

Comment l'hydrogène peut contribuer à la mutation énergétique

JBx 10/12/2020

L'hydrogène, un élément abondant, inépuisable sous forme moléculaire

L'hydrogène atomique H est très abondant dans l'Univers. Sur Terre, il n'est présent que sous forme moléculaire, lié en général à d'autres atomes, comme l'eau (H₂O) qui recouvre 70 % de la surface de notre planète où les hydrocarbures. Il se trouve aussi dans les émanations des volcans sous forme H₂ et de méthane CH₄. Pour pouvoir être utilisé comme source d'énergie propre, il convient de l'extraire, sous forme atomique H ou moléculaire H₂.

Son pouvoir calorifique par kg est alors exceptionnel : 3 fois le pétrole ou le gaz, 7 fois le charbon, 10 fois le bois. Sa combustion ne rejette pas de CO₂. A priori, il constitue une énergie de substitution aux matières fossiles, car il est disponible en quantité pratiquement inépuisable pour les besoins terrestres.

Une énergie secondaire qui, aujourd'hui, doit être produite

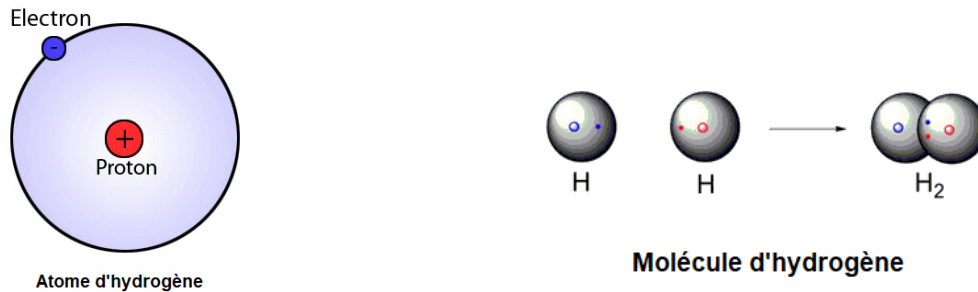
L'hydrogène issu de la croûte terrestre constitue théoriquement un énorme gisement. Il est cependant limité à quelques sources terrestres ou marines connues où l'hydrogène a été géologiquement piégé dans des couches argileuses. Nous ne sommes pas aujourd'hui en situation de le puiser dans la croûte terrestre, où il est présent en très grande quantité, issu essentiellement de la radiolyse de l'eau due à la radioactivité naturelle en profondeur. Pour l'instant, l'hydrogène ne constitue pas donc pas une énergie primaire : il doit être produit. On dit qu'il s'agit d'un *vecteur énergétique*, qui doit être produit et stocké avant d'être utilisé.

Comment le produire, le stocker, l'utiliser ? Telle est la problématique actuelle de l'hydrogène.

Les différentes formes d'hydrogène

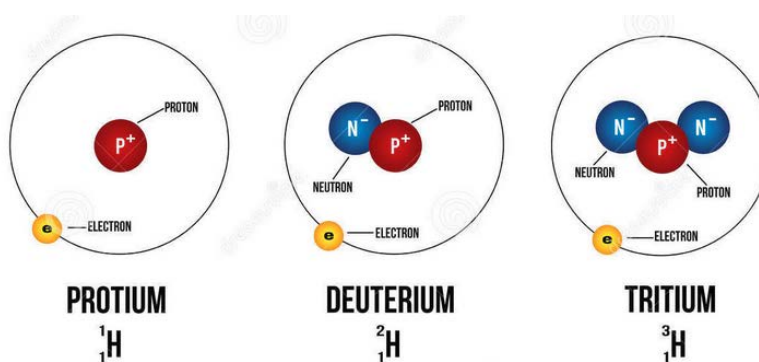
On connaît, en physique, plusieurs formes d'hydrogène. Toutes peuvent être présentes sur Terre, soit naturellement, soit produites dans les laboratoires scientifiques. **Une seule peut être aujourd'hui utilisée industriellement facilement pour l'énergie : l'hydrogène moléculaire H₂.** En effet, l'atome simple d'hydrogène est si léger qu'il n'est pas retenu par la

gravitation terrestre. Il s'échappe de l'atmosphère. Par contre, dans l'Univers (dont il représente 75 % de la masse), il existe essentiellement sous forme atomique. Sur Terre, l'atome d'hydrogène est toujours combiné, soit avec lui-même (molécule d'hydrogène H₂) ou avec d'autres atomes (eau, méthane, ...).



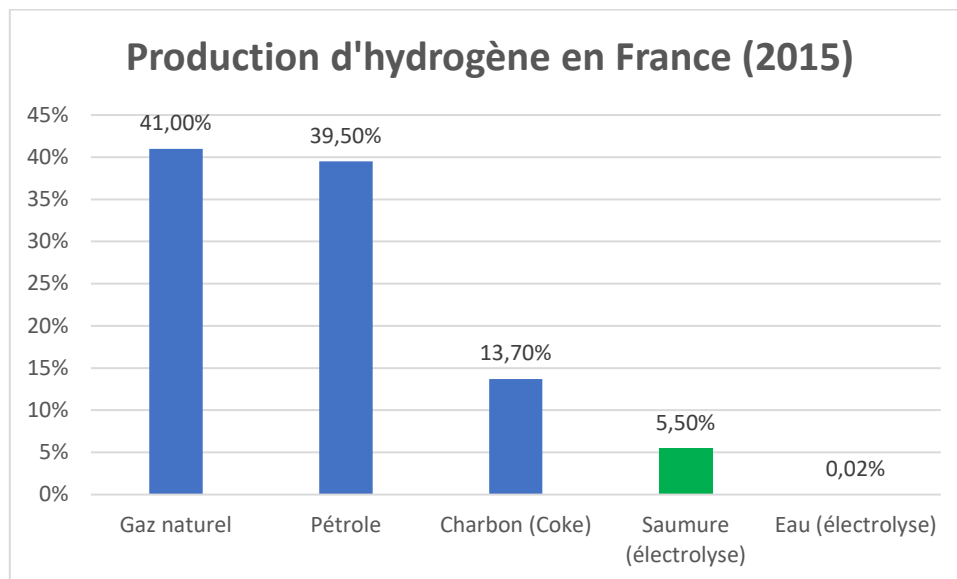
Pour être complet, il existe aussi des isotopes, qui se différencient dans leur constitution uniquement par le nombre de neutrons présents dans le noyau :

- L'isotope "de base" ^1H , nommé "protium" est l'hydrogène commun présent dans l'Univers. C'est le plus simple : un noyau composé d'un proton et d'aucun neutron et un électron gravitant autour. C'est l'atome le plus léger de tous les atomes. Il est très stable.
- L'isotope ^2H , nommé "deutérium", peu abondant à l'état naturel, est également stable. Son noyau est composé d'un proton et d'un neutron, avec toujours un électron. Il est obtenu à partir de l'électrolyse de l'eau lourde (dans laquelle l'atome de deutérium remplace l'atome d'hydrogène), l'eau lourde étant elle obtenue par la distillation afin de récupérer les quelques éléments de deutérium présents naturellement dans l'eau normale (douce ou de mer).
- L'isotope ^3H , nommé "tritium", infime à l'état naturel sur Terre, est radioactif, mais avec une période (demi-vie) courte : 12 ans. Utilisé, avec le deutérium, pour la fusion nucléaire, il est produit industriellement par le bombardement de Lithium par des neutrons.
- et ainsi de suite... Le "quadrium" ^4H , jusqu'à l'isotope ^7H , tous de plus en plus éphémères. Le problème est de les observer... Le ^7H a une durée de vie de la zepto seconde (10^{-21} s) !
- Comme l'hydrogène commun, essentiellement présent sur Terre à l'état moléculaire $^1\text{H}_2$ (appelé aussi "dihydrogène"), le deutérium existe aussi au niveau moléculaire diatomique $^2\text{H}_2$ ("dideutérium") . Comme $^1\text{H}_2$, c'est un gaz stable et liquéfiable. De même pour le tritium qui a aussi une forme moléculaire



Pour être complètement complet, l'atome d'hydrogène (et celui de tous ses isotopes) est aussi caractérisé par son spin (moment cinétique), qui bascule individuellement pour chaque atome à une échelle de quelques millions d'années. L'effet énergétique de ce basculement est extrêmement faible.

L'hydrogène aujourd'hui est produit à 95 % à partir d'énergies fossiles



Le processus industriel le plus répandu pour produire de l'hydrogène est le vaporeformage du gaz naturel qui est essentiellement composé de méthane (CH_4). À une température comprise entre 700 et 1 100 °C, la vapeur d'eau réagit avec le méthane en donnant du monoxyde de carbone et de l'hydrogène. La purification de l'hydrogène étant plus facile sous forte pression, le reformage est réalisé sous une pression de vingt atmosphères. Le mélange hydrogène/mmonoxyde de carbone est communément appelé "gaz de synthèse". Si la réaction est faite en présence d'un excès de vapeur d'eau, le monoxyde de carbone est oxydé au niveau d'oxydation supérieur, conduisant au dioxyde de carbone, ce qui augmente la production d'hydrogène. **Dans ce processus, à chaque kg de H_2 produit, 10kg de CO_2 sont dégagés.** C'est un processus condamné à terme par la transition énergétique, mais c'est de loin, aujourd'hui, le moins coûteux.

Autres procédés de fabrication de l'hydrogène

Gazéification de la biomasse

- Soit à partir de déchets aisément fermentescibles, en produisant par méthanisation ou digestion anaérobie du biogaz contenant 60% de méthane convertible en hydrogène par reformage;
- Soit à partir de déchets peu fermentescibles, essentiellement ligno-cellulosiques, en produisant de l'hydrogène par procédé thermo-chimique.

Ces procédés, qui consomment 4 fois moins d'énergie primaire que vaporeformage de gaz naturel, ont cependant le désavantage de rejeter eux aussi du CO_2 .

Dans la pratique, la gazéification à la vapeur d'eau de la biomasse génère un mélange appelé également "gaz de synthèse", constitué principalement de monoxyde de carbone et de dihydrogène, que l'on purifie ensuite pour éliminer les polluants.

Concernant le CO₂, la question est de savoir si le procédé produit plus ou moins de CO₂ que ce qui aurait été dégagé par la dégradation de la biomasse si elle n'avait pas été gazéifiée. La biomasse doit également être maîtrisée au regard de la biodiversité et de la préservation des ressources.

La photolyse

Les nouvelles pistes comme les microalgues ou les cyanobactéries sont également prometteuses. Les algues unicellulaires, du type de celles qui se multiplient dans les réservoirs d'eau stagnante, émettent directement de l'hydrogène moléculaire à partir de l'eau et de la lumière et en utilisant certaines enzymes.

L'électrolyse de l'eau

Nous ne rentrerons pas dans le détail des différentes techniques (alcaline, EM [Proton Exchange Membrane], SOEC [haute température]). Il y a même maintenant la photo-électrolyse, sans autre apport d'énergie que le rayonnement solaire.

Le rendement de l'électrolyse est de 70 % à 90 % (pour la technique SOEC), ce qui signifie que pour produire de l'hydrogène équivalent à 1 kWh, il faut dépenser entre 1,2 et 1,4 kWh d'électricité. C'est bien là le problème. L'hydrogène n'est pas une énergie primaire. Elle est produite à partir d'autres énergies.

Comment utiliser l'hydrogène ?

- En le brûlant (dans une chaudière, un moteur thermique, ...), à usage industriel ou domestique. Ce procédé ne produit aucun gaz carbonique puisqu'il n'y a pas de carbone dans le carburant.
- En produisant de l'électricité grâce à une pile à combustible qui recombine l'hydrogène H₂ et l'oxygène O₂ en produisant de l'électricité, de la chaleur et de l'eau H₂O. Le rendement des piles à hydrogène récente est de 70 %, les 30 % restants étant disponibles sous forme de chaleur. C'est nettement plus qu'un groupe électrogène (25 %).
Ainsi, pour la propulsion automobile, le rendement total "production d'hydrogène + pile à combustion", de l'ordre de 50 % est supérieur au rendement d'un moteur thermique (35 % pour l'essence et 40 % pour le diesel).
- En refabriquant du carburant hydrocarboné (!) par combinaison avec du CO₂ (*Power To Gas*). Le seul intérêt de cette utilisation est de stocker temporairement le CO₂ produit pour qu'il n'amplifie pas immédiatement l'effet de serre.

Comment stocker l'hydrogène ?

Stocker l'hydrogène n'est pas facile.

- D'une part c'est un gaz volumineux, qui nécessite donc d'être compressé. A la pression atmosphérique et à 20°C, l'hydrogène occupe un volume de 333 litres/kWh alors que, dans les mêmes conditions, l'essence occupe 0,1 litres/kWh. Pour diminuer ce grand volume encombrant et contenant relativement peu d'énergie, il faut comprimer l'hydrogène jusqu'à 700 bars, voire davantage. On pourrait aussi le liquéfier à -253°C. Ces deux opérations coûtent de l'énergie, et consomment respectivement 15% et 35% de l'énergie contenue au départ, ce qui n'est pas idéal. Les hydrures sont une solution car ils concentrent l'hydrogène.
- Deuxièmement, c'est un gaz inflammable et hautement explosif, s'il se mélange accidentellement à l'oxygène. Les hydrures métalliques (alliage de nickel, de titane, de magnésium) permettent d'absorber et désorber de l'hydrogène de manière réversible, tout en minimisant les risques. Le stockage dans les hydrures est le moyen le plus efficace pour obtenir une forte densité volumique d'énergie : le volume occupé peut se réduire à 0,25 litre/kWh dans les conditions normales de température et de pression. Ceci se fait par contre au détriment du poids, puisqu'au bilan il faut ajouter le poids du matériau dans lequel l'hydrogène s'insère. La réaction d'absorption de l'hydrogène dans le matériau est *exothermique* (dégagement de chaleur). La réaction de désorption (libération de l'hydrogène) est quant à elle *endothermique* (apport de chaleur nécessaire).
- Enfin, c'est un gaz difficile à garder. La petite taille de l'atome rend perméable les enceintes métalliques. Au fur et à mesure du stockage, les atomes traversent l'enveloppe et s'évaporent dans la nature. La forte pression nécessaire pour réduire le volume favorise le phénomène. Là aussi, les hydrures agissent comme stabilisateurs et minimisent, voire éliminent la perte.

Le transport de l'hydrogène

- Par des gazoducs. L'hydrogène fragilise cependant l'acier et les soudures utilisées dans la fabrication des gazoducs classiques. D'autre part, les technologies de compression doivent être plus performantes, ce qui entraîne un surcoût. L'une des solutions pour utiliser les gazoducs existants est de mélanger l'hydrogène (20 %) avec du gaz naturel (80 %).
- Par la route, rail ou bateau. Le volume important de l'hydrogène impose une forte compression. Les réservoirs d'acier classiques permettent d'aller jusqu'à 250 bars. Les réservoirs de type composite vont jusqu'à 700 bars.
- Sous forme liquide. L'hydrogène se liquéfie lorsqu'on le refroidit à une température inférieure de -252,87°C. Ainsi, à -252,87°C et à 1,013 bar, l'hydrogène liquide possède une masse volumique de près de 71 kg/m³. À cette pression, on peut stocker 5 kg d'hydrogène dans un réservoir de 75 litres.

L'utilisation de l'hydrogène dans les véhicules

Il y a deux manières d'utiliser l'hydrogène dans des véhicules.

- Soit directement dans un moteur à explosion conventionnel. Le rendement sera alors le même que pour un véhicule à essence (35 %). L'hydrogène alimente alors un moteur thermique, mais sans produire de CO₂ ;
- Soit en transformant l'hydrogène en électricité dans une pile à combustible pour alimenter un moteur électrique. La voiture est alors *électrique*. Le rendement est bien meilleur : 60 à 65 % (70% pour la pile et 90 % pour le moteur)

Les pertes de rendement se situent dans les moteurs (pas plus que pour des moteurs classiques thermiques ou électriques) et dans le stockage. En effet,

- Soit on compresse jusqu'à 700 bars en utilisant 15% de l'énergie stockée ;
- Soit on liquéfie à -253°C en utilisant au moins 35% de l'énergie stockée. Il s'agit d'un stockage *cryogénique*. A moins de réservoirs très isolés, type "thermos", l'évaporation est cependant importante (jusqu'à quelques pourcents par jour...)
- Soit on utilise des hydrures qui rajoutent un surpoids.

La construction d'un réseau de stations-services est relativement aisée. Elle ne diffère guère de celle d'un réseau de carburants hydrocarburés.

L'hydrogène peut-il constituer une solution pour stocker l'électricité à grande échelle ?

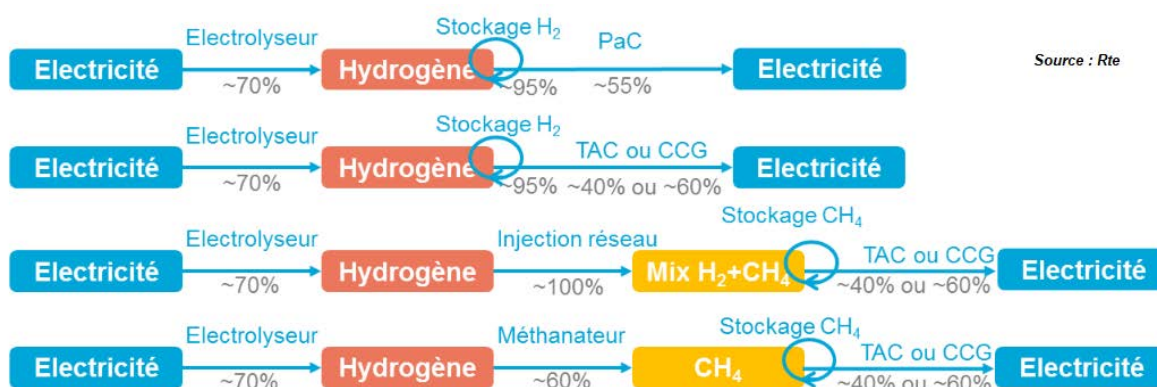
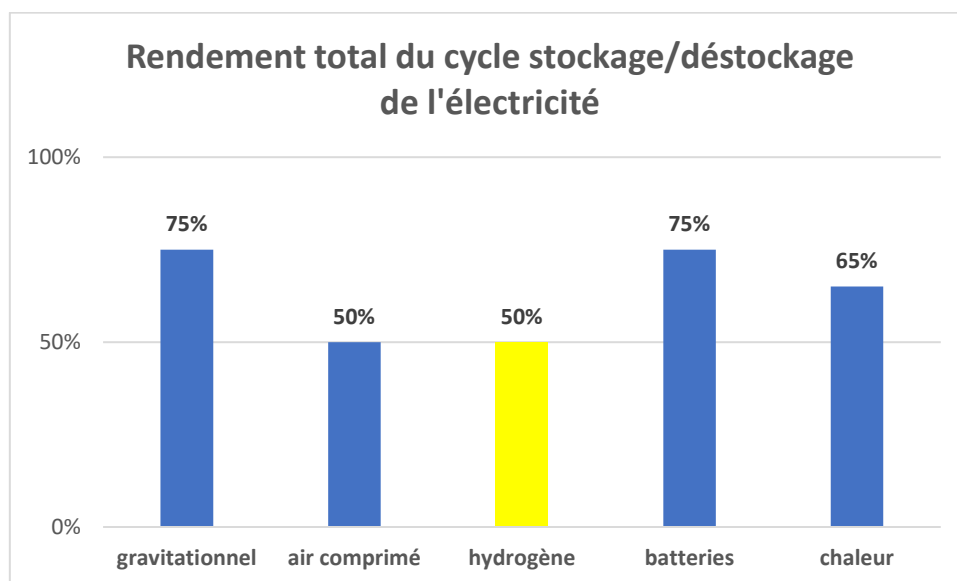
Si l'on veut vraiment décarboner, et donc s'affranchir des énergies fossiles comme le pétrole, la gaz et le charbon, l'éventail des énergies primaires disponibles est simple :

- l'éolien
- le solaire
- l'hydraulique fluvial ou marin
- le nucléaire (fission ou fusion)
- la biomasse
- la géothermie (volcanique, de surface ou profonde)

Ni l'éolien, ni le solaire, ni le nucléaire son vraiment souples. L'éolien et le solaire produisent d'une manière intermittente de l'énergie. Le nucléaire la produit d'une manière continue. Les besoins de consommations varient eux, au contraire, en fonction des cycles diurnes et saisonniers.

L'hydrogène pourrait donc, constituer, en quelque sorte, une *énergie tertiaire*, susceptible de réguler la production d'électricité, *énergie secondaire*. Le rendement total peut atteindre 50 %, inférieur au stockage gravitationnel des barrages (75 %) dont l'extension des infrastructures est limitée, inférieur au cycle charge-décharge des batteries (75%).

L'intérêt principal de la solution *hydrogène* réside dans le fait qu'on dispose déjà des infrastructures de stockage du méthane, à savoir le réseau actuel de stockage et distribution du gaz naturel.



Les "plans hydrogène" annoncés

► En 2015, la Loi relative à la transition énergétique pour la croissance verte a fixé comme objectif d'atteindre en 2030 un taux de 32 % d'énergies renouvelables dans la consommation finale d'énergie et de 40 % d'énergies renouvelables dans la production d'électricité. L'hydrogène y apparaît pour la première fois..

► En 2018, sous l'impulsion de Nicolas Hulot, la France a été l'un des premiers pays à déployer un plan hydrogène. Les objectifs de l'Etat pour cette nouvelle filière hydrogène se déclinaient en plusieurs actions :

- le recours au Programme d'investissements d'avenir (PIA), via un soutien à la mise en œuvre de démonstrateurs et la prise de participation dans des entreprises à fort potentiel ;
- le soutien à la recherche publique via l'ANR ;
- l'accompagnement par Bpifrance de startup ou PME dans leurs projets d'innovation et de développement technologiques;

- le soutien au déploiement de la mobilité hydrogène via l'apport de 80 M€ par l'Ademe;
- le positionnement de la Banque des Territoires via le soutien aux projets de déploiements de l'hydrogène portés par des collectivités.

► Le 8 septembre 2020, le gouvernement a présenté la stratégie hydrogène de la France. Dotée d'une enveloppe de 2 milliards d'euros dans le cadre du plan économique France Relance 2020-2022, la Stratégie pour le développement de l'hydrogène décarboné fixe une trajectoire qui court jusqu'en 2030 avec au total 7 milliards d'euros de soutien public. Quatre priorités ont été définies :

- décarboner le secteur industriel,
- faire émerger une filière française de l'électrolyse (avec un objectif de 6,5 GW d'électrolyseurs installés en 2030),
- développer les mobilités propres en visant le transport lourd,
- soutenir la recherche et l'innovation.

► Le 8 Juillet 2020, la Commission Européenne a annoncé son plan stratégique de déploiement de l'hydrogène :

- un premier objectif de capacité de production de 6 GW pour 1 million de tonnes d'hydrogène « vert », d'ici 2024, puis 40 GW pour 10 millions de tonnes en 2030.
- des investissements massifs pouvant atteindre 470 milliards d'euros cumulés devront permettre le développement à grande échelle de l'hydrogène vert d'ici 2050.
- l'objectif de porter l'hydrogène entre 12 et 14% du mix énergétique, dont la part est aujourd'hui infime.
- l'Alliance Européenne pour un Hydrogène Propre (ECH2A), qui réunira des responsables de la Commission, des représentants et dirigeants de la filière, sera mise en place pour assurer le pilotage de cette stratégie et le développement du portefeuille de projets dans la durée.

► La Région PACA, s'appuyant sur le pôle de compétitivité CapEnergies s'est lancée en 2018 dans la structuration d'une filière *hydrogène*. Une quinzaine de projets sont en cours.

- à Fos, le démonstrateur « Jupiter 1000 » transforme le surplus électrique en gaz naturel et permet d'injecter 200 m³ d'hydrogène par heure dans des gazoducs existants avec un taux de 1 à 2 % d'hydrogène dans du gaz de synthèse.
- le projet Vasco 2, également à Fos sur Mer, valorise les fumées industrielles de façon biologique pour produire des microalgues.
- la jeune société Hysilabs (hysilabs.com) pionnière dans le stockage solide de l'hydrogène par des hydrures.
- le futur bâtiment de l'Institut biosciences et biotechnologies à Cadarache, pour la recherche sur les microalgues

