

## DIHYDROGENE 2015

L'hydrogène bien qu'étant l'élément le plus présent dans l'univers (92 % atomique, 75 % en masse) est peu présent dans l'atmosphère terrestre avec une teneur volumique de 0,0005 %.

Chaque seconde, dans le soleil, 600 millions de t d'hydrogène sont converties, par fusion thermonucléaire, en hélium avec production d'énergie.

Sur terre, l'élément hydrogène est essentiellement présent sous forme combinée, principalement dans l'eau et les hydrocarbures. Sa teneur dans l'écorce terrestre est de 0,22 %, en masse.

Dans le corps humain, il représente 10 % de son poids.

Il existe des sources naturelles de dihydrogène. En 1906 une telle source avait été mise en évidence, en France, à Vaux en Bugey (01) lors d'un forage destiné à rechercher du sel, puis dans les années 1930 aux Etats-Unis. Du dihydrogène est présent dans des fluides hydrothermaux des dorsales médio-océaniques avec par exemple une teneur de 36 % de H<sub>2</sub> en Islande, dans les gaz de volcans, avec par exemple 58 % de H<sub>2</sub> dans des gaz s'échappant de l'Etna, en Sicile, dans des eaux de sources hyperalcalines, par exemple en Oman, dans les mines...

Ces dernières années ont été découvertes, dans l'ouest de la Russie et aux Etat-Unis, des structures géologiques particulières, en surface, sous forme de dépressions circulaires ou ovoïdes de quelques centaines de mètres à quelques km de diamètre, émettant du dihydrogène à des débits qui peuvent atteindre 27 000 m<sup>3</sup>/jour.

Toutefois, il n'est pas actuellement envisagé d'exploiter ces sources.

**MATIERES PREMIERES** : le dihydrogène est principalement obtenu à partir de l'eau et des hydrocarbures ([gaz naturel](#) et [pétrole](#)).

**FABRICATION INDUSTRIELLE** : son principe repose sur la réduction de l'[eau](#) par :

- les hydrocarbures,
- électrolyse,
- le [carbone](#).

Matières premières utilisées, dans le monde, pour produire le dihydrogène, en 2014 : elles sont à 96 % d'origine fossile.

Gaz naturel	49 %	Charbon	18 %
Hydrocarbures liquides	29 %	Électrolyse	4 %

Source : IHS

Les parts relativement importantes des hydrocarbures liquides et du charbon sont dues à une coproduction de dihydrogène d'une part lors du raffinage du pétrole et d'autre part lors de la production de coke destiné à la sidérurgie. De même, la production par électrolyse provient, à 90 %, de l'électricité produite à partir de combustibles fossiles.

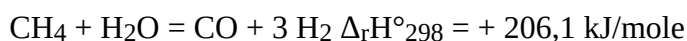
d'une coproduction lors de l'obtention de dichlore et d'hydroxyde de sodium. L'électrolyse directe de l'eau ne concerne que 10 % de la production par électrolyse.

Par ailleurs, du dihydrogène est coproduit dans de nombreux autres procédés chimiques.

**Reformage du gaz naturel** : c'est la principale source de dihydrogène.

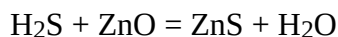
Depuis 1970, le réformage du [naphta](#) est, en général, remplacé par celui du gaz naturel.

- Principe : le gaz de synthèse (mélange de dihydrogène et de monoxyde de carbone) est produit par vaporeformage, à 800 - 900°C et à 3,3 MPa, en présence de catalyseur à base d'oxyde de [nickel](#) sur des anneaux d'[alumine](#) imprégnés par 10 à 16 % en masse de Ni (leur durée de vie est comprise entre 8 à 10 ans) :



La réaction, très endothermique, nécessite un apport continu d'énergie. Le mélange gazeux circule dans des tubes, chauffés extérieurement, contenant le catalyseur. De l'ordre d'une dizaine à quelques centaines de tubes (jusqu'à 500) de 10 cm de diamètre et 11 m de long sont placés dans un four. Après réformage, le gaz de synthèse contient de 5 à 11 % en volume de méthane non transformé.

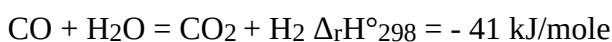
Le catalyseur est très sensible à la présence de [soufre](#) qui donne du sulfure de nickel : moins de 1 atome de soufre pour 1000 atomes de nickel suffit pour empoisonner le catalyseur. Le gaz naturel doit être désulfuré à moins de 0,1 ppm de soufre. Après une prédésulfuration obtenue par hydrogénation catalytique suivie d'une absorption dans une solution aqueuse de diéthanolamine (voir le [traitement du gaz de Lacq](#) dans le chapitre [soufre](#)), une nouvelle hydrogénation effectuée vers 350 - 400°C, permet, en présence de catalyseurs [molybdène-cobalt](#) ou molybdène-nickel, de transformer tous les composés soufrés en [sulfure d'hydrogène](#). Le sulfure d'hydrogène est fixé, vers 380 - 400°C sur de l'[oxyde de zinc](#) selon la réaction :



- Utilisation du gaz de synthèse pour produire de l'ammoniac (sans récupération de CO) :

On réalise un reformage secondaire en ajoutant de l'air en quantité telle que le [diazote](#) contenu soit, avec H<sub>2</sub>, dans les proportions stœchiométriques de la réaction de formation de NH<sub>3</sub>. Le [dioxygène](#) de l'air oxyde le méthane restant. Le catalyseur utilisé est à base d'oxyde de nickel.

Le monoxyde de carbone du gaz de synthèse est ensuite transformé, par conversion, en [dioxyde de carbone](#) avec production complémentaire de dihydrogène, en 2 étapes. On obtient ainsi un gaz contenant 70 % de H<sub>2</sub>.



- à 320 - 370°C avec un catalyseur à base d'oxyde de [fer](#) (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>) et d'oxyde de [chrome](#) (Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) avec ajout métallique à base de [cuivre](#). Le catalyseur est sous forme de pastilles obtenues à partir de poudre d'oxydes ou de spinelles, sa durée de vie de 4 à 10 ans et plus. Les 2 à 3 % en volume de monoxyde de carbone résiduel sont convertis dans une deuxième étape,

- à 205 - 240°C avec un catalyseur à base d'oxyde de cuivre (15 à 30 % en masse) et d'oxydes de chrome et zinc sur alumine, d'une durée de vie de 1 à 5 ans. Après conversion le monoxyde de carbone résiduel est d'environ 0,2 % en volume.

- CO<sub>2</sub> est éliminé par dissolution dans une solution d'amines à 35 bar ou dans une solution de carbonate de potassium. Par détente à la pression atmosphérique, CO<sub>2</sub> est libéré, et la solution recyclée.
- Le dihydrogène, en présence de diazote, est ensuite utilisé pour synthétiser l'[ammoniac](#) (voir ce chapitre)
- Utilisation du gaz de synthèse avec récupération de CO et H<sub>2</sub> :

Le reformage est une source intéressante de monoxyde de carbone, matière première pour la fabrication de [méthanol](#), d'acide acétique, d'[acide formique](#), d'acide acrylique, de phosgène et des isocyanates.

Après élimination du dioxyde de carbone présent et séchage, le dihydrogène et le monoxyde de carbone sont séparés. [Air Liquide](#) utilise deux procédés cryogéniques :

- Par refroidissement dans des échangeurs et condensation du monoxyde de carbone : CO a une pureté de 97-98 % et H<sub>2</sub> contient de 2 à 5 % de CO.
- Par refroidissement par lavage au méthane liquide : CO a une pureté de 98-99 %, et H<sub>2</sub> ne contient que quelques ppm de CO.
- Obtention de H<sub>2</sub> de haute pureté :

Des applications telles que l'électronique, l'agroalimentaire, la propulsion spatiale nécessitent du dihydrogène de très haute pureté. Celui-ci est purifié par adsorption des impuretés sur du charbon actif (procédé PSA). La pureté obtenue peut être supérieure à 99,9999 %.

Capacités des installations industrielles : couramment 100 000 m<sup>3</sup>/h et jusqu'à 220 000 m<sup>3</sup>/h.

### **Électrolyse :**

- de [NaCl](#) en solution aqueuse : H<sub>2</sub> coproduit (28 kg de H<sub>2</sub> par tonne de Cl<sub>2</sub>) **donne 4 % du H<sub>2</sub> mondial (12 % en Europe)**. Voir le chapitre [chlore](#). La production française, en 2008, est de 51 000 t.
  - de [H<sub>2</sub>O](#) : elle est principalement utilisée dans des applications industrielles qui sont localisées loin d'un réseau de distribution ou bien dans des applications où la consommation électrique de l'électrolyseur est marginale au regard de la consommation du procédé final. Le coût de production du dihydrogène, du moins pour les électrolyseurs de forte capacité (> 200 Nm<sup>3</sup>/h), est lié à celui de l'[électricité](#). La consommation est comprise entre 4,5 kWh/m<sup>3</sup> H<sub>2</sub> pour les électrolyseurs de forte capacité à 6 kWh/m<sup>3</sup> H<sub>2</sub> pour des électrolyseurs de faible capacité (< 1 Nm<sup>3</sup>/h). Les capacités mondiales installées, soit 33 000 m<sup>3</sup> de H<sub>2</sub>/h, donnent moins de 1 % du H<sub>2</sub> mondial. La production française, en 2008, est de 180 t.
- La technologie la plus utilisée est l'électrolyse alcaline avec comme électrolyte une solution aqueuse de [KOH](#) (de 25 à 40 % de concentration), en utilisant une eau la plus pure possible (filtration sur [charbon actif](#) et déminéralisation totale par résines échangeuses d'ions). La cathode est en [acier doux activé](#) par formation d'un dépôt de surface à base de [Ni](#). L'anode est en acier nickelé ou en nickel massif. La tension est comprise entre 1,8 et 2,2 V. La puissance par électrolyseur peut atteindre 2,2 à 2,5 MW.

Deux autres technologies, issues des travaux sur les piles à combustible, sont en voie de développement :

- l'électrolyse à membrane échangeuse de proton (PEM : Proton Exchange Membrane),
- l'électrolyse à haute température (PCFC et SOFC).

Elles fonctionnent à l'inverse des piles à combustible : alimentées en électricité et en eau elles fournissent du dioxygène et du dihydrogène alors que les piles à combustibles sont alimentées en dioxygène et en dihydrogène et fournissent de l'électricité et de l'eau.

Les électrolyseurs de type PEM à électrolyte solide, ont été développés au cours du programme spatial américain Gemini-Apollo (1962-1966) afin de générer du dioxygène. Cette technologie est également employée comme générateur de dioxygène dans les sous-marins américains et britanniques. L'électrolyte, solide, est une membrane polymère conductrice de protons de type Nafion. Elle est actuellement en train de s'implanter dans les applications industrielles pour des capacités de production jusqu'à 50 Nm<sup>3</sup>/h. Pour des productions plus importantes, l'électrolyse alcaline reste la seule technologie actuellement disponible sur le marché mais plusieurs sociétés telles que [Areva H2Gen](#), aux Ulis (91) développent des électrolyseurs PEM de l'ordre du MW pour répondre aux futurs marchés du stockage des énergies renouvelables.

Les électrolyseurs à haute température de type SOFC (Solid Oxid Fuel Cell), fonctionnent entre 650 et 1000°C, avec un électrolyte solide en zircone, conductrice des anions O<sup>2-</sup>. La cathode, poreuse est alimentée en vapeur d'eau. Les anions O<sup>2-</sup> diffusent au travers de la zircone pour se recombinaison en dioxygène sur l'anode. Le dihydrogène se forme à la cathode et reste en présence de la vapeur d'eau.

Les électrolyseurs à haute température de type PCFC (Proton Ceramic Fuel Cell), à électrolyte céramique conducteur protonique, fonctionnent entre 400 et 600°C. L'électrolyte peut être de diverses natures, par exemple de structure perovskite AMO<sub>3</sub> avec A : Ba ou Sr, M : Ce ou Zr.

**Pyrolyse du charbon** qui contient environ 5 % de H<sub>2</sub> :

La production de [coke](#) (par élimination des matières volatiles du charbon, à 1100-1400°C) donne un gaz contenant environ 60 % de H<sub>2</sub> et 25 % de CH<sub>4</sub> (1 t de charbon donne 300 m<sup>3</sup> de gaz). Depuis l'utilisation du gaz naturel pour produire H<sub>2</sub>, le [gaz de cokerie](#) est souvent brûlé et l'énergie libérée récupérée (voir le chapitre [gaz naturel](#)). En 2008, la production française dans ce secteur a été de 127 000 t d'hydrogène, utilisées par combustion pour produire de l'énergie.

**Gazéification du charbon :**

Source principale de H<sub>2</sub> avant l'utilisation du gaz naturel. Actuellement elle est surtout utilisée en Chine et en Inde ainsi qu'en Afrique du Sud (par la société [Sasol](#)) qui produit ainsi du gaz de synthèse destiné à fabriquer du carburant synthétique. [Dans le monde, le charbon donne 18 % de la production d'hydrogène.](#)

- Principe : formation du gaz à l'eau ou gaz de synthèse, à 1000°C.



La réaction, endothermique, nécessite un soufflage de [O<sub>2</sub>](#) pour maintenir la température par combustion du carbone. Composition du gaz : 50 % H<sub>2</sub> - 40 % CO.

La production de H<sub>2</sub> peut être améliorée par conversion de CO, voir ci-dessus.

- Technique utilisée : gazéification dans des gazogènes (Lurgi).

Dans l'avenir, la gazéification souterraine pourrait être utilisée.

### **Autres sources :**

#### Raffinage du pétrole et pétrochimie :

- Réformage et craquage catalytique des produits pétroliers : 100 m<sup>3</sup> de H<sub>2</sub>/t de pétrole brut sont produits lors du craquage catalytique. Le gaz obtenu ne possède qu'une teneur de 70 à 80 % en dihydrogène. Le raffinage pétrolier, principalement lors du craquage catalytique produit du dihydrogène mais, il en consomme également, principalement lors des désulfurations après hydrogénation (170 000 t, en France, en 2008).
- Oxydation partielle de coupes pétrolières (procédés Shell et Texaco). La production française a été, en 2008, de 5 000 t.
- Vapocraquage du naphta (production d'éthylène). La production d'éthylène produit 370 m<sup>3</sup> de H<sub>2</sub>/t d'éthylène pour une consommation de 180 m<sup>3</sup> de H<sub>2</sub>/t d'éthylène soit un bilan positif de 190 m<sup>3</sup> de H<sub>2</sub>/t d'éthylène.
- Sous-produit de la fabrication du styrène : la production de dihydrogène est de 220 m<sup>3</sup> de H<sub>2</sub>/t de styrène.

En France, en 2008, sur un total de 473 000 t de dihydrogène consommées par le raffinage pétrolier et la pétrochimie, 349 000 t ont été coproduites dans ces secteurs, 66 000 t produites volontairement sur le lieu d'utilisation pour un usage captif, 58 000 t de dihydrogène marchand achetées à des producteurs de gaz industriels.

#### Autres :

- Craquage du méthanol (procédé Grande Paroisse) : utilisé à Kourou en Guyane, par Air Liquide, pour produire le dihydrogène liquide (10 millions de L/an) destiné aux vols d'Ariane.
- La production d'acétylène par oxydation partielle du méthane ( $2 \text{ CH}_4 = \text{C}_2\text{H}_2 + 3 \text{ H}_2$ ) qui donne 3 400 m<sup>3</sup> de H<sub>2</sub>/t d'acétylène ou par décomposition d'hydrocarbure sous arc électrique qui donne 2 470 m<sup>3</sup> de H<sub>2</sub>/t d'acétylène.
- Lors de la fabrication d'acide cyanhydrique selon la réaction :  $\text{CH}_4 + \text{NH}_3 = \text{HCN} + 3 \text{ H}_2$  qui donne 2 470 m<sup>3</sup> de H<sub>2</sub>/t de HCN.
- Gaz de purge des unités de fabrication d'ammoniac.

### **Conditionnement - Transport :**

- La plus grande partie du dihydrogène utilisé est auto produit ou coproduit par les industries consommatrices : pour la production de NH<sub>3</sub>, de CH<sub>3</sub>OH, le raffinage pétrolier. En France, en 2008, 59 % de la consommation de dihydrogène provient d'une coproduction de dihydrogène lors de la production d'autres produits, 30 % d'installations captive et 11 % assurée par les producteurs de gaz industriels. En conséquence, le volume transporté est réduit. Dans le monde, en 2014, 80 % de la production est autoproduite par les industries consommatrices.
- Transporté par hydrogénoducs : les canalisations utilisées par Air Liquide ont un diamètre de 10 cm sous une pression de 100 bar.

Dans le monde, en 2016, le réseau a une longueur de 4 542 km.

Dans l'Union européenne, le réseau a, en 2016, une longueur totale de 1 609 km dont 1 349 km exploités par Air Liquide dans le Nord de la France, les Pays Bas et la Belgique (949 km), la Ruhr, en Allemagne (240 km), dans la région lyonnaise (57 km), celle de Fos-sur-Mer (42 km), voir les cartes dans le chapitre consacré à l'[oxygène](#). Le réseau exploité par Linde représente 172 km en Allemagne et au Royaume Uni, celui exploité par Air Products, 57 km principalement aux Pays Bas. Le réseau développé aux États-Unis, par Air Products (1 062 km), Praxair (739 km), Air Liquide (545 km), possède une longueur de 2 608 km, principalement le long de la côte du Golfe du Mexique.

- Comprimé sous 200 ou 300 bar dans des tubes placés sur des semi-remorques (un millier, en Europe) contenant de 180 à 540 kg de dihydrogène, des wagons contenant 500 kg, des bouteilles de 10 m<sup>3</sup> sous 200 bar. En 2006, en Europe, le volume transporté sous cette forme a été de 425 millions de m<sup>3</sup>.

- Dihydrogène liquide : seule l'industrie spatiale utilise directement le dihydrogène liquide, les autres applications nécessitent sa retransformation à l'état gazeux.

Dans l'Union Européenne, en 2016, il y a 4 liquéfacteurs en fonctionnement avec une capacité de production totale de 26 t/jour, par Air Liquide à Waziers (59), avec 10,5 t/j, Air Products à Rozenburg (Pays Bas), avec 5,4 t/j, Linde, en Allemagne, à Ingolstadt, avec 4,4 t/j et Leuna, avec 5,7 t/j. Le dihydrogène liquide est transporté dans des camions citernes de 15 000 à 53 000 litres. La flotte d'Air Liquide est de 12 camions en Europe et 75 en Amérique du Nord.

Le liquéfacteur de L'Air Liquide à Waziers (59) est le plus important d'Europe (10,5 t/jour). Il est alimenté par du dihydrogène gazeux par canalisations. La capacité de stockage est de 750 000 L de dihydrogène liquide dans 3 réservoirs indépendants. Le dihydrogène produit est destiné, en priorité, aux essais du programme Ariane 5. Air Liquide exploite d'autres liquéfacteurs à Bécancour (Canada) avec 9,9 t/jour et à Kourou (Guyane) avec 2,5 t/jour.

La capacité de production des États-Unis est de 182 t/jour.

**PRODUCTIONS** : en 2014. Monde : 60 millions de t (666 milliards de m<sup>3</sup>), États-Unis (11 millions de t), Union européenne (2006) : 8,7 millions de t, France (2008) : 922 000 t.

Matières premières utilisées pour la production d'hydrogène :

	Monde	Union européenne	France
Gaz naturel	49 %	41 %	40 %
Pétrole	29 %	42 %	40 %
Charbon	18 %	5 %	14 %
Électrolyses	4 %	12 %	6 %

Sources : IHS, IFP, Actualité chimique n°347, CETH2

La part importante du pétrole provient principalement d'une coproduction lors de son raffinage. De même, en France, pour le charbon, le dihydrogène provenant l'une coproduction lors de la fabrication du coke destiné à la sidérurgie.

Dans l'Union européenne, en 2015, la production de dihydrogène marchand, hors autoproductions, est de 1,43 million de t dont 404 000 t en Allemagne, 165 000 t en Finlande, 150 000 t aux Pays Bas, 108 152 t en Italie, 101 000 t en France, 62 000 t en Espagne, 52 000 t au Royaume Uni. Les

productions de Belgique sont confidentielles.

Aux États-Unis, la capacité de production de dihydrogène marchand est de 5 millions de t/an.

#### **Producteurs :**

- Utilisations captives : producteurs d'[engrais](#) (NH<sub>3</sub>), d'[éthylène](#), [raffineries de pétrole](#). Par exemple, aux États-Unis, au 1<sup>er</sup> janvier 2015, les capacités de production des raffineries de pétrole sont de 4 millions de t/an.

- Producteurs d'hydrogène marchand :

Dans le monde, fin 2016, la capacité de production est de 23 650 t/jour dont 8 553 t/jour pour [Air Products](#) avec 60 unités de production, 5 224 t/jour pour [Praxair](#), avec 40 unités de production, 5 130 t/jour pour [Air Liquide](#) avec 47 unités de production et 3 298 t/jour pour [Linde](#).

En Europe, fin 2016, la capacité de production est de 3 769 t/jour à 44 % par Air Liquide, 37 % par Linde, 15 % par Air Products, 1 % par Praxair.

Aux États-Unis, fin 2016, la capacité de production est de 13 643 t/jour à 42 % par Air Products, 35 % par Praxair, 13 % par Air Liquide, 8 % par Linde.

**SITUATION FRANÇAISE**, en 2016, les valeurs des productions sont celles de 2008.

- Production : 922 000 t.

- Productions captives :

- pour la production d'ammoniac : 215 000 t, par [Borealis](#), à Grandpuits (77), Grand Quevilly (76) et Ottmarsheim (68) et [Yara](#), à Pardies (64) et le Havre (76).

- pour le raffinage pétrolier par reformage de gaz naturel : 292 000 t, [Total](#), à Gonfreville (76), Donges (44), La Mède (13), Feysin (69) et Grandpuits (77), [Esso](#) à Port Jérôme (76) et Fos-sur-Mer, [Ineos](#) à Lavera (13).

- Coproductions :

- d'éthylène, styrène : 139 000 t, [Total](#) à Gonfreville (76), Carling-Saint Avold (57), Feysin (69) et Lavera (13), [ExxonMobil](#) à Notre Dame de Gravenchon (76), [Versalis](#), filiale du groupe [Eni](#), à Dunkerque (59), [Lyondellbasell](#) à Berre l'Étang (13).

- cokeries : 127 000 t, [ArcelorMittal](#), à Fos-sur-Mer (13), Dunkerque (59) et Sérémange (57).

- d'électrolyses : 51 000 t, [Vencorex](#) à Pont de Claix (38), [Tessenderlo](#) à Loos (59), [Société des Produits Chimiques d'Harbonnières](#) (80), [Potasse et Produits Chimiques](#) à Than (68), [Eka Chemicals](#) à Ambès (33), [Solvay](#) à Tavaux (39), [Arkema](#) à Jarrie (38) et Saint-Auban (04), [ChemOne](#) à Lavera (13) et Fos-sur-Mer (13).

- Productions marchandes, en 2015 : 101 000 t.

- [Air Liquide](#) à Port Jérôme (76), avec une capacité de production de 54 t/j, Gueugnon (71), avec 1,7 t/j, Waziers (59), avec 10,5 t/j, Lacq (64), 3,9 t/j, Le Pont de Claix (38), avec 22,2 t/j, Saint Fons (69), avec 32,4 t/j et Lavera (13), avec 54 t/j, principalement par reformage de gaz naturel (voir cartes dans le chapitre [oxygène](#)).

- [Linde](#) à Fos sur Mer (13), avec 1,9 t/j et Chalampé (68), avec 45 t/j, par reformage d'hydrocarbures.

- [Messer](#), à Saint-Leu-d'Esserent (60).

- Exportations : 1 614 t à 76 % vers l'Allemagne, 10 % la Belgique, 10 % l'Italie.

- Importations : 6 786 t à 88 % de Belgique, 7 % d'Allemagne.

## **UTILISATIONS :**

### **Secteurs d'utilisation :**

	Monde (2013)	Union européenne (2006)	France (2008)
<a href="#">Raffinage du pétrole</a>	44 %	47 %	59 %
<a href="#">Ammoniac, engrais</a>	38 %	39 %	26 %
Chimie de base (dont méthanol)	8 %	8 %	10 %
Métallurgie	-	6 %	1 %

Source : Actualité chimique n°347, Alpea, France Stratégie

Dans le tableau ci-dessus, l'hydrogène utilisé par la sidérurgie pour sa valeur énergétique (gaz de cokerie, gaz de haut fourneaux) n'est pas pris en compte. Pour la France sa prise en compte donne les valeurs suivantes : raffinage : 51 %, ammoniac : 26 %, sidérurgie : 14 %, chimie : 8 %, métallurgie : 1 %.

La principale application est la pétrochimie puisque cette application, anciennement excédentaire en hydrogène est maintenant déficitaire en hydrogène à cause des réglementations environnementales qui nécessitent de pousser plus loin la désulfuration des produits raffinés.

### **Consommations :**

- Synthèse de  $\text{NH}_3$  : 1 975  $\text{m}^3/\text{t}$   $\text{NH}_3$ .

- [Synthèse du méthanol](#) : 1 500  $\text{m}^3/\text{t}$   $\text{CH}_3\text{OH}$ . Ce secteur a consommé, en 2011, 6 millions de t d'hydrogène.

- Fabrication du [peroxyde d'hydrogène](#) : 735  $\text{m}^3/\text{t}$  de  $\text{H}_2\text{O}_2$ .

- Hydrocraquage : 300  $\text{m}^3/\text{t}$  de produit.

### **Utilisations diverses :**

- Principale, synthèse de l'ammoniac utilisé principalement dans l'industrie des engrais : voir les chapitres consacrés à l'[ammoniac](#) et aux [engrais](#). En 1989, les pays producteurs d'hydrocarbures ([pétrole](#), [gaz naturel](#)), donc de matières premières pour la fabrication du dihydrogène, assuraient 72 % de la production mondiale d'[urée](#), 48 % de celle du [méthanol](#), 47 % de celle de l'ammoniac. La consommation mondiale de dihydrogène dans ce secteur est de plus de 20 millions de t/an.

- [Méthanol](#) : voir ce chapitre.



- Hydrodésulfuration des coupes pétrolières afin d'éliminer le [soufre](#) : réalisée sous 40 bar, entre 330 et 400°C avec comme catalyseurs des sulfures de [Mo](#) et [Co](#). Les sociétés pétrolières qui, en général, produisent elles-mêmes le dihydrogène qu'elles consomment, font appel de plus en plus à un approvisionnement par les producteurs de gaz industriels. Par exemple, aux États-Unis, Air Products et Praxair alimentent, dans la région de Houston, des raffineries de pétrole par pipeline.

- [Industrie du verre](#) : protection contre l'oxydation du bain d'[étain](#) fondu utilisé pour produire le verre plat : [verre flotté](#) (float).

- Gaz pour respiration sous-marine : 49 % H<sub>2</sub> - 50,2 % [He](#) - 0,8 % [O<sub>2</sub>](#) utilisé par la Comex, en 1988, pour établir le record de plongée sous-marine à 520 m. En novembre 1992, le record a été porté à 701 m à l'aide d'un mélange gazeux aux proportions légèrement modifiées.

- [Sidérurgie](#) : recuit des bobines de tôles minces.

- Hydrogénation des huiles insaturées pour produire la margarine.

- Atmosphères non oxydantes pour fritter des poudres métalliques ([W...](#)), les pastilles de combustible nucléaire.

- Refroidissement des paliers d'alternateurs (d'une puissance supérieure à 150 MW) dans toutes les centrales électriques du monde. C'est actuellement un des plus gros marchés de vente d'électrolyseurs dans le monde.

- Source d'énergie non polluante (production d'eau en présence de O<sub>2</sub> de l'air) et de haute densité énergétique : 121 kJ/g (50,3 kJ/g pour le méthane) utilisée en propulsion spatiale par la [Snecma](#) (groupe [Safran](#)) et [Arianespace](#). Ariane 5 emporte 162 t de dioxygène liquide et 28 t de dihydrogène liquide pour l'alimentation de son moteur cryogénique.

De nombreuses recherches sont en cours pour utiliser le dihydrogène comme "vecteur énergétique" dans les piles à combustible, destinées, en particulier, aux véhicules de transport. Au 31 mars 2015, dans le monde il y a 231 stations de fourniture de dihydrogène pour véhicules dont 51 aux États-Unis, principalement en Californie, 48 au Japon, 37 en Allemagne, 15 en Corée du Sud, 11 au Royaume Uni, 10 au Danemark, 9 au Canada..., 1 en France, à Saint-Lô (50).

La production d'énergie par des sources renouvelables comme l'éolien et le solaire est intermittente. Le stockage de l'énergie superflue est actuellement, réalisé à 99 % par pompage de l'eau de barrage, avec, en 2012 dans le monde, une puissance installée de 128 GW. Des études sont en cours afin d'utiliser l'électricité excédentaire pour produire du dihydrogène par électrolyse.

Par exemple, une plateforme expérimentale [Myrte](#) (Mission hydrogène renouvelable pour l'intégration au réseau électrique) fonctionne en Corse, à Ajaccio, sur le site de l'Université de Corse à Vignola. Elle est constituée d'une centrale photovoltaïque de 560 kWc et d'une chaîne hydrogène comprenant un électrolyseur de 10 m<sup>3</sup>/h, des cuves de stockage du dihydrogène de 1 400 m<sup>3</sup> et du dioxygène de 700 m<sup>3</sup> et une pile à combustible de 100 kW.