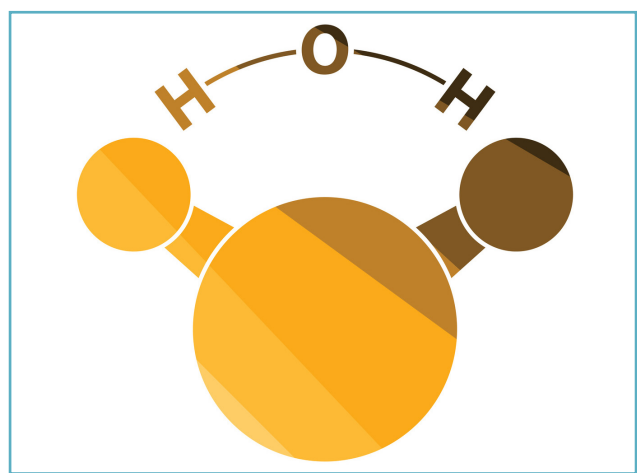




Note de conjoncture

L'HYDROGÈNE DANS LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE



L'hydrogène est le plus simple des gaz. Il est aussi l'élément chimique le plus léger et le plus répandu dans l'univers et sur terre (c'est le H de H2O...). La molécule de dihydrogène¹ (H2) peut être utilisée soit comme actuellement dans des procédés chimiques, soit servir de vecteur énergétique en étant brûlée ou utilisée dans une pile à combustible.

Les efforts de recherche considérables engagés ces dernières décennies, les améliorations de procédés qui en découlent et les qualités spécifiques de ce vecteur (l'hydrogène peut être stocké) le mettent au centre de plusieurs projets. Alors qu'il pourrait être amené à jouer un rôle décisif dans la décarbonation de l'économie, l'OIE fait le point sur la place de l'hydrogène dans le cadre de la transition énergétique.

1. Conformément à l'usage commun, et sauf mention contraire le dihydrogène sera dénommé hydrogène dans le reste du document.



Points clés

- L'hydrogène est à la fois un vecteur énergétique et un produit chimique. Il est actuellement principalement utilisé dans le secteur de l'industrie.
- La synthèse d'hydrogène repose aujourd'hui à 96% sur des process fortement émetteurs de CO₂.
- La décarbonation de l'hydrogène peut se faire grâce à la mise en place d'électrolyseurs. Il pourrait alors être utile pour décarboner l'hydrogène utilisé dans l'industrie, pour certains usages de la mobilité ou dans une moindre mesure le bâtiment.
- Les études menées par RTE et l'ADEME montrent que les conditions du marché de l'énergie ne pourront pas avant 2035 permettre le déploiement sans subvention de power to gas (P2G).
- La place économique des électrolyseurs pour la synthèse d'hydrogène n'est possible qu'avec une fiscalité carbone importante

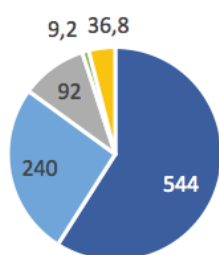


LA FILIÈRE HYDROGÈNE D'AUJOURD'HUI

Les usages actuels de l'hydrogène

L'hydrogène est très utilisé dans le cadre de l'industrie traditionnelle. Comme il est un gaz très réactif, il est largement utilisé dans des applications industrielles.

Quantité consommée (kt/an)
Total 922 000 t/an



- Raffinage pétrolier
- Industrie chimique (dont méthanol)
- Divers
- Amoniac et engrais
- Métallurgie

Source : Alphéa Hydrogène, actualité chimique n°347, 2014

Dans le domaine de la chimie industrielle, outre le raffinage pétrolier qui est l'utilisation première de l'hydrogène, il peut être associé à de l'azote pour fabriquer de l'ammoniac, une base des engrais ou entrer dans la composition des fibres textiles comme le nylon, des mousses polyuréthanes et de diverses matières plastiques.

Par exemple, en électronique, l'hydrogène sert de gaz support pour transporter des gaz actifs dans la fabrication de composants électroniques. Il assure en outre une excellente protection contre les impuretés et l'oxydation. Il est aussi indispensable à la fabrication du verre plat utilisé notamment pour les écrans plats.

L'hydrogène est employé en métallurgie pour les atmosphères de traitement thermique qui permettent de produire des pièces mécaniques (frittage de pièces moulées) ou de

modifier leurs propriétés (recuit de pièces métalliques).

Enfin, l'hydrogène sert de fluide caloporteur pour le refroidissement de machines tournantes telles que les alternateurs de fortes puissances.

Comme on peut le constater, l'hydrogène occupe une place de choix dans les procédés industriels actuels. Mais une partie des usages actuels et futurs de l'hydrogène concerne plus directement les usages énergétiques.

Une production actuelle d'hydrogène encore très carbonée

La molécule d'hydrogène H₂ est peu présente à l'état naturel sur terre. Néanmoins, de l'hydrogène peut s'échapper le long de fissures de formations géologiques superficielles de roches calcaire ou de granit. Ainsi au Mali, au nord de Bamako, émane du sol un flux permanent d'hydrogène exploité par la compagnie Petroma qui a construit une petite station de production d'électricité avec une turbine à hydrogène, de quoi alimenter le village voisin.

Un grand nombre de procédés permettent une synthèse simple de la molécule H₂ sur Terre. Certains sont électrochimiques (de l'hydrogène est par exemple relâché lors de la charge de certaines batteries électrochimiques), d'autres peuvent être biologiques (certains microorganismes comme les cyanobactéries peuvent être utilisés pour en synthétiser). Mais en pratique, l'immense majorité de l'hydrogène actuellement utilisé dans le monde est issue du craquage d'hydrocarbures essentiellement du méthane CH₄ selon une série de réactions sous une pression de 20 à 30 bars qui se déroule entre 700 et 1100°C :



Le CO est ensuite récupéré et lui aussi associé à l'eau afin de synthétiser à nouveau de l'hydrogène (réaction se déroulant à 130°C) selon la réaction de réduction de l'eau par le CO :



D'autres hydrocarbures que le méthane peuvent être utilisés, mais les rendements sont moins intéressants. Ces réactions chimiques nécessitent beaucoup d'énergie et émettent du CO₂. L'énergie nécessaire provient d'une combustion d'une part du méthane introduit. L'intérêt de cette méthode de synthèse repose sur son coût et offre la possibilité technique de récupération du CO₂ émis car concentré dans un réacteur chimique.

En dépit de leur impact climatique quand le CO₂ est relâché dans l'atmosphère, ces procédés restent ultra majoritaires dans la génération d'hydrogène. Les sources d'hydrogène se répartissent comme suit dans le monde 49 % de gaz naturel ; 29 % d'hydrocarbures liquides ; 18 % de charbon².

Au total ce sont 60 millions de tonnes d'hydrogène³ qui sont produits chaque année dans le monde :

- 11 Mt le sont aux Etats-Unis,
- 8,8 Mt le sont en Europe,
- 922 000 t le sont en France.



LES NOUVEAUX USAGES DE L'HYDROGÈNE

Utilisation d'hydrogène pur sur des sites isolés

Dans certains cas, l'alimentation électrique via le réseau n'est pas possible. C'est par exemple le cas de refuges de montagne (refuge du Palet dans les Alpes françaises), de territoires isolés (Cf encadré), ou tout simplement sur des chantiers éloignés de toute source électrique (routes, champs, infrastructures). Au-delà de ces cas courants, lors de catastrophes naturelles (séismes, inondations), ou de guerre, il peut être difficile d'avoir accès à de l'électricité pour alimenter les éléments essentiels aux secours.

De l'hydrogène au cœur de site de Mafate (Ile de la Réunion)

Le cirque de Mafate est l'un des 3 cirques de l'île de la Réunion. Particulièrement préservé, il n'est accessible qu'à pied ou en hélicoptère. Alimenté à 100% par de l'énergie solaire, un mini réseau électrique a été installé avec un stockage d'hydrogène permettant d'alimenter tout au long de l'année les bâtiments publics. La puissance utile de la station installée est de 5 kW garantissant une autonomie de 5 jours sans ensoleillement.

Dans tous ces cas, l'hydrogène est utilisé comme réserve d'énergie pour une alimentation électrique. Les techniciens utilisent dans ce cas une pile à combustible pour la génération d'une électricité de qualité disponible à toutes heures et quelle que soit la météo.

La pile à combustible est un dispositif reposant sur une membrane permettant la circulation et la rencontre des ions H⁺ et O²⁻ dans une réaction contrôlée et exothermique. Au final, le dispositif libère de l'eau, de la chaleur et un courant électrique qui peut ensuite être utilisé par un moteur électrique par exemple.

Dans les faits, la pile à combustible vient remplacer un groupe électrogène classique qui fonctionne souvent à partir de gasoil ou d'essence. L'hydrogène offre alors une solution silencieuse, ne rejetant pas de particules, et respectueuse de l'environnement s'il est produit de façon décarbonée.

De l'hydrogène pur pour des transports en transition

La mobilité est l'usage de l'hydrogène le plus mis en avant par la sphère publique dans le cadre de la transition énergétique. Le principe de fonctionnement est identique quel que soit le véhicule. L'hydrogène disponible dans une station de recharge est injecté dans un réservoir (sous pressions ou dans une matrice) à une station de recharge, avant d'être utilisé par le véhicule directement dans un moteur à combustion interne ou via une pile à combustible.

Dans le cas du moteur à combustion interne, le principe est le même que pour les moteurs à essence. Plusieurs constructeurs ont tenté d'initier des séries commerciales de voitures à hydrogène à combustion interne (BMW, Chevrolet, Mazda par exemple). Ces modèles n'ont pas connu le succès commercial escompté, car moins compétitifs que les modèles essence ou diesel. Ils ont tous été arrêtés au bout de quelques années.

De manière générale, les constructeurs considèrent maintenant que les usages prometteurs de l'hydrogène reposent sur le principe d'une pile à combustible alimentant un moteur électrique. C'est pourquoi les véhicules à hydrogène sont bien souvent considérés comme entrant dans la catégorie des véhicules électriques. A l'usage, tout comme les véhicules électriques à batterie, les véhicules utilisant une pile à combustible ne libèrent pas de particules et sont silencieux, ce qui leur confère un avantage important face aux moteurs traditionnels. Les piles à combustible sont adaptées aux contraintes de qualité de l'air et de réduction des nuisances sonores.

L'usage de l'hydrogène dans la mobilité suppose toutefois de disposer d'une infrastructure de recharge opérationnelle et de dispositifs de stockage de l'hydrogène de capacité suffisante, robustes aux risques spécifiques en cas d'accidents qui peuvent survenir dans le cadre de la mobilité. Ces deux contraintes expliquent que les situations d'usage apparues en premier pour la mobilité hydrogène concernent des flottes de véhicules professionnels en site propre.

On peut noter par exemple que les aéroports de Montréal et de Vancouver se sont ainsi dotés de véhicules alimentés à l'hydrogène (navettes, véhicules de transport de passagers et voitures utilitaires). Une initiative prometteuse vient également d'être prise en Allemagne. Fin novembre 2017, la région allemande de Basse-Saxe a passé commande à Alstom de 14 nouveaux trains qui fonctionneront à l'hydrogène. Dans ce cadre, l'hydrogène, dès lors qu'il est produit par électrolyse grâce à une électricité peu ou pas carbonée, offre une alternative au diesel fort émetteur de CO₂ et de particules pour les lignes non électrifiées.

Une généralisation au-delà de la mobilité de l'usage de l'hydrogène pur nécessiterait la création de réseaux physiques dédiés et donc des investissements très importants. Toutefois afin de pallier cette problématique, l'hydrogène peut également être utilisé en mélange avec du gaz traditionnel.

Utilisation directe par injection dans les réseaux de gaz existants (l'hythane)

L'hydrogène peut être utilisé pour les mêmes usages énergétiques que le méthane (gaz naturel traditionnel). Le mélange hydrogène/méthane est aussi appelé hythane. Ainsi, l'hythane peut être brûlé dans les chaudières, dans les centrales électriques alimentées au gaz... Dans ce cas, l'hydrogène est acheminé via les réseaux de gaz. La majorité des réseaux de gaz traditionnel peuvent supporter la présence d'hydrogène jusqu'à une concentration maximale de 20% en volume (soit 6 à 7 % en énergie). Des limitations ponctuelles de concentration peuvent être imposées à 10% d'hydrogène en volume (soit 3% en énergie).

Cet usage de l'hydrogène est d'ores et déjà testé en condition réelle dans le cadre du projet GRHYD. Ce projet consiste à injecter dans le réseau de gaz de ville de la communauté urbaine de Dunkerque de l'hydrogène. Les habitants de la commune voisine, Capelle la Grande, utilisent ce mélange de manière tout à fait classique.

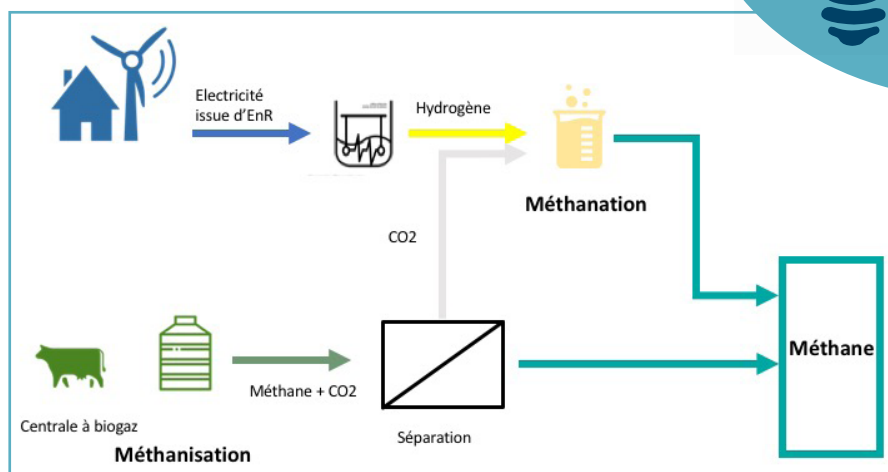


Utilisation de l'hydrogène pour la décarbonation du gaz

Le gaz naturel est un combustible fossile largement utilisé pour le chauffage des logements (44% des résidences principales françaises sont chauffées au gaz naturel).

Le procédé de méthanisation permet de générer du méthane (CH₄) à partir de biomasse. A ce titre, le méthane ainsi généré peut être considéré comme renouvelable si la gestion initiale de la biomasse est durable. Le processus de méthanisation relâche également du CO₂. (55% de méthane, et 45% de CO₂ sortent du méthaniseur).

Pour limiter les émissions de CO₂ du processus, de l'hydrogène est utilisée dans un processus de méthanation.



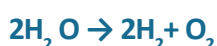
Le CO₂ est combiné avec de l'hydrogène selon la réaction suivante :



Le méthane de synthèse alors créé pourra être utilisé comme du méthane issu de la méthanisation, et participe à la décarbonation du gaz naturel.

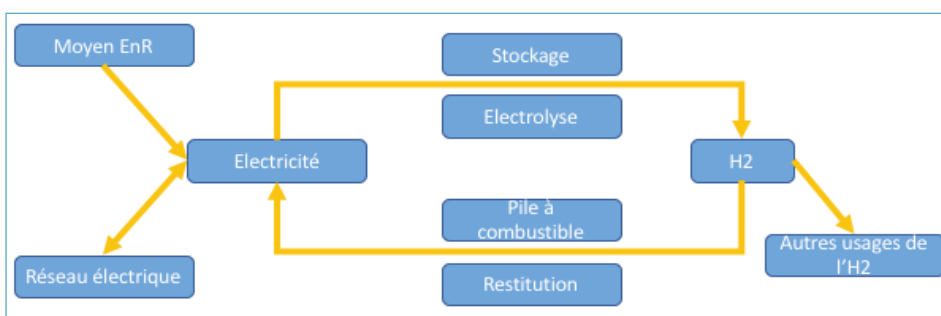
PRODUIRE DE L'HYDROGENE DECARBONE

La méthode de synthèse d'hydrogène qui focalise toutes les attentions dans le cadre de la transition énergétique est l'électrolyse de l'eau (technologie dite du power to gas, ou P2G). En faisant passer un courant électrique dans de l'eau, la molécule d'eau (H₂O) se sépare en deux molécules d'oxygène et d'hydrogène selon la réaction suivante :



L'enjeu technologique dans le domaine de l'électrolyse réside non seulement dans la baisse des coûts de production associés, mais aussi dans la capacité à obtenir des électrolyseurs souples d'usage et en capacité de varier sa cadence de production d'hydrogène sans dommage. En effet, lorsque l'électricité est issue d'un moyen de production non interconnecté au réseau et dont on ne maîtrise pas la charge (du fait d'aléas météorologiques par exemple), la production d'hydrogène est irrégulière.

Comme la réaction d'électrolyse utilise de l'électricité pouvant être récupérée en partie lors d'une réaction de l'hydrogène dans une pile à combustible, on a ainsi un stockage d'énergie électrique selon le processus suivant :



Lorsque l'installation est mise en œuvre en site isolé (comme dans le cirque de Mafate par exemple). Le couple électrolyseur/pile à combustible se révèle être très utile pour ajuster une production fatale d'électricité aux variations de la demande électrique. L'exploitant fera un arbitrage technico-économique entre d'autres éventuels usages de l'hydrogène et la génération d'électricité en retour via la pile à combustible.

Dans le cadre d'un site connecté au réseau électrique, la stratégie sera différente et repose sur un double arbitrage :

D'une part, l'usage de l'hydrogène dépend de la valorisation possible de l'électricité issue de la pile à combustible, autant que de la valorisation de l'hydrogène dans le cadre d'autres usages (production de méthane de synthèse, charge de véhicule à hydrogène, injection dans le réseau de gaz, utilisation dans le domaine industriel...).

D'autre part, l'électricité alimentant l'électrolyseur fait l'objet d'un arbitrage technico économique entre la production EnR et l'électricité accessible via le réseau électrique (qui peut être renouvelable).

Ainsi, si l'écart entre les maxima et les minima des prix de l'électricité disponible (sur les marchés ou via une production locale) est important suffisamment souvent dans l'année, le dispositif cherchera sa rémunération dans un fonctionnement Electricité -> H₂ -> Electricité. On notera par ailleurs qu'une fois synthétisé, l'hydrogène est stable et peut être stocké sur des périodes de plusieurs mois (ce qui est difficilement possible avec des moyens de stockage de type batterie). Si le coût de production de l'hydrogène dans les autres usages est plus faible que le prix du méthane alors le système cherchera sa rémunération dans le sens Electricité -> H₂ -> Autres usages.



L'HYDROGENE : PIVOT DE LA TRANSITION ENERGETIQUE ?

L'hydrogène possède des propriétés physiques et chimiques qui le placent au centre de plusieurs questions posées par la transition énergétique :

Les progrès technologiques rendent opportun d'étudier un essor de la mobilité hydrogène et la généralisation du stockage de l'hydrogène pour la mobilité, ou en local, les rendements des piles à combustible affichent maintenant des valeurs de l'ordre de 70% et couvrent une large plage de puissance autorisant des applications variées.

Mais l'usage de l'hydrogène se heurte encore à des limites de plusieurs ordres. La première est d'abord d'ordre technique, car même si le stockage d'hydrogène est un processus aujourd'hui connu, sa maîtrise par le grand public dans toutes les situations est à mettre en oeuvre. Ces questions de sécurité restent un obstacle à l'acceptabilité de l'hydrogène nécessaire à son déploiement dans le domaine de la mobilité.

Par ailleurs, il est probable que l'obstacle principal au déploiement de l'hydrogène à grande échelle dans le cadre de la transition énergétique se situe dans le champ économique. L'hydrogène ne peut trouver sa place économique que si :

- Le prix du méthane fossile augmente suffisamment pour rendre l'hydrogène issu de l'électrolyse ou le méthane de synthèse concurrentiels dans les usages énergétiques ou industriels.

- La différence entre les maxima et minima de prix observés sur les marchés de l'électricité (différence peak/off peak) augmente et les solutions hydrogène deviennent concurrentielles par rapport aux autres technologies de stockage de l'électricité (notamment les STEP et les batteries électrochimiques).

Seulement, la différence peak/off peak baisse régulièrement ces dernières années. Le déploiement des EnR variables est un facteur favorable à un retour à une différence plus importante (révélant au passage la nécessité de déploiement de solution de stockage). Mais selon les prévisions de RTE dans son bilan prévisionnel édité en 2017, le besoin en flexibilité n'augmentera que lentement. Le gestionnaire du réseau de transport n'identifie ainsi pas de besoin de stockage long terme (intersaisonnier) avant 2035. RTE et ADEME⁴ concluent à la difficulté pour la filière à trouver sa place économique sur le seul segment de stockage/déstockage d'électricité.

Les outils de production d'hydrogène doivent donc chercher leur rémunération en aval, par la valorisation de l'hydrogène ou du méthane de synthèse. Ainsi, hors la mise en place d'aides spécifiques qui ne peuvent s'entendre que dans un cadre temporaire de soutien à la recherche ou à l'essor d'une filière d'intérêt stratégique, seul un renchérissement du méthane traditionnel (via par exemple une hausse de la fiscalité carbone), conduisant à une présence

économique favorable à l'électrolyse pour la production d'une part, et à la consommation de méthane de synthèse d'autre part offrira une place suffisante à la filière hydrogène qui coïncidera avec la préservation du climat. L'étude menée par l'ADEME montre que la rentabilité des investissements ne peut être trouvée avec un prix du CO₂ inférieur à 100€/tCO₂.

Ainsi, l'hydrogène pourrait paraître comme un vecteur pivot pour la transition énergétique. Son intérêt dans la lutte contre le réchauffement climatique ne repose pas tant dans ses usages finaux, mais dans la viabilité économique de sa production à partir d'une électricité décarbonée via un électrolyseur. Alors, une politique climatique efficace serait de soutenir la substitution de l'hydrogène issu de moyens fossiles par de l'hydrogène renouvelable dans les usages industriels, et de déployer les moyens classiques (efficacité énergétique, maintien d'un mix décarboné dans la production d'électricité, augmentation du prix du carbone) pour décarboner les autres usages.