satisfaction d'une demande croissante en électricité. Les Etats voient ce gaz comme une nécessité pour atteindre l'objectif du zéro-carbone d'ici 2050 et investissent en masse dans ce secteur .*

[www.DTExpert.com](http://www.DTExpert.com)

L'hydrogène est une histoire ancienne et un défi industriel plein de promesses.

- 7 milliards d'€ à l'horizon 2030 pour le plan hydrogène français
- 450 milliards d'€ à l'horizon 2050 pour la Commission européenne



<https://www.sncf.com/fr/>

L'HYDROGÈNE

ArmorScience

# UN PEU D'HISTOIRE

## LES DÉCOUVREURS

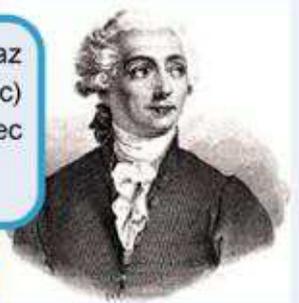
L'hydrogène est l'élément le plus ancien de l'univers. Il serait apparu 1 seconde après le Big Bang...

... mais sa découverte dans l'histoire des sciences est récente.

1766

Henry Cavendish découvre l'hydrogène qu'il appelle « air inflammable ».

Antoine Lavoisier nomme ce gaz « hydrogène » (formeur d'eau en grec) parce qu'il a montré qu'il réagit avec l'oxygène pour former de l'eau.



Antoine Lavoisier

1783

Anne-Jean Robert, Nicolas-Louis Robert et Jacques Charles effectuent la première ascension avec un ballon gonflé à l'hydrogène.



Premier voyage aérien des frères Robert

1800

Première électrolyse de l'eau par William Nicholson et Anthony Carlisle quelques semaines avant l'invention de la première pile électrique par Alessandro Volta.



Pile à colonne de Volta

1812

Diffusion du gaz de ville comme gaz d'éclairage, à Londres puis Paris sous l'impulsion de Frédéric-Albert Winsor. Ce gaz dont l'invention revient en partie à Philippe Lebon, est à l'origine de la carbochimie

1884

James Dewar établit la température de liquéfaction de l'hydrogène (-253°C).

1839

William Grove invente la pile à combustible.



PAC de Gemini 7 en 1965



Source: NASA

1920

Arthur Stanley Eddington suggère que l'énergie des étoiles est d'origine nucléaire et provient de la fusion de l'hydrogène en hélium.

1932

Francis Bacon reprend les études de la pile à combustible (PAC) et réalise un premier prototype de 1 kW en 1953. Ce prototype servira de modèle pour les futures piles à combustible des missions Gemini et Apollo.



Galaxie d'Andromède - M 31

Source: Galileynastro.fr

# L'HYDROGÈNE, UN COMBUSTIBLE DÉJÀ FAMILIER

Quel est le lien entre le stade de France et l'hydrogène?

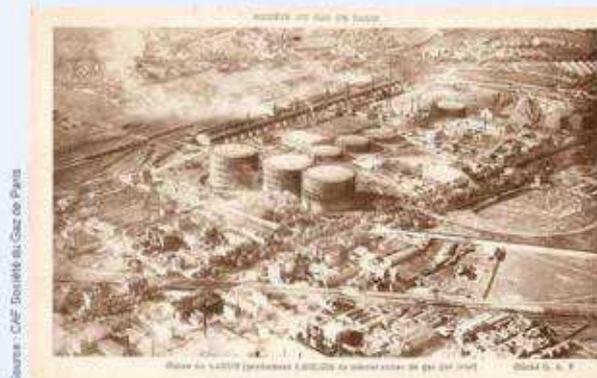


Le gaz de ville appelé gaz hydrogène, gaz d'éclairage, gaz de houille et plus tard gaz manufacturé était fabriqué dans des

## USINES À GAZ

Il provenait principalement de **la pyrolyse** du charbon (décomposition chimique par chauffage à température élevée en absence d'oxygène-

Source : <https://commons.wikimedia.org>



Le gaz de ville contenait (en volume) : 50% d'hydrogène, 32% de méthane, 8% de monoxyde de carbone et beaucoup d'impuretés dont du dioxyde de carbone et de l'hydrogène sulfuré. En plus du gaz, la pyrolyse du charbon produit de la houille, du brai, du coaltar

En France, les dernières usines à gaz ont fermé à la fin des années 70.

Le gaz de ville a été progressivement remplacé par le gaz naturel (méthane).

L'usine du Landy à Saint-Denis qui a fonctionné de 1899 à 1977, produisait 1 million de m<sup>3</sup> de gaz par jour. Le site qui a fait l'objet de travaux lourds de réhabilitation est maintenant occupé par **le Stade de France** !

Pendant un siècle, les usines à gaz ont meublé le paysage à proximité des villes. Le gaz, stocké dans des gazomètres, était distribué par des réseaux de canalisations.

Il y avait 20 usines à gaz en Bretagne dont 4 dans le département, à Lannion, Guingamp, Saint-Brieuc et Dinan.



Celle de Lannion située à Nod-Huel, a été inaugurée en 1935. Les trains de charbon venaient de la gare et empruntaient les rails du quai du Maréchal Foch.

En 1959, l'usine à gaz a laissé la place à des cuves d'air propané dont la distribution s'est généralisée en 1960.

# C'EST QUOI, L' HYDROGÈNE ?

L'atome d'hydrogène est le premier élément du tableau de Mendeleïev

Son symbole est «H» et il porte le numéro atomique 1.

L'hydrogène est un élément fondamental de l'Univers.



- 75 % en masse.
- 92 % en nombre d'atomes.

C'est le composant principal de la matière interstellaire, des étoiles, du soleil et des planètes.

Tableau périodique des éléments

■ métaux alcalins  
■ autres métaux  
■ semi-métaux (métalloïdes)  
■ autres éléments non métalliques  
■ halogènes  
■ gaz rares

numéro atomique  
nom de l'élément  
symbole de l'élément (en blanc et vert : aucun isotope stable)  
masse atomique, basée sur <sup>12</sup>C  
( ) : nombre de masse de l'isotope le plus stable

La forme moléculaire de l'élément hydrogène est le dihydrogène de formule **H<sub>2</sub>**



## En savoir plus

Sur Terre, l'hydrogène est presque entièrement constitué de l'isotope <sup>1</sup>H appelé **protium** qui comprend un noyau composé uniquement d'un proton (de charge électrique positive). Il représente 99,98% de l'hydrogène naturel.

Il a 2 isotopes :

- Le **deutérium** <sup>2</sup>H (un proton, un neutron) : 0,015 % de l'hydrogène naturel. Il entre dans la composition de l'eau lourde (D<sub>2</sub>O) qui est utilisée comme modérateur des neutrons issus de réactions de fission nucléaire. Il facilite la réaction en chaîne.
- Le **tritium** <sup>3</sup>H (un proton, deux neutrons) : Présent en quantité infime dans l'hydrogène naturel, il est radioactif.

# OÙ SE TROUVE , L' HYDROGÈNE ?



## A l'état naturel

L'hydrogène existe peu à l'état naturel sous forme moléculaire :

- Des sources ont été découvertes au fond des mers dans les années 1970.
- Sur terre il est présent dans les grands massifs de péridotite\* et les zones intraplaques au cœur des continents.

Son exploitation n'est pas envisageable en raison de contextes géologiques difficiles.

Sur Terre, il est peu présent sous forme moléculaire :

- ◊ 0,22 % des atomes de la croûte terrestre (oxygène 47 % et silicium 27%)



## Sous forme combinée

• L'hydrogène est abondant sous forme combinée :

- Dans l'eau ( $H_2O$ )
- Dans les hydrocarbures dont le méthane ( $CH_4$ )
- Dans tous les composés organiques et la matière vivante (63 % des atomes et 10 % de la masse du corps humain).

- ◊ 0,55 ppm\* en volume des gaz de l'atmosphère

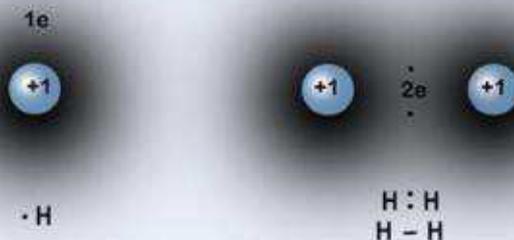
**Comme l'hydrogène est rare sous forme moléculaire, il est nécessaire de le produire à partir de formes combinées .**



# LES PRINCIPALES PROPRIÉTÉS DU DIHYDROGÈNE

*Dans le langage courant, on appelle hydrogène, la molécule de dihydrogène.*

Le dihydrogène est le résultat de la liaison entre deux atomes d'hydrogène créée par la mise en commun de leur électron.



Comme l'électricité, l'hydrogène est un **VECTEUR ÉNERGÉTIQUE** qui doit être produit à partir d'une source d'énergie primaire.

## D'intéressantes propriétés... mais aussi des facteurs de risques

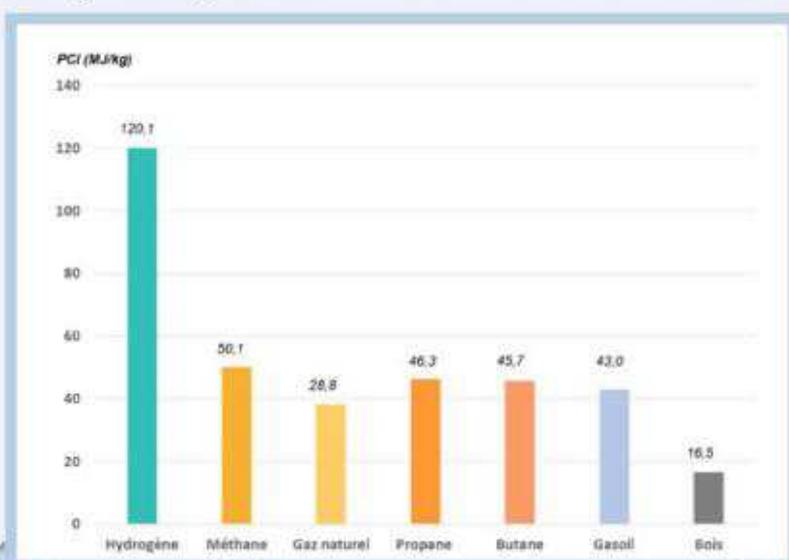
### Principales propriétés en comparaison avec le méthane

	Hydrogène	Méthane
PCI*	120,1 MJ/kg	50,1 MJ/kg
Masse volumique à 0°C	0,089 kg/Nm <sup>3</sup>	0,651 kg/Nm <sup>3</sup>
Température d'auto inflammation	585 °C	540 °C
LIE/LSE*	5 à 75 % vol	5 à 14 % vol
Energie minimale d'inflammation	0,017 MJ/mol	0,29 MJ/mol

Sources: AEPDPAIC

C'est le plus énergétique des combustibles par unité de masse (2,40 fois celle du méthane). Il n'est ni toxique, ni polluant. Sa combustion dans l'air ne produit que de la vapeur d'eau.

### Energies comparées avec d'autres carburants et combustibles



C'est le plus léger des gaz et aussi celui dont la taille de la molécule est la plus petite ce qui est pénalisant pour la sécurité d'une installation.

Il présente une très large plage d'inflammation et une énergie d'inflammation très faible ce qui en fait un gaz très réactif et inflammable.

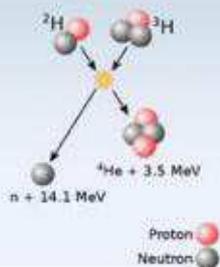
Toutefois les risques que l'hydrogène se trouve dans l'atmosphère dans des conditions pouvant provoquer son inflammation sont faibles grâce à sa vitesse de diffusion importante (quatre fois celle du gaz naturel) liée à sa faible masse volumique et son petit encombrement.



$$E=MC^2$$

## Quel est le lien entre l'hydrogène et l'énergie du soleil ?

La **fusion nucléaire** est la **réaction** entre deux atomes d'hydrogène (**un deutérium et un tritium**). Elle se passe en 2 étapes et produit un atome d'hélium et un neutron.



Au cours de cette réaction, la masse du noyau produit est inférieure à la somme des masses des noyaux d'origine. En application de la relation d'Albert Einstein «  $E=mc^2$  », la différence de masse est convertie en énergie.

La lumière et la chaleur que nous recevons du Soleil sont le résultat de la fusion de noyaux d'hydrogène (75% de la composition du Soleil) en noyaux d'hélium (24%).

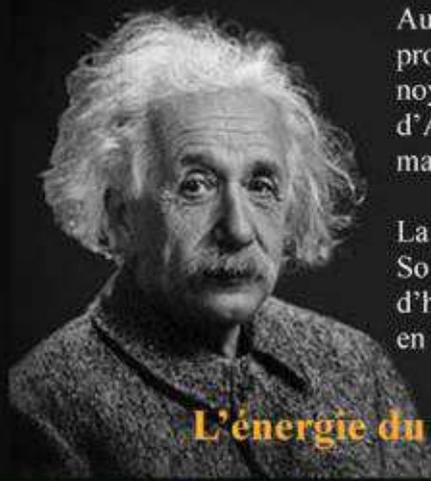


Source : Free STEREO screenshot/September 29, 2009



Cette réaction s'effectue dans des conditions particulières :

- Au cœur du Soleil, la pression est égale à 200 milliards de fois la pression atmosphérique terrestre et la température centrale atteint environ 15 millions de degrés.
- Chaque seconde, dans le soleil, 620 millions de tonnes d'hydrogène sont transformés en 615,7 millions de tonnes d'hélium.



**L'énergie du soleil, c'est la fusion nucléaire.**

L'hélium (He) est l'élément chimique de numéro atomique 2. Il est monoatomique en toute circonstance et inerte chimiquement, ce qui veut dire qu'il est aussi incombustible.



### La fusion nucléaire sur Terre

Pouvoir reproduire le processus de fusion nucléaire sur Terre permettrait de satisfaire définitivement les besoins énergétiques de l'humanité.



Source : Inetec

C'est précisément l'enjeu majeur de la recherche sur la fusion nucléaire "contrôlée" mise en œuvre dans le projet ITER\*

*Le Projet international ITER est mené au CEA de CADARACHE à Saint-Paul-lès-Durance en France.*

#### La fission nucléaire

La fission consiste à projeter un neutron sur un atome lourd instable (uranium 235 ou plutonium 239). Il éclate alors en 2 atomes plus légers en produisant de l'énergie, des rayonnements radioactifs et 2 ou 3 neutrons capables à leur tour de provoquer une fission. C'est le mécanisme de la réaction en chaîne exploitée dans les centrales nucléaires pour produire de l'électricité, mais aussi la bombe A.

#### La fusion nucléaire

La fusion libère 5 fois plus d'énergie que la fission. La bombe H ou bombe thermonucléaire exploite le principe de la fusion. L'énergie nécessaire à la réaction en chaîne est déclenchée par une bombe A.

COMPARAISON

**UNIC**



**VITESSE  
SÉCURITÉ**

VOITURES de TOURISME

4 cylindres  
6 cylindres

surbaissées, à roues AV indépendantes

Équipées avec les nouvelles piles à combustible HYDROGÈNE I

Le quotidien des personnes qui sont en avance sur leur temps

6 MAI 1937 - ÉDITION DU MATIN

# LE MONDE d'APRÈS

BRÈVE SCIENTIFIQUE · FRANCIS BACON POURSUIT LES RECHERCHES

Près de 100 ans après l'invention de la pile à combustible par William Grove, le célèbre ingénieur anglais Francis Bacon fait progresser les générateurs chimiques d'électricité, qui permettent la réalisation du premier prototype industriel de puissance.

## LE HINDENBURG EXPLOSE À L'ATTERRISSAGE

### Est-ce la fin du plus léger que l'air ?

Le LZ 129 Hindenburg construit en Allemagne par la firme Zeppelin était le plus grand dirigeable jamais construit. Long de 245 m, il contenait **190 000 m<sup>3</sup> d'hydrogène**.

IL N'AURA FAIT QUE DIX TRAVERSÉES DE L'ATLANTIQUE.

Le Hindenburg était affecté sur la ligne régulière Europe- États-Unis et transportait 97 passagers et membres d'équipage. Le 6 mai 1937 alors qu'il arrivait de Francfort qu'il avait quitté 3 jours plus tôt, il est complètement détruit par le feu à Lakehurst au cours de son amarrage qui avait été retardé par un orage.

**37 PERSONNES DISPARUES DANS LE DRAME.**

Cette merveille d'ingéniérie avait fait l'objet de beaucoup de publicité. Son explosion est fortement médiatisée. Le journaliste Herbert Morrison était sur place et a décrit l'accident à la radio.



Source : history.com

Incendie du LZ 129 Hindenburg le 6 mai 1937 à Lakehurst dans le New Jersey

PAGE 6  
TÉMOIGNAGES  
DE SURVIVANTS

Werner Franz, 14 ans, sort miraculeusement indemne des flammes. Il nous livre sa première interview.

Sabotage, électricité statique, orages, fuites, peintures ?

Cet accident met un terme définitif à l'exploitation commerciale de dirigeables au profit des avions. Les causes non complètement élucidées de la catastrophe vont répandre l'idée que l'hydrogène est un gaz dangereux.

### HELIUM, LA SOLUTION ?

L'hélium étant non-inflammable, il peut être la solution pour l'aérostation. La première traversée de l'Atlantique avec un ballon à hélium sera effectuée le 17 août 1978. On doit le premier tour du monde en ballon mixte hélium-air chaud au suisse Bertrand Piccard en 1999.

### COURRIER MANQUANT



La Luchtpost a mis en place un service spécial, contacter l'office de Frankfort.

# LES FILIÈRES DE VALORISATION

L'hydrogène est principalement utilisé dans la chimie, la pétrochimie, le raffinage du pétrole et la métallurgie.

Le rôle actuel de l'hydrogène dans le système énergétique mondial est modeste (2 % de la demande mondiale d'énergie primaire).

**Technologie clé pour la décarbonation profonde,**

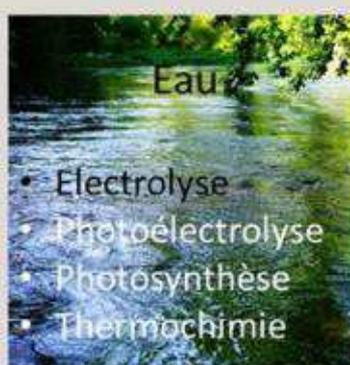
***l'hydrogène peut:***

remplacer les fossiles dans les industries à forte intensité énergétique et les transports lourds terrestres et maritimes.

contribuer à l'équilibre du système énergétique en permettant un stockage efficace de l'électricité.

## Sources et modes de production de l'hydrogène

La quantité de GES\* générée pour la production d'hydrogène varie fortement suivant la technologie et la source d'énergie primaire mises en œuvre :



Les procédés industriels (vaporeformage, oxydation partielle et électrolyse) sont détaillés dans les panneaux 10, 11, 12 et 13.

Les procédés en blanc ci-dessus sont expérimentaux et ne sont pas développés dans cette exposition.



### En savoir plus

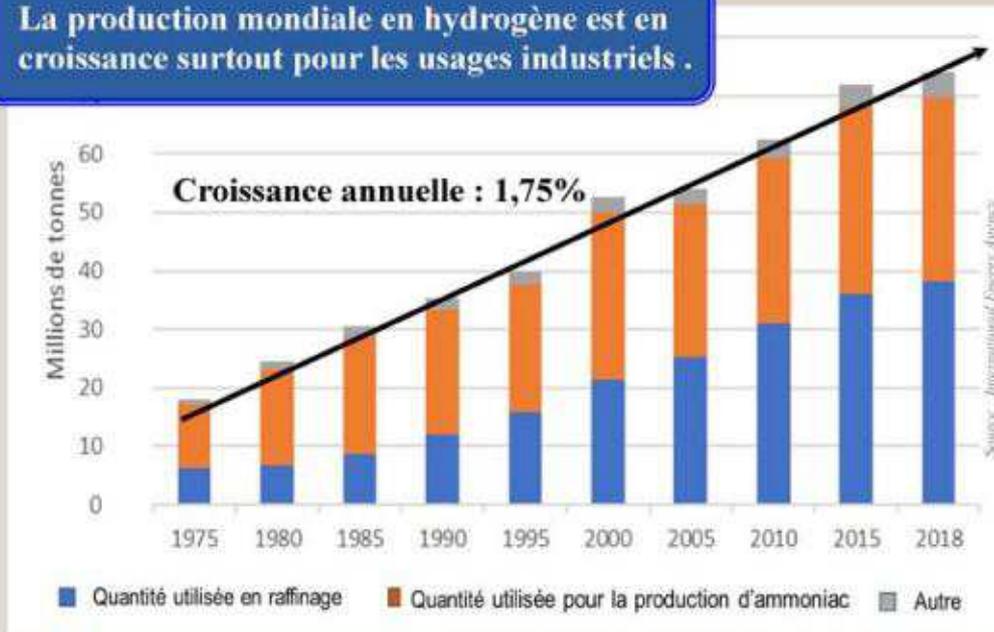
L'hydrogène carboné (ex-hydrogène gris) est fabriqué à partir de sources d'origine fossiles, comme les procédés de vaporeformage de gaz naturel (environ 11 kgCO<sub>2</sub>eq/kgH<sub>2</sub>), de gazéification du charbon (20 kgCO<sub>2</sub>eq/kgH<sub>2</sub>) ou encore par électrolyse alimentée par des mix électriques carbonés.

L'hydrogène bas carbone (ex-hydrogène bleu) est fabriqué à partir de sources d'énergie fossiles (charbon ou gaz naturel) mais dont le CO<sub>2</sub> émis lors de sa production est capté et stocké (CCS\*) réduisant ainsi considérablement les émissions de CO<sub>2</sub>. L'hydrogène bas carbone peut également être produit par électrolyse de l'eau à partir d'électricité provenant de l'énergie nucléaire (ex-hydrogène jaune).

L'hydrogène renouvelable (ex-hydrogène vert) est fabriqué par électrolyse de l'eau à partir d'électricité provenant uniquement de sources d'énergie renouvelable (solaire, éolienne, hydraulique...) ainsi que par tout autre procédé de production recourant à des énergies renouvelables et n'entrant pas en conflit avec d'autres usages permettant leur valorisation directe.

# LA PRODUCTION MONDIALE

La production mondiale en hydrogène est en croissance surtout pour les usages industriels.

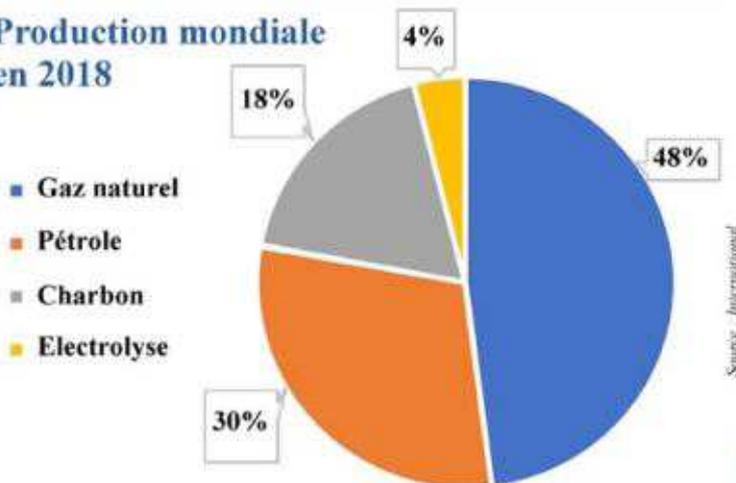


La croissance annuelle est du même ordre de grandeur dans tous les secteurs mais un peu plus forte dans celui du raffinage (environ 2%) à cause de l'évolution des normes des carburants et de la demande croissante en produits légers (essence et diesel).

## En 2018

La production n'était que de 74 millions de tonnes, se répartissant en fonction de son origine :

### Production mondiale en 2018



A 96% d'origine fossile, cette production mondiale a généré 860 millions de tonnes de gaz carbonique (2% de la production mondiale).

La France produit près d'1 Mt d'H<sub>2</sub> par an, soit 1,5% de la production mondiale.

10 Mt pour les États-Unis ou la Chine

L'hydrogène qui constitue un des enjeux de la transition énergétique représentait

en 2018, qu'une faible partie de l'énergie consommée dans le monde.

A titre de référence, la consommation mondiale d'énergie était de l'ordre de 13,8 milliards de t d'équivalent pétrole (tep\*) en 2018. Ce qui signifie qu'à cette date, la production d'hydrogène représentait 0,5% de cette quantité en masse et de 1,4 % en énergie (1 t d'hydrogène = 2,86 tep).



En savoir plus

# LE VAPOREFORMAGE

C'est le procédé de production d'hydrogène le plus répandu, le plus flexible et le plus économique.



Source : Air Liquide

Unité industrielle de production d'hydrogène par vaporeformage

Les unités industrielles ont des capacités de production de 10 000 à 200 000 Nm<sup>3</sup>/h d'hydrogène.

La principale source est le gaz naturel mais, selon le contexte, le naphta et le gaz de raffinerie peuvent être utilisés.

## Le principe

Faire réagir chimiquement les hydrocarbures légers, le méthane par exemple, avec la vapeur d'eau en trois étapes successives.

### Première étape

Reformage à la vapeur (formation de gaz de synthèse).



Réaction fortement endothermique qui se produit à haute température (840 à 950°C) sous pression modérée (20 à 30 bar) en présence d'un catalyseur (nickel).

### Deuxième étape

Conversion du monoxyde de carbone.

Réaction du gaz à l'eau.



Réaction faiblement exothermique qui se produit en deux temps à températures plus modérées (d'abord 400 puis 200°C) en présence de catalyseurs (fer-chrome et cuivre-fer).

### Troisième étape

Purification du gaz

Séparation H<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> sur tamis moléculaire.



- Rendement énergétique\* : 72% .
- Coût de production : 1,5 €/kg (le moins cher à produire mais quand même le triple du prix du gaz naturel).
- Production de CO<sub>2</sub> : 9,3 t/t d'hydrogène.
- Le CO<sub>2</sub> émis peut éventuellement être capté et stocké pour produire de l'hydrogène décarboné.



# LA GAZÉIFICATION

## OU OXYDATION PARTIELLE D'HYDROCARBONES

C'est le procédé qui permet de produire du gaz de synthèse à partir de charbon ou de résidus pétroliers lourds.

Le procédé d'oxydation partielle permet de traiter n'importe quelle charge gazeuse, liquide ou solide. Il permet d'éliminer les résidus et de les transformer en gaz combustibles.

Ce procédé a donné lieu à un recours massif, il y a une quinzaine d'années, par la Chine, qui produit la moitié du charbon mondial et est devenue le premier producteur mondial d'hydrogène grâce à cette technique.



Unité gazéification de Kemper County (USA)

### Le principe

Combustion ménagée des hydrocarbures lourds par de l'oxygène pur en présence de vapeur d'eau.

#### Première étape Oxydation partielle



Réaction conduite entre 1300 et 1450°C à une pression de 70 bar.

#### Deuxième étape Conversion du monoxyde de carbone



Réaction identique à la deuxième étape du vaporeformage.

#### Troisième étape Purification du gaz

Séparation H<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> par traitement sur tamis moléculaire.



- Rendement énergétique\* : 53%.
- Réclame la fabrication d'oxygène pur ou de l'air enrichi en oxygène.
- Production de CO<sub>2</sub> : 18 t/t d'hydrogène.
- Technologie très chère en investissement et en coûts de fonctionnement.



Source : Haffner Energy

Prototype de production d'hydrogène à partir de biomasse

### Thermolyse et gazéification de la biomasse

Combinée avec une thermolyse, la gazéification peut également être utilisée pour la production de gaz de synthèse et d'hydrogène à partir de déchets végétaux. C'est une filière en développement pour la production d'hydrogène vert.

# LE PROCÉDÉ D'ÉLECTROLYSE

C'est le procédé de production d'hydrogène le plus ancien mais aussi le moins répandu et le plus coûteux.

Il est réservé aujourd'hui à des usages qui requièrent un niveau élevé de pureté pour l'hydrogène.

C'est le procédé le plus prometteur dans le cadre de la transition énergétique.

L'électrolyse (du grec *lysis* = délier) est rendue possible par le passage d'un courant continu entre 2 électrodes immergées dans une solution aqueuse rendue conductrice par un électrolyte comme l'acide sulfurique, le sulfate de sodium ou le chlorure de sodium pour fermer le circuit électrique.

## Le principe

Dissociation par le courant électrique de la molécule d'eau (H<sub>2</sub>O) en ions hydroxyde (OH<sup>-</sup>) et hydrogène (H<sup>+</sup>).

### A la cathode

**réaction de réduction** : la molécule d'eau subit un gain en électrons. Celle-ci se décompose en hydrogène gazeux et en ion hydroxyde :

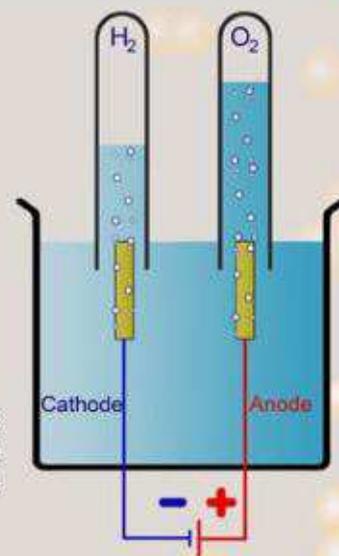


### A l'anode

**réaction d'oxydation** : la molécule d'eau subit une perte en électrons et se divise en oxygène et en cations en libérant des électrons qui rejoignent la cathode :



La quantité en moles (done en volume) de dihydrogène produite est équivalente à deux fois la quantité de dioxygène. Comme il y a une quantité égale d'électrons transférés à l'anode et à la cathode, l'électrolyse de l'eau produit une quantité équivalente d'ions H<sup>+</sup> et d'ions OH<sup>-</sup>.



↳ **Rendement énergétique** : Dépend de la technologie choisie comme indiqué dans le panneau suivant.



### En savoir plus

Source :  
France Stratégie

### Et combien ça coûte?

Les coûts de l'hydrogène issu de l'électrolyse dépendent étroitement de celui de l'électricité. Fin 2017, le plan de développement de l'hydrogène pour la filière énergétique lancé par Nicolas Hulot pariait sur la prolongation de la forte baisse des coûts de l'électrolyse observée depuis 2010 en l'évaluant entre 4 et 6 €/kg pour 4 000 à 5 000 h de production par an et en l'extrapolant entre 2 et 3 €/kg en 2030.

# LES TECHNOLOGIES D'ÉLECTROLYSEURS

Ces technologies sont rapportées à leur **rendement énergétique**. C'est le rapport de la conversion de l'énergie électrique en énergie chimique de l'hydrogène. L'énergie perdue lors de la génération de l'électricité n'est pas comptabilisée.



Source : Société IHT

## Electrolyseurs alcalins

- Technologie la plus ancienne (1920) et la plus éprouvée
- Permettent des installations de fortes puissance (plusieurs MW) pouvant produire plus de 1 000 Nm<sup>3</sup>/h d'hydrogène
- Utilisent la potasse comme électrolyte (bon marché) et des électrodes en nickel (pas de métaux nobles)

- Rendement énergétique : 70% (52 kWh pour produire 1 kg d'hydrogène)
- Durée de vie supérieure à 80 000 h de fonctionnement
- Coûts de production : 1 000 €/kW

## Electrolyseurs à électrolytes acides PEM

(Proton Exchange Membrane)

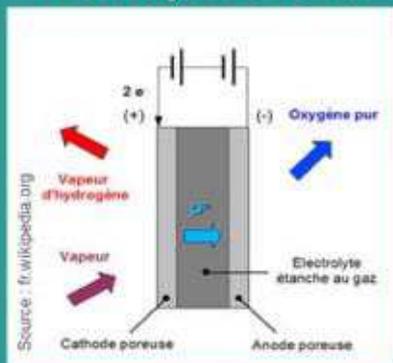
- Technologie apparue en 1960 utilisant un électrolyte solide constitué d'une membrane polymère perméable seulement aux ions hydronium (H<sub>3</sub>O<sup>+</sup>)\* produits à l'anode
- Technologie adaptée aux sources électriques renouvelables intermittentes
- Puissances limitées (quelques dizaines de kW)
- Peuvent délivrer de l'hydrogène sous pression (jusqu'à 30 à 40 bar)



Source : GPTraiz

- Rendement énergétique : 60%
- Durée de vie plus faible
- Coûts de production : > 2 500 €/kW

## Electrolyseurs à haute température (HTE) ou électrolyseurs en phase vapeur



Source : fr.wikipedia.org

- Technologie en développement qui repose sur la décomposition des molécules d'eau sous forme vapeur au niveau de la cathode.
- Plus efficace que les procédés à température ambiante car l'énergie d'électrolyse est apportée à la fois par la chaleur (700 à 1 000°C) et l'électricité et que les réactions d'électrolyse ont un meilleur rendement à haute température.
- Maillon-clé d'une production d'hydrogène décarbonée où l'électrolyseur est associé à une machine fonctionnant à haute température (four solaire à concentration ou réacteur nucléaire, celui-ci fournissant en cogénération, la chaleur optimale).

- Rendement énergétique : entre 80 et 90 %
- Durée de vie et coûts de production : Non encore disponibles

# LE STOCKAGE



Problématique complexe  
Enjeu capital

Le stockage de l'hydrogène est **techniquement difficile et coûteux** à cause de ses propriétés :

- Température de liquéfaction très basse
- Inflammabilité
- Explosivité

En outre:

- Le risque de **fuite** est une contrainte majeure pour les connexions, les joints, etc.
- Il est capable de traverser de nombreux matériaux, y compris des métaux et il en fragilise certains en les rendant cassants
- Il a une masse volumique de **0,09 kg/m<sup>3</sup>** dans les conditions normales de pression et température (**14 fois plus léger que l'air**)



En savoir plus

Pour un parcours de **100 km**, une voiture équipée d'une PAC consomme **1 kg d'hydrogène** soit **11,25 Nm<sup>3</sup>**. Avec un réservoir standard à pression atmosphérique, la même voiture pourrait parcourir **600 m** !

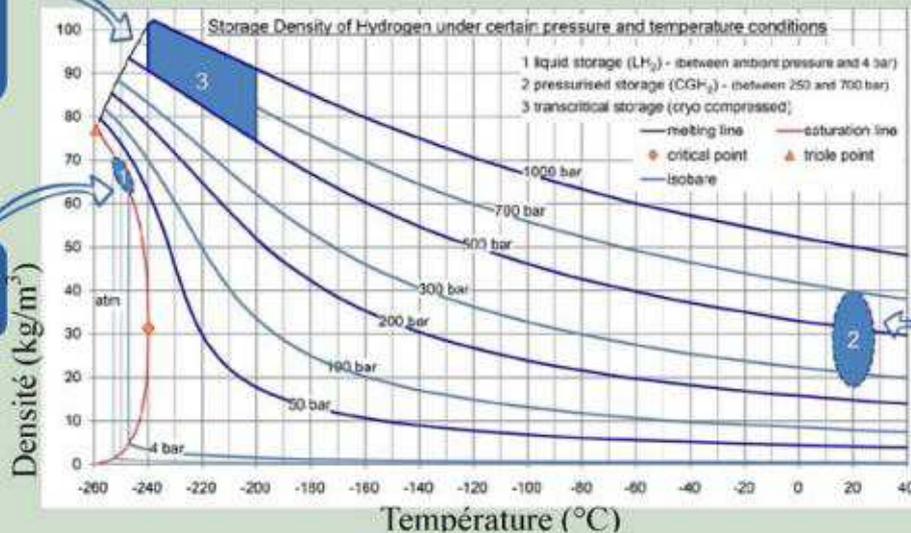
Suivant les usages, il est indispensable d'augmenter la quantité de gaz stockée et plusieurs techniques peuvent être mises en œuvre :

- ➔ Stockage à haute pression sous **forme gazeuse**
- ➔ Stockage à très basse température sous **forme liquide ou cryo-compressée**

L'abaque ci-dessous présente la **masse volumique** de l'hydrogène sous différentes conditions de **température et de pression**

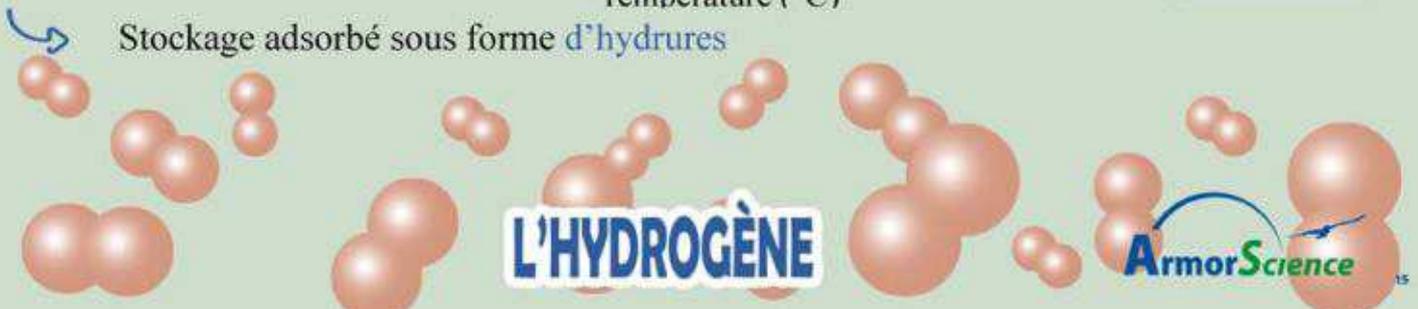
Hydrogène sous forme cryo-compressée

Hydrogène liquide



Hydrogène sous forme de gaz comprimé

Stockage adsorbé sous forme d'hydrures



L'HYDROGÈNE

ArmorScience

# LE STOCKAGE

## SOUS FORME GAZEUSE À TEMPÉRATURE AMBIANTE

Le stockage à l'état gazeux, sous moyenne et haute pression, présente de nombreux avantages quand les quantités mises en jeu sont faibles (quelques kg ou dizaines de kg).

C'est le cas des utilisations pour les véhicules routiers qui demandent une autonomie de 600 à 700 km.



Source : Air Liquide

Le stockage se fait dans des bouteilles cylindriques en acier acceptant une pression de 200 bar (stockage de types I et II). Elles sont encombrantes et lourdes et nécessitent des aciers spéciaux à bas niveaux de contraintes pour éviter les problèmes de fragilisation de l'acier par l'hydrogène.

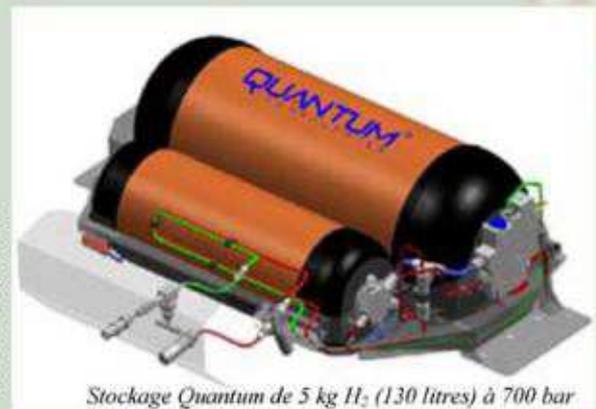
B50 (50 l) contenant 9 kg d' $H_2$  (10 Nm<sup>3</sup>)

### Nouvelle technologie :

Les réservoirs composites supportent des pressions élevées tout en réduisant la masse et en évitant les risques de rupture explosive en cas de chocs.



Réservoirs de 350 bar de la Honda Clarity. Elle est équipée d'une pile à combustible (PAC)



Source : Quantum

Stockage Quantum de 5 kg  $H_2$  (130 litres) à 700 bar

À 700 bar, l'hydrogène possède une densité de 42 kg/m<sup>3</sup>, soit un gain de 4000 par rapport à sa densité à pression et température ambiantes.

Un travail de classification a été accompli par le CEA\* qui a défini 4 types de stockage sous pression.

plastique/carbone (type IV)	+ 278%	661 bar.l.kg <sup>-1</sup>
aluminium/aramide (type III)	+ 150%	438 bar.l.kg <sup>-1</sup>
aluminium/verre (type III)	+ 75%	305 bar.l.kg <sup>-1</sup>
acier/carbone ou aramide (type II)	+ 70%	299 bar.l.kg <sup>-1</sup>
aluminium/verre (type II)	+ 50%	263 bar.l.kg <sup>-1</sup>
tout acier (type I)	+ 14%	200 bar.l.kg <sup>-1</sup>
tout aluminium (type I)		175 bar.l.kg <sup>-1</sup>



Bus équipé d'un moteur à combustion interne muni de dix réservoirs à 350 bar. Il peut transporter 80 personnes sur environ 220 km.

Source : CEA

# LE STOCKAGE

## SOUS FORME LIQUIDE À BASSE PRESSION

Le stockage à l'état liquide s'impose pour les besoins importants (tonnes, voire dizaines de tonnes). Cette solution, qui était réservée aux lanceurs spatiaux, pourrait à l'avenir concerner d'autres secteurs comme l'aéronautique et le transport maritime.



Réservoir cryogénique à hydrogène en aluminium

### Quelques chiffres :

- liquide à :  $-253\text{ °C}$
- masse volumique :  $70,5\text{ kg/m}^3$
- volume d'un kg à  $-253\text{ °C}$  : 14 l

La liquéfaction est obtenue en mettant en œuvre le cycle de Brayton ou de Claude où la température est abaissée par étape :

- De  $27$  à  $-43\text{ °C}$  par un groupe frigorifique mécanique
- De  $-43$  à  $-193\text{ °C}$  par un cycle calorifique à l'azote liquide
- De  $-193$  à  $-253\text{ °C}$  par un cycle calorifique à l'hydrogène liquide

### Masses volumiques dans différentes conditions

COMPARAISON

#### Sous forme de gaz

$0,0852\text{ kg/m}^3$  à pression atmosphérique

#### Sous forme de gaz sous pression

$42\text{ kg/m}^3$  à 700 bar

#### Sous forme liquide

$70,5\text{ kg/m}^3$  à  $-253\text{ °C}$  à pression atmosphérique

### Besoins supplémentaires en énergie

En plus de l'énergie nécessaire à la production de l'hydrogène :

- Sous forme de gaz sous pression :  $6,5\text{ kWh}$  pour  $1\text{ kg}$  d' $\text{H}_2$  de 20 à 700 bar
- Sous forme liquide :  $11\text{ kWh}$  pour  $1\text{ kg}$  d' $\text{H}_2$

Le stockage sous forme liquide s'effectue dans des réservoirs cryogéniques à faible pression :

- Soit ces réservoirs sont équipés d'importants systèmes secondaires pour maintenir l'hydrogène à basse température et limiter les pertes par vaporisation.
- Soit on laisse le gaz s'échapper pour éviter une augmentation de pression supérieure à la pression de tarage du réservoir, ce qui interdit le stockage en milieu confiné comme les parkings souterrains par exemple.

### La fusée Ariane 5

L'Étage Principal Cryogénique (EPC) d'Ariane 5, propulsé par le moteur fusée Vulcain, va consommer **26 t d'hydrogène liquide** et **132,5 t d'oxygène liquide** qui vont fournir 10% de la poussée nécessaire au lancement.

L'éjection à grande vitesse de la vapeur d'eau produite par la combustion de l'hydrogène et de l'oxygène va propulser la fusée, selon le principe de la réaction.



Fusée Ariane 5

$391\text{ m}^3$  d'hydrogène et  $123\text{ m}^3$  d'oxygène refroidis respectivement à  $-253\text{ °C}$  et  $-183\text{ °C}$ . L'épaisseur de leur enveloppe est de l'ordre de 4 mm, avec une protection thermique en polyuréthane expansé de 20 mm d'épaisseur.



Réservoir cryogénique de l'EPC

L'HYDROGÈNE

ArmorScience

# LE STOCKAGE

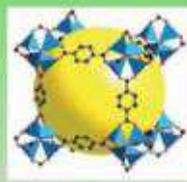
## SOUS FORME SOLIDE



Carbone & nanotubes



Zéolites



Organométalliques

L'hydrogène présente une affinité chimique pour de nombreux corps et peut :

- soit s'adsorber sur un support organique ou composé de nanotubes de carbone
- soit former des composés chimiques nommés hydrures

### Stockage par adsorption\* (physisorption)

Stockage à l'état moléculaire par adsorption sur des matériaux à haute surface spécifique (1000 à 6000 m<sup>2</sup>/g suivant le matériau) : mode de stockage à faible densité volumétrique et basse température de fonctionnement.

### Stockage par absorption\* (chimisorption)

Stockage par absorption dans des composés solides, en gel ou liquides (hydrures, fullerènes...). Ce mode de stockage résulte de la combinaison chimique réversible de l'hydrogène avec les atomes composant ces matériaux. Les matériaux les plus prometteurs sont les composés à base de magnésium et les alanates\*.

La capacité de stockage des hydrures métalliques peut être importante (le composé  $Mg_2FeH_6$  stocke 150 kg d'hydrogène par m<sup>3</sup>).



$Mg_2NiH_4$     $LaNi_5H_6$     $H_2$  (liquide)    $H_2$  (200 bar)

### Comparaison de modes de stockage

Volume occupé par 4 kg de  $H_2$  selon différents moyens de stockage avec pour référence la taille d'une voiture.

# LE STOCKAGE

## SOUS FORME CHIMIQUE

L'hydrogène peut être « stocké » sous forme chimique dans des composés carbonés comme le méthanol ( $CH_3OH$ ) ou le méthane ( $CH_4$ ) ou décarbonés comme l'ammoniac ( $NH_3$ )

L'ammoniac est le précurseur des engrais azotés mais il peut être utilisé comme source d'énergie:

- soit dans une PAC où il réagit avec l'oxygène. Il est alors dissocié en eau et azote.
- soit en le décomposant par craquage pour récupérer l'hydrogène et l'azote.

- L'ammoniac liquide contient **plus d'atomes d'hydrogène** pour un volume donné que l'hydrogène liquéfié.
- Sa densité énergétique est de **6,5 kWh/kg** ce qui le rend propre pour une utilisation dans des applications mobiles.
- Le stockage s'effectue sous 10 bar à température ambiante.
- Le principal danger est sa **toxicité** mais il est **peu inflammable** (les précautions à prendre pour un véhicule alimenté en  $NH_3$  seraient comparables à celles du GPL).

# LE STOCKAGE

SOUS FORME GAZEUSE, SOUS TERRE



Comme le gaz naturel, l'hydrogène peut être stocké sous pression dans des réservoirs souterrains naturels comme les aquifères ou les anciens gisements de sel gemme. Ce type de stockage se justifie pour les quantités importantes d'hydrogène.

En Allemagne, la ville de Kiel stocke du gaz de ville depuis 1971.

En France, Storengy filiale d'ENGIE stocke déjà un mélange de gaz naturel riche en hydrogène.

Au Royaume Uni, ICI (Imperial Chemical Industries) stocke l'hydrogène dans les mines de sel.

Storengy a lancé un démonstrateur destiné à stocker l'hydrogène dans des cavités salines à Etrez dans l'Ain.

Ce projet contiendra 44 t d'hydrogène et sera opérationnel en 2023.



Projet Hypster - Démonstrateur de Storengy à Etrez

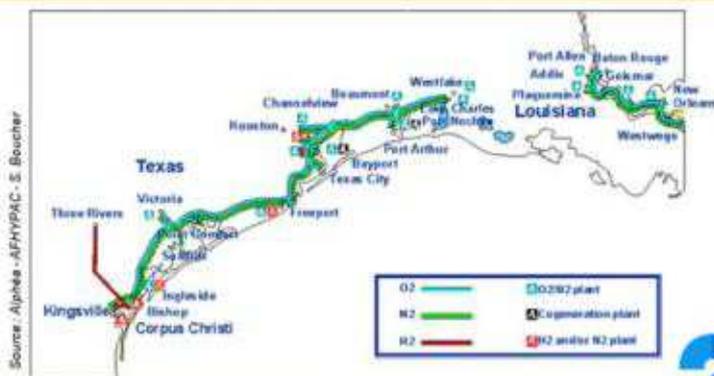
# LE STOCKAGE

SOUS FORME GAZEUSE DANS LES RESEAUX

Actuellement, l'hydrogène est produit dans des unités de grandes capacités pour être utilisé sur site ou transporté par pipelines vers les principaux points de consommation (raffinage, pétrochimie et industrie chimique).



1 500 km en Europe de l'ouest



1 150 km aux Etats-Unis

Ce moyen de distribution sera amené à connaître une forte croissance dans les années à venir mais il est limité par :

- Des investissements très importants
- Un coût du transport **50% plus cher** que celui du gaz naturel
- A même volume et pression, l'hydrogène transporte **trois fois moins** d'énergie que le gaz naturel

Le saviez-vous ?  
L'utilisation industrielle de l'hydrogène dans la chimie a débuté par la construction d'un pipeline dans la Ruhr en 1938. Ce pipeline existe toujours et il est exploité par l'Air Liquide : longueur 240 km et capacité annuelle de 250 millions de Nm<sup>3</sup>.

# À QUOI SERT

## L'HYDROGÈNE AUJOURD'HUI ?

L'hydrogène est très important pour l'industrie.  
Il sert principalement dans le raffinage du pétrole et à la production d'engrais azotés.

On insiste sur l'usage de l'hydrogène pour les transports et le stockage des énergies renouvelables intermittentes mais il gardera un rôle essentiel comme matière première dans l'industrie.

### Dans l'industrie pétrolière

Le raffinage constitue la plus importante consommation d'hydrogène dans le monde.

L'hydrogène permet de réaliser les opérations d'hydrotraitement, de désulfuration et d'hydrocraquage des coupes pétrolières.

#### Pourquoi?

- Répondre à l'évolution des normes (réduction de la teneur en soufre des carburants)
- Réaliser de la conversion profonde pour répondre à la demande en produits légers (essence, diesel, kérosène, naphtha)



Unité d'hydrotraitement de naphtha

Aujourd'hui, l'hydrogène est largement plus valorisé en tant qu'agent chimique que comme vecteur énergétique.

### Dans l'industrie chimique

L'ammoniac ( $\text{NH}_3$ ) est le produit chimique dominant sur le plan de la consommation d'hydrogène. C'est la matière première de base dans l'industrie des engrais par le procédé Haber Bosch.

#### L'ammoniac

est principalement employé dans l'industrie des engrais, sous forme:

- De nitrate d'ammonium
- De sulfate d'ammonium
- De hydrogénophosphate d'ammonium
- D'urée



Usine de production d'ammoniac à Linz, en Allemagne

Dans le secteur de la chimie, l'hydrogène est également utilisé pour la production d'amines, de méthanol et d'eau oxygénée.

L'hydrogène est également utilisé dans d'autres secteurs de l'industrie comme celui de la soudure, de la métallurgie, du verre, des semi-conducteurs ou encore de l'industrie alimentaire (hydrogénation des graisses et des huiles, additif alimentaire E 249).

# LA PILE À COMBUSTIBLE

## PARTENAIRE DE CHOIX DE L'HYDROGÈNE

L'hydrogène peut être utilisé dans deux types de motorisation :

- Soit dans un moteur à combustion interne, comme les véhicules actuels :
  - L'hydrogène est un bon candidat pour une utilisation dans un moteur à combustion interne
  - Le rendement atteint environ 25%
  - Combiné à l'oxygène de l'air, la combustion de l'hydrogène produit de l'eau mais aussi des oxydes d'azote ( $\text{NO}_x$ )
  - Cette solution présente l'intérêt d'utiliser les outils industriels existants de fabrication des moteurs thermiques mais elle nécessite des adaptations spécifiques
- Soit avec un moteur électrochimique utilisant une pile à combustible (PAC) :
  - Il existe 5 types de PAC dont les 2 principales (PEMFC et SOFC) sont présentées dans le panneau suivant
  - Leur rendement peut atteindre 50 à 75%

### Principe

Les PAC produisent de l'électricité suivant le principe inverse de l'électrolyse. Elles transforment l'énergie libérée durant la **réaction électrochimique** de l'hydrogène (ou autres combustibles suivant le type) de PAC) **en électricité, en chaleur et en eau** :

- Les PAC sont constituées d'une anode oxydante (émettrices d'électrons) et d'une cathode réductrice (collectrices d'électrons) séparées par un électrolyte.
- L'alimentation des PAC se fait par injection continue de combustible à l'anode et d'oxygène ou d'air à la cathode. De **l'énergie électrique continue** est générée aux bornes de la pile.

Une cellule de pile à combustible produit une tension électrique d'environ **0,7 à 0,8 V** selon la charge.

Capacités très variées de la **micro-pile** qui ne produit que quelques dizaines de mW pour les batteries des téléphones portables, à l'**unité moyenne** pour les usages liés à la **mobilité** jusqu'**aux grosses unités de plusieurs MW** pour alimenter un quartier (applications stationnaires).



Source : Hydrogen Fuel Cell Technologies

Pile à combustible à membrane échangeuse de proton H-1000

### Principaux avantages des piles à combustible

<b>Modularité</b>	Les piles sont constituées d'unités de base qui peuvent s'empiler permettant des capacités modulables
<b>Flexibilité</b>	La chaleur qui se dégage est valorisable dans certains cas en cogénération sous la forme de vapeur d'eau et d'eau chaude pour l'industrie et le bâtiment ce qui permet d'augmenter encore le rendement jusqu'à 85%.
<b>Efficacité</b>	Rendement élevé (entre 50 et 60%)
<b>Niveau de pollution</b>	Avec l'hydrogène, la PAC n'émet aucun polluant.
<b>Facilité d'utilisation</b>	Aucune pièce en mouvement
<b>Niveau sonore</b>	Le processus électrochimique est totalement silencieux. Le bruit vient des systèmes auxiliaires.



Source : Hydrogen Fuel Cell Technologies

Pile SOFC de 220 kW

L'hydrogène par l'intermédiaire des PAC est particulièrement adapté aux véhicules électriques en raison de l'**extension de l'autonomie** et de la **vitesse du ravitaillement** qu'il procure par rapport aux batteries.



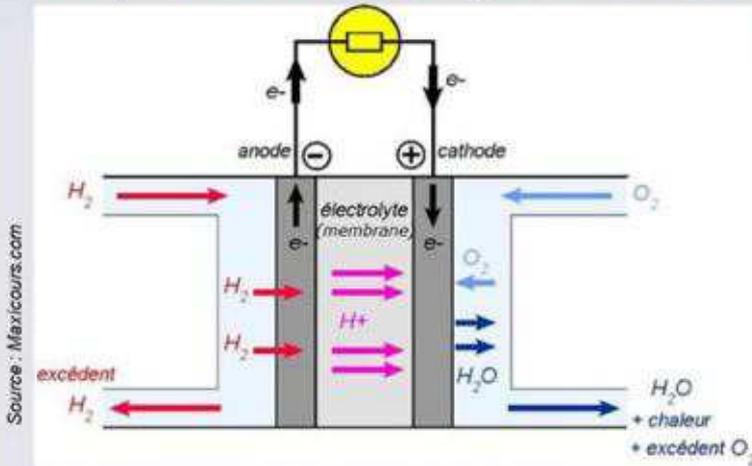
# L'HYDROGÈNE

ArmorScience

# LES TECHNOLOGIES

## DES PILES À COMBUSTIBLE LES PLUS PROMETTEUSES

### Les piles à membrane échangeuse d'ions - PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cell)



La membrane (épaisseur d'environ 100  $\mu\text{m}$ ) fait fonction d'électrolyte. Elle bloque le passage des électrons et laisse passer les protons ( $\text{H}^+$ ).

A l'anode, l'hydrogène au contact du catalyseur se dissocie et libère des électrons qui vont générer le courant électrique.

C'est la réaction d'oxydation qui est accélérée par un catalyseur (platine généralement) :



A la cathode, l'oxygène réagit au contact des électrons libérés par la réaction :

C'est la réaction de réduction :



Les protons qui ont traversé la membrane se recombinaient à la cathode avec les ions d'oxygène suivant la réaction suivante :



Le type de membrane le plus couramment utilisé est le **Nafion**, un fluoropolymère qui a des températures de fonctionnement comprises entre 80 et 90  $^{\circ}\text{C}$ .

Un autre type de membrane est un polybenzimidazole (PBI) qui peut atteindre 220  $^{\circ}\text{C}$  (les hautes températures permettent de meilleures efficacités et densités énergétiques).

### Piles à oxyde solide - SOFC (Solide Oxyde Fuel Cell)

Le mode opératoire de ces piles est différent. Ce sont les ions oxyde qui traversent la membrane. Elles peuvent fonctionner avec d'autres combustibles que l'hydrogène contrairement aux PEMFC.

A l'anode l'hydrogène se dissocie :



Les électrons empruntent le circuit extérieur mais les protons ne traversent pas la membrane. Ils restent sur l'anode.

A la cathode l'oxygène va fixer les électrons pour donner comme précédemment des ions oxyde :

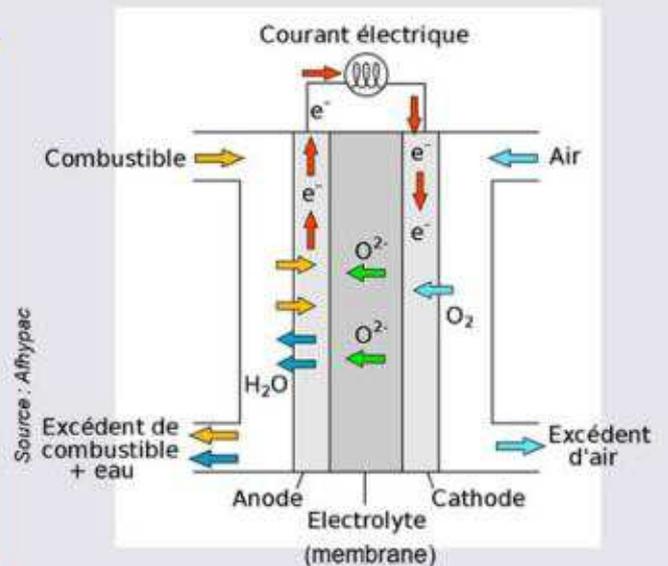


La récupération de la chaleur de réaction participe à la valeur élevée des rendements

Mais les ions oxyde traversent la membrane et se combinent avec les protons pour former de l'eau :



Chaque pile est constituée de 3 couches de céramique (l'anode, l'électrolyte et la cathode) et d'une couche d'interconnexion métallique ou en céramique qui les sépare. Des centaines de ces piles sont disposées en série. Les céramiques sont actives à très haute température (entre 450 et 1 200  $^{\circ}\text{C}$ ).



#### Les PEMFC

- COMPARAISON**
- Puissance : De 0,1 à 500 kW
  - Rendement système : De 30 à 50%
  - Maturité de la technologie : Commercialisé
  - Domaine : Transport, résidentiel, petites applications
  - Fonctionnement : Catalyseur de réaction (Pt)

#### Les SOFC

- Puissance : Jusqu'à 100 MW
- Rendement système : De 55 à 75%
- Maturité de la technologie : En développement
- Domaine : Cogénération pour procédés industriels, alimentation électrique des villes
- Fonctionnement : Pas de métaux précieux comme catalyseurs de réaction

# LE DÉFI

## DE LA MOBILITÉ



**Le secteur des transports représente 25% des émissions mondiales de CO2. De très nombreuses initiatives sont lancées ou sont en développement pour que le transport routier, le transport ferroviaire et le transport maritime soient équipés de PAC\*.**



Source : Société du Taxi Electrique Parisien

Un des 5 véhicules de la flotte de taxis Hype

L'emploi des PAC\* est déjà une réalité pour des voitures particulières, des véhicules utilitaires légers, des chariots élévateurs et des bus.

En France, Michelin et Faurecia ont créé en 2019 la co-entreprise, Symbio, spécialisée dans l'hydrogène. Elle a pour but la production de PAC\* nouvelle génération en grande quantité pour les véhicules légers, les utilitaires, les poids lourds et d'autres domaines d'activité.



**Les piles à membranes échangeuses de protons (PEMFC) sont les mieux adaptées au domaine du transport. C'est sur ce type de piles que les constructeurs automobiles concentrent l'essentiel de leurs recherches.**

Alstom dispose d'une avance technologique et industrielle sur ses principaux concurrents internationaux avec le Coradia iLint qui est actuellement le modèle de train à PAC\* le plus abouti au monde, déployé en Allemagne.

Des acteurs industriels historiques tels que Total, Shell, Engie et Air Liquide poussent à la construction d'un réseau de stations de distribution d'hydrogène.

### Faut-il préférer l'hydrogène à l'électrique ?

Les véhicules électriques à batteries et les véhicules à hydrogène équipés de PAC\* sont souvent mis en compétition.

- ↳ Les PAC\* présentent une perte d'efficacité globale face aux batteries
- ↳ Elles sont coûteuses et volumineuses pour le moment
- ↳ Les PEMFC restent tributaires des métaux précieux



Source : Engie

Train à hydrogène Coradia iLint



Source : Alstom



Source : EY d'après SIA Partners

	Véhicule électrique à batterie	Véhicule électrique à pile à combustible (PEMFC)
Autonomie actuelle	250 km – 600 km	500 km
Ravitaillement	Entre 1h et 10h	4 à 5 minutes
Poids de la batterie/PAC	300 kg	150 kg
Rendement du puits à la roue	~70 %	~30 %
Utilisation de métaux rares	Lithium, Nickel et Cobalt	Platine
Prix à l'achat, hors aides étatiques	À partir de 25 000 euros	À partir de 65 000 euros

Analyse comparée des véhicules électriques à batterie et à hydrogène avec PAC

L'hydrogène ne peut pas révolutionner le secteur automobile à ce stade mais il reste prometteur pour le secteur des transports lourds comme les camions, les autobus urbains, les trains et les bateaux qui nécessitent plus d'énergie que ce que les batteries actuelles peuvent fournir.

# L'HYDROGÈNE, ENJEU MAJEUR

## DE LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE

Dans un effort de limiter leurs impacts sur la planète et le climat, de nombreux États ont mis en œuvre des plans de transition énergétique.

En France, l'hydrogène constitue un thème important du plan national inscrit dans la **Programmation Pluriannuelle de l'Energie (PPE)** et la **Stratégie Nationale Bas-Carbone (SNBC)**. Ce plan définit une trajectoire de réduction des émissions de gaz à effet de serre avec pour objectifs d'atteindre la **neutralité carbone** à l'horizon 2050 et de réduire l'**empreinte carbone** de la consommation des Français.

## En France, les projets pour l'hydrogène



### Décarboner la production

- Conversion du gaz naturel en hydrogène par captage de CO<sub>2</sub> puis stockage dans le sous-sol de façon pérenne
  - Electrolyse de l'eau avec de l'électricité produite à partir d'énergies d'origine renouvelable (solaire, photovoltaïque, éolien) ou nucléaire
- Objectif : Produire 630 000 t/an d'hydrogène décarboné en privilégiant l'électrolyse, ce qui nécessitera 6,5 GW.

### Décarboner l'industrie

L'hydrogène aurait dans ce cas deux fonctions :

- Alimenter en énergie décarbonée les unités industrielles concernées
- Contribuer à la décarbonation des procédés industriels concernés en le substituant aux énergies fossiles

Dans la fabrication de l'acier, le charbon pourrait être remplacé par de l'hydrogène décarboné.

### Décarboner les transports

- L'hydrogène présente des avantages par rapport aux batteries, en termes d'autonomie et de temps de recharge
- L'hydrogène peut être utilisé dans un moteur à combustion interne

La solution des véhicules équipés d'une PAC n'est favorable que si l'hydrogène est produit à partir de sources décarbonées et de nombreux défis sont à relever pour concurrencer le thermique et l'électrique.

### Intégrer les énergies renouvelables

- Pallier la variabilité de la production des énergies renouvelables intermittentes en « stockant l'électricité » sous forme d'hydrogène
- L'hydrogène est produit par électrolyse de l'eau et l'électricité est fournie par une production éolienne ou photovoltaïque.

Objectif : Reconvertir cet hydrogène en électricité afin de répondre aux pointes de consommation.



### Les objectifs

	2023	2028
Démonstrateur de puissance <i>power to gas</i> (MW)	1 à 10	10 à 100
Taux d'incorporation d'hydrogène décarboné dans l'hydrogène industriel au niveau national (%)	10	20 à 40
Véhicules utilitaires légers à hydrogène (nombre)	5000	20 000 à 50 000
Véhicules lourds à hydrogène (nombre)	200	800 à 2000

Source : PPE

### Le plan d'ici à 2030

7,2 milliards d'€ pour réduire de 6 millions de t les émissions en CO<sub>2</sub> :

- 650 millions d'€ pour l'aide à la recherche et l'innovation d'ici 2023
- 150 000 emplois directs et indirects attendus
- Réduction des coûts de production : L'hydrogène vert coûte 4 à 5 €/kg contre moins de 2 € pour l'hydrogène d'origine fossile

# LA CARTOGRAPHIE MONDIALE

## DES ACTEURS DE L'HYDROGÈNE

L'AIE\* prévoit un décuplement de la demande en hydrogène à l'horizon 2050.  
Selon « Hydrogen Council », environ 10 millions de véhicules à hydrogène pourraient être en circulation dans le monde en 2030.



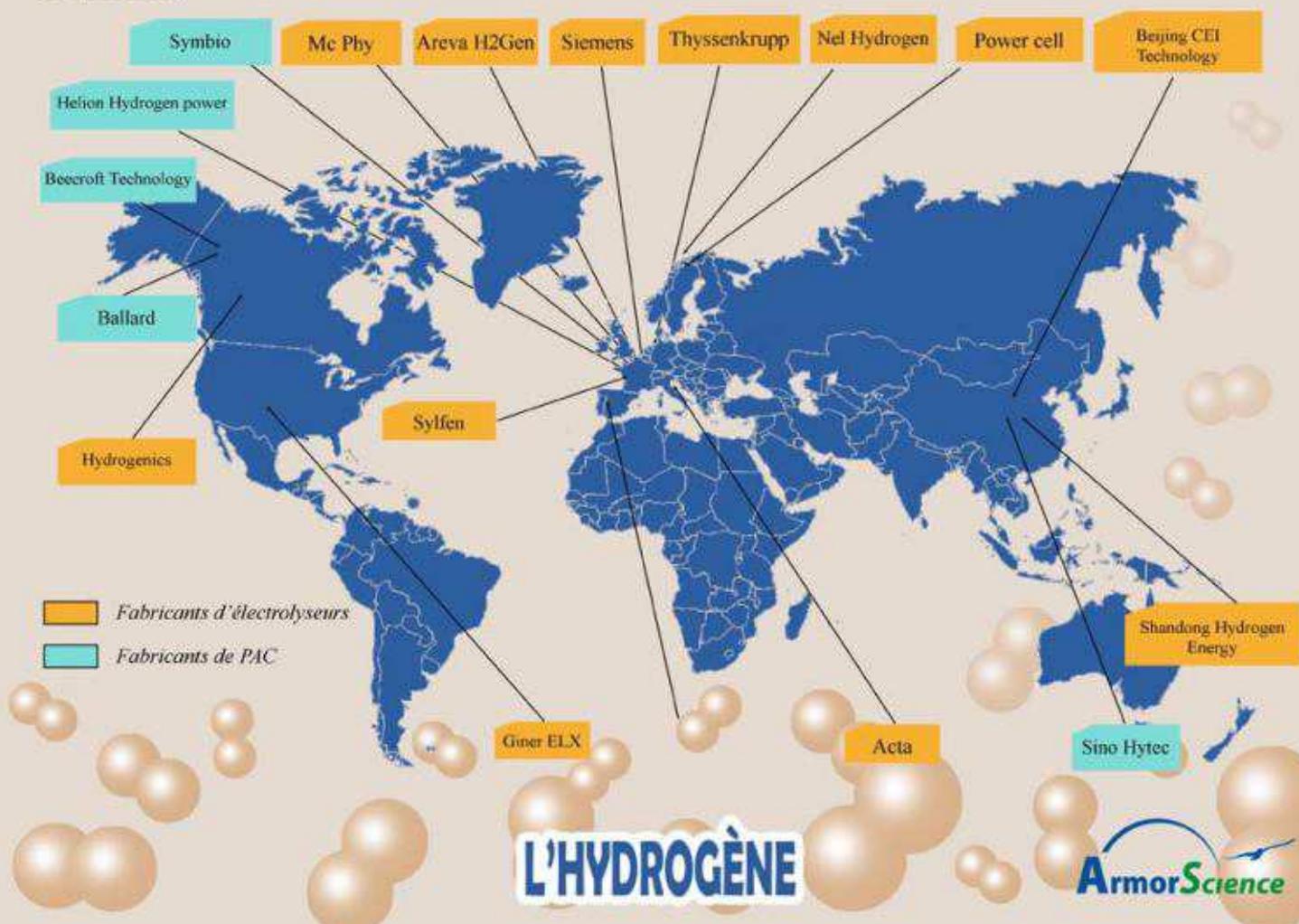
La chaîne de valeur de l'hydrogène comprend trois grands segments :



Ce segment va toucher tous les industriels impliqués dans la production d'hydrogène dont les fabricants d'électrolyseurs en priorité.

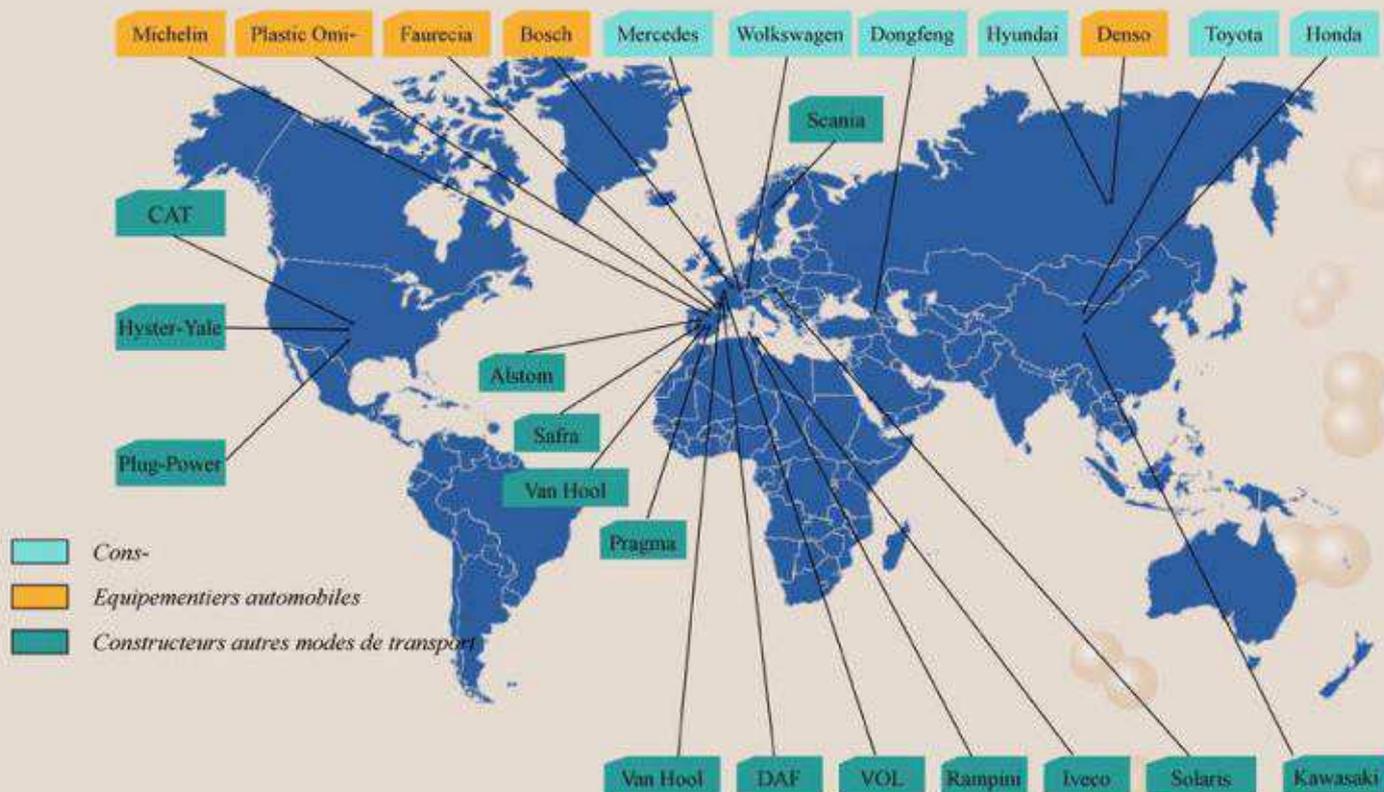
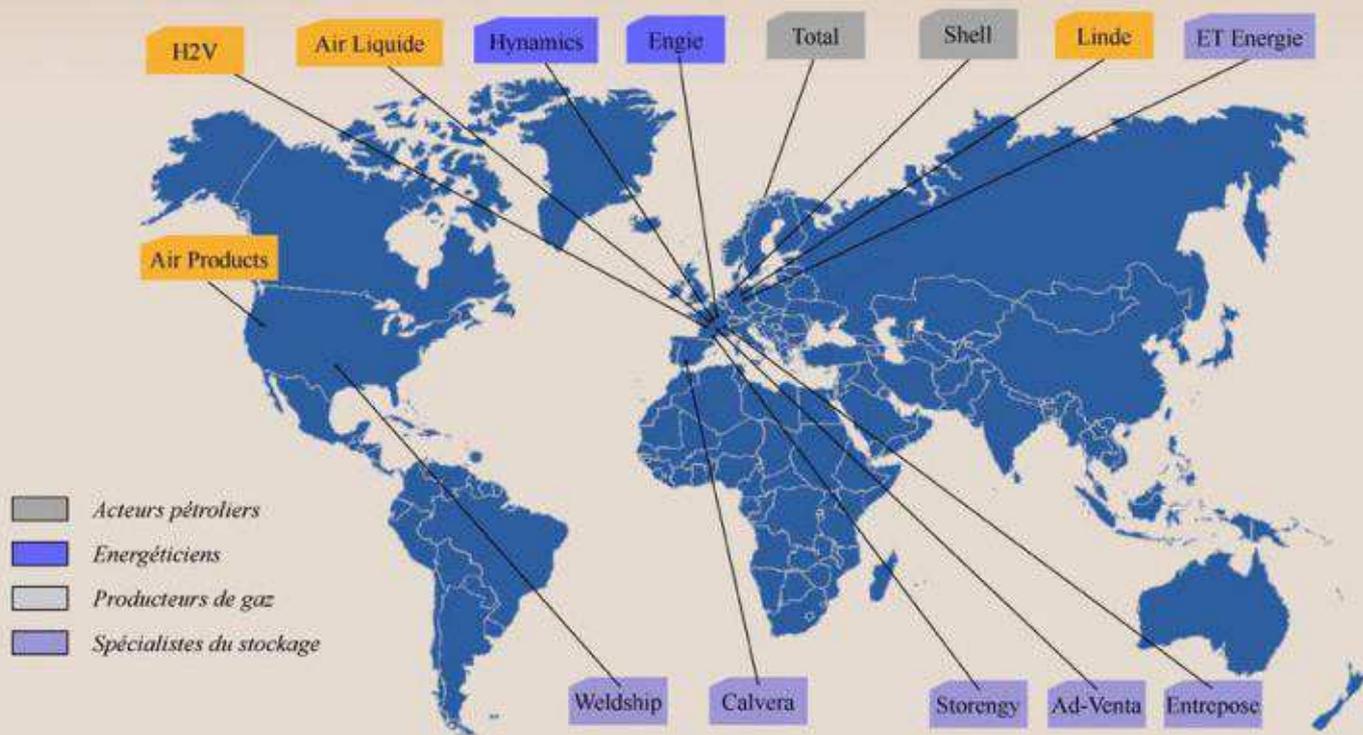
Ce segment comprend la fabrication des équipements et infrastructures de compression, de stockage et de transport.

Ce segment comprend la fabrication des véhicules et le développement des stations de recharge.



# LES PRINCIPAUX ACTEURS

## DU SECTEUR DE L'HYDROGÈNE



# LES INITIATIVES RÉGIONALES

## POUR DÉVELOPPER L'HYDROGÈNE

Le volet hydrogène du PPE et de la SNBC est décliné dans les régions, les départements et certains EPCI\*. Pour la Région Bretagne, ce volet s'intègre dans un grand chantier initié en 2017, qui est destiné à faire émerger un nouveau projet de territoire : **la Breizh COP**.

Quatre de ses objectifs concernent le développement de l'hydrogène renouvelable.



Une étude, portée par la Région, BDI\* et l'ADEME Bretagne, a été menée en 2019 avec la collaboration de 40 structures publiques et privées et à travers la consultation de 200 acteurs bretons.

Elle a défini une feuille de route :

- 8 boucles locales « hydrogène renouvelable » et bas carbone réparties sur la Bretagne pour tendre vers 400 véhicules en circulation en 2025
- 3 écosystèmes portuaires maritimes « hydrogène renouvelable » entre 2023 et 2030
- Une flottille de 10 navires à chaîne propulsive électro-hydrogène pour la desserte de passagers, le cabotage de fret, la manutention et la pêche
- Un démonstrateur de production d'hydrogène offshore pour 2025
- 2800 véhicules d'ici 2030 et 450000 d'ici 2050

### Des projets ...

À Arzon, la compagnie de transport de passagers Le Passeur des îles et le concepteur de bateaux électriques Naviwatt embarquent ensemble sur un projet de bateau à hydrogène.

### Et des réalisations ...

Exploitée par HyGO (société commune d'Engie et de Morbihan Energies), une station délivre 300 kg d'hydrogène par jour à l'usine Michelin attenante et à des véhicules grand public. L'hydrogène est produit par électrolyse en utilisant de l'électricité renouvelable.



Prototype d'une voiture en autopartage produite sur le territoire.

Redon Agglomération et la société H2X-Ecosystems développent la production d'électricité verte par des toitures photovoltaïques et des éoliennes pour produire, stocker et distribuer de l'hydrogène destiné à la mobilité.



La première station hydrogène bretonne à Vannes

Source : Agence Etibar Antibioles