

Stockage par hydrogène : Principe de fonctionnement, projets en cours et perspectives

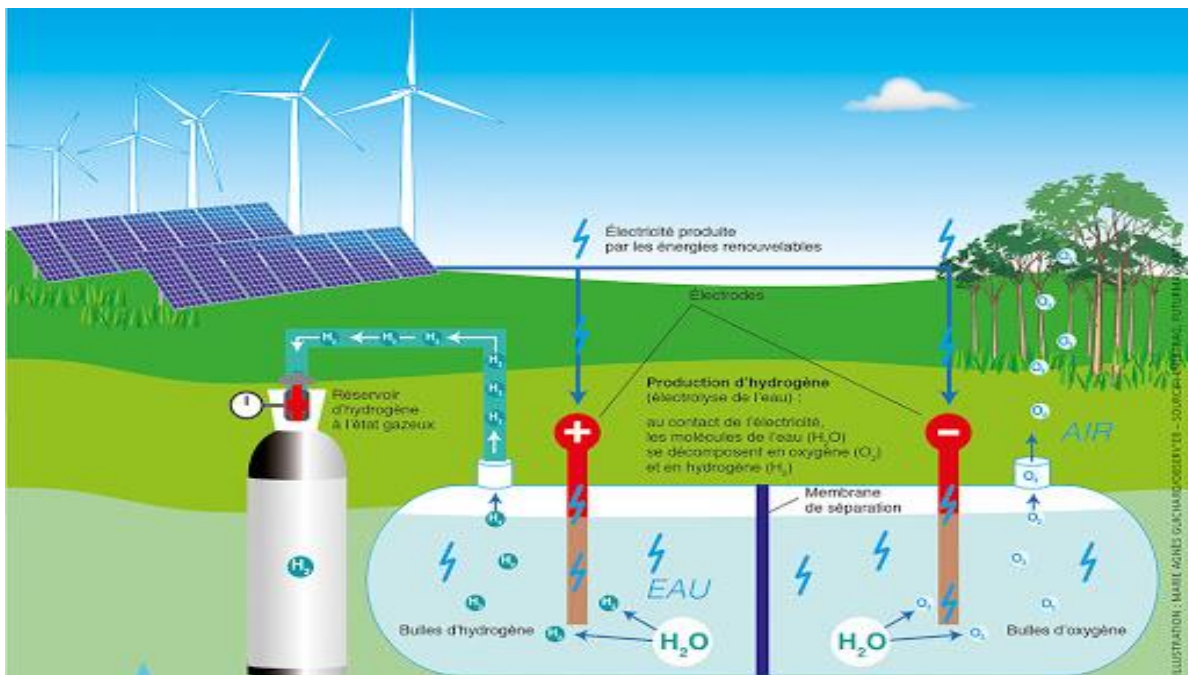
Raphaël MANECHEZ

Pierre-Louis UDIN

Thomas ESNEU

Travail encadré par Prof. Dhaker ABBES

Novembre 2019



I. Introduction

L'hydrogène est actuellement utilisé en raison de ses propriétés chimiques dans l'industrie pétrolière et dans l'industrie chimique. Cette molécule présente cependant un intérêt énergétique majeur qui n'est pas exploité aujourd'hui. Il peut être utilisé pour la production d'énergie sur le réseau, ou dans les transports, et c'est une solution pour le stockage de l'énergie, notamment de l'électricité, ce qui sera le défi des systèmes énergétiques du 21e siècle. L'hydrogène comme vecteur énergétique représente ainsi un enjeu scientifique, environnemental et économique. Grâce aux progrès de la technologie de l'électrolyse, il peut être produit de façon décarboné, économique et contribue aux objectifs que la France s'est fixée en matière de développement des énergies renouvelables, de réduction des émissions de gaz à effet de serre et des polluants et de réduction des consommations d'énergie fossile.

Dès la fin du XIXe siècle, Jules Verne imaginait l'utilisation de l'hydrogène comme vecteur d'énergie aux caractéristiques idéales. Dans un dialogue de l'Île mystérieuse [1], l'ingénieur Cyrus Smith décrit à son compagnon d'aventure, le marin Pencroff, les conditions dans lesquelles l'hydrogène pourrait un jour remplacer les énergies fossiles :

« - Et qu'est-ce qu'on brûlera à la place du charbon ?

- L'eau, répondit Cyrus Smith.

- L'eau, s'écria Pencroff, l'eau pour chauffer les bateaux à vapeur et les locomotives, l'eau pour chauffer l'eau !

- Oui, mais l'eau décomposée en ses éléments constitutifs, répondit Cyrus Smith, et décomposée, sans doute, par l'électricité, qui sera devenue alors une force puissante et maniable, car toutes les grandes découvertes, par une loi inexplicable, semblent concorder et se compléter au même moment. Oui, mes amis, je crois que l'eau sera un jour employée comme combustible, que l'hydrogène et l'oxygène, qui la constituent, utilisés isolément ou simultanément, fourniront une source de chaleur et de lumière inépuisables et d'une intensité que la houille ne saurait avoir. »

II. Fonctionnement de l'hydrogène

A) Production de dihydrogène

A.1. Dihydrogène à partir d'hydrocarbure

La production mondiale d'hydrogène est à 96% issue de procédés thermiques très polluants et consommateurs d'hydrocarbures tel que le reformage du gaz naturel, d'hydrocarbure ou bien encore la gazéification du charbon [7].

Voici le détail du reformage du gaz naturel :

Sous l'action de la vapeur d'eau et de la chaleur, les atomes qui constituent le méthane (CH_4) se séparent et se réarrangent en dihydrogène (H_2) d'une part et dioxyde de carbone (CO_2) d'autre part.

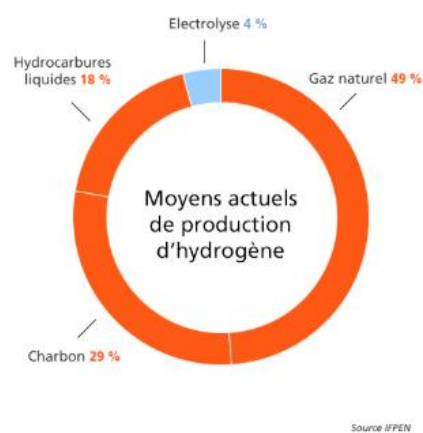


Figure 1. Répartition du dihydrogène en fonction de l'origine de production

A.2. Dihydrogène à partir de l'électrolyse de l'eau

Dominant la production mondiale d'hydrogène par électrolyse [14], la technologie des électrolyseurs alcalins présente l'avantage d'être la plus éprouvée (le premier électrolyseur de ce type ayant été construit en 1900) et, de ce fait, aussi la moins onéreuse. En contrepartie, son rendement électrique, de l'ordre de 60 %, n'est pas des plus élevés [12]. C'est pourtant ce type d'électrolyseur que l'on rencontre le plus souvent, par exemple dans la centrale hybride de Prenzlau, en Allemagne.

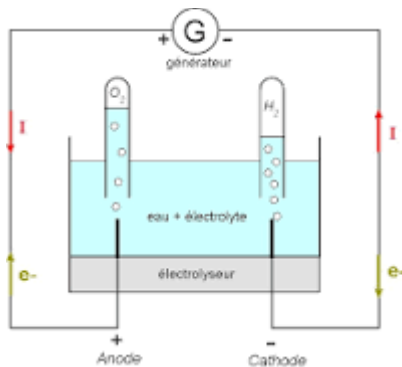


Figure 2. Schéma du fonctionnement de l'électrolyse

Une technologie plus récente, donc moins répandue que les précédentes, les électrolyseurs à membrane à échange de proton (PEM) présentent un meilleur rendement, de l'ordre de 75 %, mais s'avèrent d'un coût plus élevé [14]. Leurs concepteurs mettent en avant leur capacité à faire face aux variations de courant qui les rendraient particulièrement adaptés à une alimentation en électricité d'origine éolienne et solaire. Néanmoins, leur puissance reste, de fait, limitée. Durant notre étude, nous n'avons pas eu l'occasion d'être confrontés à des installations équipées de ce type d'électrolyseur, ce qui tendrait à confirmer que cette technologie manquait encore de maturité pour une utilisation en production.

Enfin, les électrolyseurs à électrolyte solide fonctionnent à une température supérieure à 700°C qui permet de réduire leur consommation spécifique d'électricité tout en évitant l'utilisation d'un catalyseur [7]. Ce niveau de températures induit des contraintes sévères pour l'installation nécessitant le développement de matériaux adaptés.

Chacune de ces technologies principales présentant des limites, les recherches se poursuivent, soit pour les perfectionner, soit pour leur inventer des alternatives. À la suite des différentes études que nous avons pu consulter, nous considérons, compte tenu des limites des technologies actuelles, que le domaine de l'électrolyse reste un champ d'investigation scientifique et de développement industriel assez ouvert, malgré la présence d'acteurs historiques solidement implantés. Le développement des applications énergétiques de l'hydrogène pourrait conduire toute à la fois à un accroissement de la demande en électrolyseurs de petite capacité, destinés à une production décentralisée, voire individuelle, et au développement d'un marché d'électrolyseurs de capacité très supérieure à ceux actuellement commercialisés, pour la production massive d'hydrogène.

A.3. Dihydrogène naturel

M. Olivier Appert, président d'IFP Énergies nouvelles a évoqué les résultats encourageants des premières recherches menées par son institut sur les sources terrestres d'hydrogène naturelles, réparties sur l'ensemble des continents [18]. Lors de l'audition publique sur les enjeux du vecteur hydrogène, M. François Kalaydjian, directeur adjoint aux ressources énergétiques de l'IFPEN, a précisé la localisation des sources possibles d'hydrogène en Europe : dans les péridotites situés au nord de l'Italie, à Chypre et en Grèce, dans les massifs rocheux anciens de Russie, ainsi qu'en faible quantité dans le bassin du sud-est de la France [17]. Les deux responsables de l'IFPEN ont souligné la nécessité d'engager des recherches plus approfondies pour lever les verrous existants avant de pouvoir envisager une exploitation de ces gisements. En effet, la découverte d'une nouvelle source d'énergie ne garantit pas que celle-ci soit exploitable dans des conditions économiques et environnementales acceptables. Si les résultats de ces investigations étaient positifs, l'hydrogène deviendrait alors non plus seulement un vecteur mais aussi une source d'énergie durable. Il s'agit donc là d'une voie de recherche prometteuse, méritant d'être poursuivie, bien entendu prioritairement sur le territoire national.

B. Technologies de stockage

Au vu des attentes de la transition énergétique, les techniques de stockage de l'hydrogène constituent un enjeu stratégique, technologique et sociétal majeur pour le développement de la filière hydrogène.

Le choix du mode de stockage d'hydrogène fait l'objet d'une réflexion au cas par cas car les différentes technologies, sous forme de gaz comprimé, de liquide cryogénique, dans les solides ou par réaction chimique présentent chacune des avantages et des inconvénients [4]. Les technologies par compression et liquéfaction sont disponibles sur le marché, ainsi que certaines techniques d'absorption par hydrures métalliques. Les autres technologies de stockage chimique ou par adsorption dans des solides sont encore à l'état de recherche.

Les progrès en termes de coût de technologie, de capacité de stockage des réservoirs, et de sécurité sont des points clés. Le système principal de stockage est celui par compression. On le retrouve aussi bien sur les voitures à hydrogène que sur les sites de production d'Air liquide [6].

Ces réservoirs font l'objet de qualifications très complexes où on vérifie la résistance à la pression (jusqu'à l'éclatement pour un échantillon du lot), la résistance au feu et la résistance aux chocs (tirs à balles réelles). Deux standards existent, celui à 350 bars pour tous types de véhicules : voitures particulières, bus, engins et camions et celui à 700 bars pour les voitures particulières. À cette pression l'hydrogène possède une masse volumique de 42 kg/m³ [6], soit un gain d'un facteur 500 environ par rapport à sa densité à pression et température ambiantes.

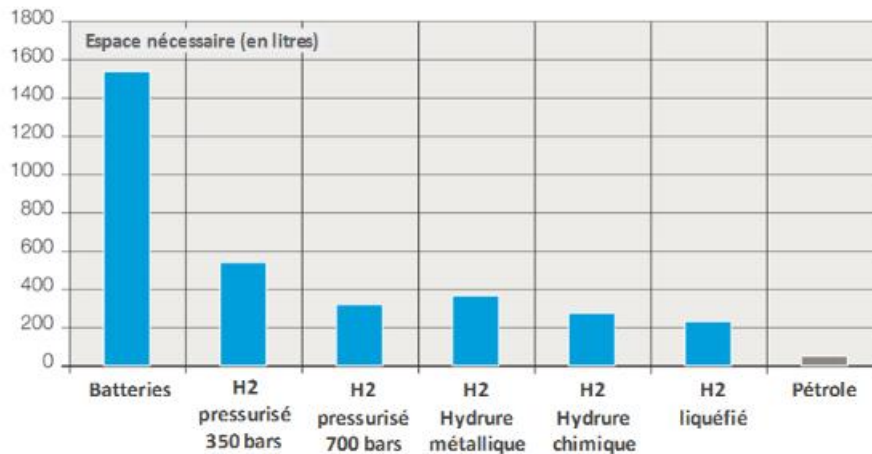


Figure 3. Espace nécessaire pour stocker l'énergie contenue dans une voiture type thermique

C. Utilisation de l'hydrogène

L'utilisation de l'hydrogène pourrait à ce jour, apporter une grande contribution à la préservation et la protection du climat grâce à sa conversion en énergie électrique, mais jusqu'à présent, il n'existe pas d'application de stockage mobile, utilisable à tous instants et en grande quantité. Partout dans le monde des groupes de recherche composés d'universités, d'instituts de recherche ainsi que de partenariats industriels travaillent ensemble pour trouver plusieurs solutions sur le procédé de stockage de l'énergie par hydrogène.

Les conséquences du changement climatique et la dépendance aux énergies fossiles obligent à repenser

la politique énergétique des gouvernements et à développer de nouvelles sources d'énergie, en particulier pour des secteurs fortement émetteurs, les transports étant la cause principale du rejet de CO₂ dans l'atmosphère. Produit à partir d'énergie décarbonée, l'hydrogène constitue l'un des nouveaux vecteurs d'énergie capables de limiter à long terme les rejets de gaz à effet de serre.

L'utilisation de ce combustible permet de fournir de l'électricité et de la chaleur avec de l'eau comme seul résidu, l'une des applications les plus abouties est la pile à combustible sur le principe du stockage hydrogène. En effet, elle permet de transformer ce combustible et possède de nombreuses applications

- Les micros-PAC permettent d'alimenter une petite batterie comme celle d'un téléphone portable
- Les PAC pour les véhicules (voitures, bus)
- Les PAC stationnaires suffisamment puissantes pour fournir l'électricité et la chaleur à un immeuble collectif ou à des sites isolés.
- Les PAC de taille industriels et expérimentales pour redistribuer l'énergie sur le réseau de distribution (l'exemple de la centrale solaire en Guyane couplée à du stockage hydrogène) [5].

Pour illustrer notre propos, développons l'exemple de la centrale solaire installée à Mana en Guyane avec le projet CEOG [13]. C'est un projet mis en œuvre par l'entreprise HDF Energy (Hydrogène De France). Il consiste à coupler une centrale solaire à une unité de stockage de 140 MWh. C'est un projet prometteur car la capacité de stockage sera augmentée de 10MWh supplémentaires grâce à du stockage par batterie mis en place en Australie par l'entreprise Tesla. La centrale aura pour objectif de fournir de l'électricité à plus de 10 000 foyers en Guyane, avec un prix très attractif. Elle pourra en effet fournir près de 10 MW en journée pour 3 MW la nuit.

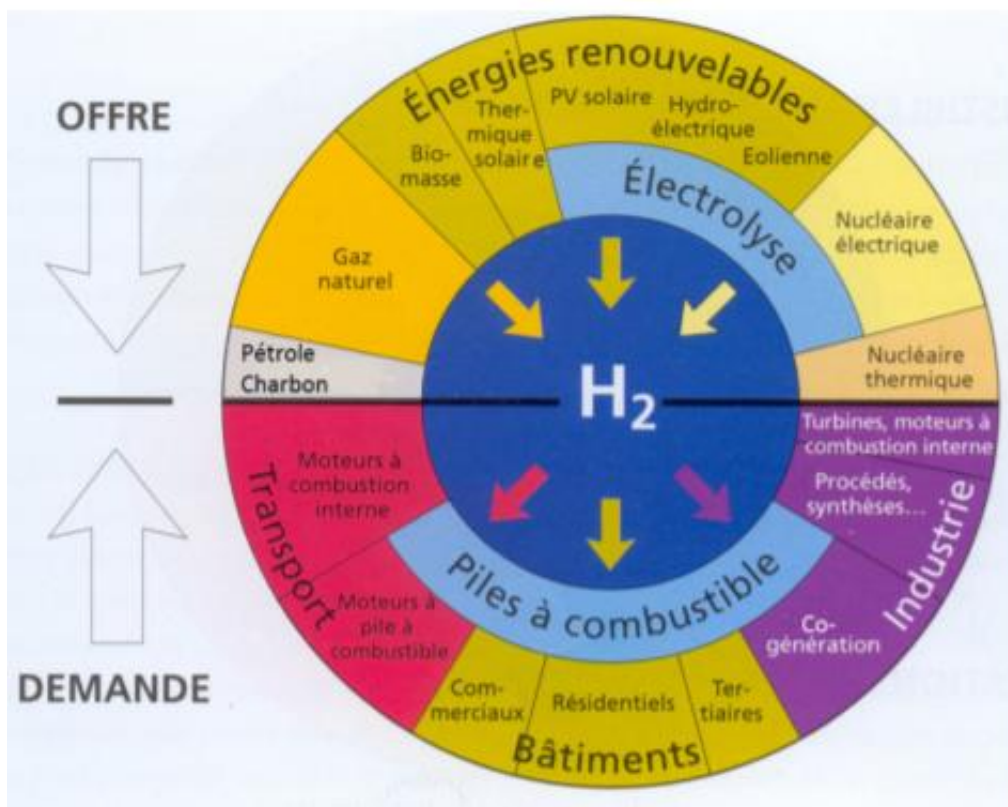


Figure 4. Filière hydrogène (Moyens de production et utilisations principales)

III. Politiques gouvernementales et plans de développement

A. France

Le ministère de la Transition écologique et solidaire a annoncé en Juin 2018, la mise en place d'un plan national de déploiement de l'hydrogène avec comme principaux objectifs la création d'une filière industrielle française décarbonée, le développement de solutions zéros émissions pour les transports et l'ouverture de nouvelles perspectives de stockage des énergies renouvelables. Ce plan était équipé d'une enveloppe de 100 millions d'euros qui depuis a été revue à la baisse.

Dans ce cadre, en complémentarité des politiques publiques de soutien à l'innovation, le gouvernement a confié à l'ADEME la mission de faciliter les premiers déploiements de la filière par le biais d'appels à projets permettant d'accompagner la demande en cofinçant des réalisations et des investissements pour des flottes captives [3].

Ainsi, ouvert en octobre 2018, l'appel à projets « Ecosystèmes de mobilité hydrogène » connaît un véritable succès et des lauréats sont choisis dans tous les territoires.

Ce premier relevé de l'appel à projets par l'ADEME démontre un positionnement fort des industriels français (fabricants de véhicules, de bornes de recharge, d'électrolyseurs, de piles à hydrogène, exploitants de services) et des attentes nouvelles de la part d'utilisateurs et opérateurs de mobilité [4].

En outre, les projets concernent des applications très diversifiées, comme la livraison du dernier kilomètre en milieu urbain, le transport collectif de personnes en bus ou en navette maritime, la location de voitures, la collecte de déchets, les flottes d'entreprises et de collectivités, ou encore l'usage de poids lourds comme véhicules de chantier [4]. Via cet appel à projets, l'ADEME a cherché à identifier les segments de marché sur lesquels les véhicules électriques hydrogène offrent une plus-value par rapport aux véhicules électriques à batterie, et ainsi accroître la substitution des véhicules thermiques par des solutions électriques. La volonté et l'investissement du gouvernement français et de l'ADEME envers la filière hydrogène est donc réelle et effective.

L'évolution du contexte énergétique et les récents projets d'innovation et de démonstration dans les territoires conduisent l'ADEME à mettre à jour son avis sur la place du vecteur hydrogène dans la transition énergétique et écologique [3]. Les enjeux

pour les années à venir s'articulent autour de quatre contributions majeures :

- L'hydrogène apporte des solutions d'optimisation et de flexibilité aux réseaux énergétiques notamment dans un mix énergétique associant un fort taux de source renouvelable
- Pour les zones à faible interconnexion, l'hydrogène apporte de nouvelles opportunités d'autoconsommation à l'échelle d'un bâtiment ou d'un village.
- L'offre d'électromobilité à destination des professionnels, des usagers et des collectivités se voit diversifiée par le développement des véhicules électriques hydrogène.
- La pertinence de l'hydrogène se révèle à une échelle locale, dans une vision systémique de l'énergie : valorisation des sources renouvelables, interconnexion et flexibilité des réseaux énergétiques, valeurs ajoutées dans différents usages (mobilité, industrie, autoconsommation). De plus, les nouvelles technologies permettent de réduire les impacts liés à l'emploi actuel d'hydrogène d'origine fossile dans l'industrie.

On peut citer en bon exemple le projet de La Nouvelle à la Réunion au cœur du Cirque de Mafate, qui expérimente depuis l'été 2017 un système de stockage hybride batterie / chaîne hydrogène, dans le cadre d'un projet porté par EDF SEI et le Sidélec (Syndicat d'électrification de La Réunion) et soutenu par la Direction Régionale ADEME. L'installation comprend une production Photovoltaïque (7,8 kWc), des batteries lithium (15,6 kWh), un électrolyseur et une pile (3 kW) et un stockage d'hydrogène (3 kg). L'ensemble permet à trois bâtiments (le dispensaire, l'école et le bâtiment de l'ONF) d'être 100% autonomes en énergie. Si l'expérimentation est concluante, elle sera étendue à l'ensemble du village qui pourra alors se passer du fioul qui alimente ses groupes électrogènes.

B. Chine

En mars 2019, le gouvernement a coupé les aides accordées jusqu'alors aux véhicules électriques pour consacrer ses ressources au développement des véhicules à pile à combustible. Actuellement, moins de 2 500 véhicules à hydrogène sont en circulation dans le pays. Le cap du million de véhicules pourrait être atteint d'ici 2030.

Le gouvernement a déjà investi l'équivalent de plus de 10,7 milliards d'euros dans la technologie des piles à combustible et devrait offrir des incitations

pour accélérer la construction de stations de distribution d'hydrogène.

En avril 2019, le Français Air Liquide, en pointe dans ce domaine, s'est associé avec l'entreprise de Chengdu Huaqi Houpou pour développer des stations de distribution d'hydrogène dans tout le pays. Par ailleurs, les constructeurs Great Wall Motor, Yutong Bus et Foton Motor se sont engagés dans le secteur grâce aux subventions gouvernementales destinées à soutenir les efforts de R & D.

C. Etats-Unis d'Amérique

Aux Etats-Unis, la voiture est reine et le pétrole son roi. Le gouvernement fédéral a annoncé des plans de développement pour l'hydrogène sans préciser de date et de budget clair. Seule la Californie s'investit réellement dans la technologie hydrogène notamment pour le transport collectif [6]. Ainsi, au cours de la prochaine décennie, la Californie souhaite favoriser un développement massif des bus à hydrogène. Après la publication d'un document d'orientation générale en août 2018, le CaFCP (California Fuel Cell Partnership) [11], partenariat public-privé visant à promouvoir les véhicules à hydrogène en Californie, vient de publier un document recensant onze actions à mener pour atteindre l'objectif d'une flotte de bus neutre en carbone d'ici 2040.

IV. L'aspect sécurité

En France, un organisme spécifique est chargé de recenser les risques que les activités économiques font peser sur la santé, sur la sécurité des personnes et aussi sur les biens et sur l'environnement. Il s'agit de l'INERIS, l'Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques dont les missions ont pour but de mieux comprendre et d'appréhender les phénomènes susceptibles de conduire aux situations de risques ou d'atteintes à l'environnement et à la santé afin de développer un savoir et une capacité d'expertise en matière de prévention.

L'INERIS a donc recensé les principaux risques associés aux différentes technologies de stockage de l'hydrogène et les a regroupés dans trois catégories d'impacts :

A. Impacts sociétaux et humains

De manière générale, l'hydrogène s'enflamme plus facilement que d'autres combustibles et présente le double avantage d'être non toxique et aussi d'une grande légèreté lui permettant ainsi d'être facilement dissipable dans l'air. Néanmoins l'absence de flamme visible lors de la combustion ainsi que

d'autres caractéristiques propres, nécessitent de prendre des précautions spécifiques [4].

Il faut savoir que l'acceptation sociale de l'hydrogène est fortement conditionnée par la confiance du public en sa sûreté et en cela, ce gaz est un concentré d'énergie qui présente des risques de feux et d'explosion. Il n'est ni plus ni moins dangereux que d'autres gaz utilisés dans la vie domestique, tel que le méthane [18].

De plus, l'absence d'un cadre réglementaire adapté entraîne aussi une réticence des assureurs à garantir les risques liés aux usages énergétiques de l'hydrogène. Il faut savoir qu'il n'existe encore aucune réglementation du stockage hydrogène référentiel car chaque pays fait le choix d'un scénario énergétique qui lui est propre. La population est donc très peu informée voir même, n'a pas conscience des propriétés et de l'utilisation de l'hydrogène dans les collectivités ni dans les industries.

A. Impacts environnementaux

L'impact sur l'environnement se limite à la production de CO₂ issue des moyens mis en œuvre dans le stockage Hydrogène ce qui est très minime [5]. Il faut retenir que les PAC à combustion d'hydrogène ne libèrent que de la chaleur rayonnante et de le l'eau lors de leur fonctionnement nominal. Pour beaucoup il s'agirait alors d'un carburant à combustion propre et notamment dans le secteur du transport.

Cependant, une grande partie du dihydrogène produit est aujourd'hui obtenue à partir d'hydrocarbures. L'hydrogène n'est pas considéré comme une source d'énergie propre dû à cela.

B. Impacts infrastructures

Pour toutes les technologies de stockage, une fuite d'hydrogène gazeux aurait des conséquences qui varient en fonction de la pression à laquelle l'hydrogène est stocké [5]. Dans un milieu confiné et mal ventilé, une atmosphère dangereuse peut être générée et entraînerait des risques d'explosions, les risques suivant ont été détaillés en fonction de l'utilisation qui est faite de l'hydrogène.

Pour le stockage d'hydrogène par compression, l'éclatement du réservoir et les effets associés (surpressions aériennes et projection de fragments) sont l'un des risques majeurs pour les structures et les population.

Pour le stockage dans les solides, la mise en contact accidentelle des composés hydrides avec l'air, l'eau

ou encore d'autres agents incompatibles peut induire des risques d'incendie violents. Les hautes températures, la toxicité des hydrures ou des catalyseurs utilisés sont aussi des risques à prendre en compte.

Le défi serait donc de bien définir l'application de ces technologies dans des systèmes s'adressant à un public plus large tel que les particuliers, avec des performances élargies qui oblige à renforcer les exigences de sécurité et les mesures de prévention dans ce domaine.

Pour le développement de la filière H₂, les chercheurs travaillant sur les procédés de stockage d'hydrogène cherchent constamment à améliorer la maîtrise des risques associés aux différents événements redoutés. Nous devons donc définir les règles de conception et les barrières de sécurité techniques, humaines et organisationnelles qui doivent être mises en œuvre pour maîtriser les risques de ces systèmes et définir un cadre d'action guidant les parties prenantes.

Leur prise en compte dans une réglementation adaptée ou des normes de conception et de maîtrise des risques spécifiques contribuera à renforcer la confiance des différents acteurs dans ces dispositifs et peut être une clé du développement de la filière hydrogène énergie dans les prochaines années.

V. Aspect commercial

A. Le positionnement Français :

La France dispose d'un important potentiel scientifique et industriel dans le domaine de l'hydrogène comme source d'énergie et cette situation résulte de la conjonction de groupes industriels préexistants, avec notamment des groupes de renommées internationales tels qu'Areva, Total, GDF-Suez ou encore Air Liquide [6]. De grands investissements ont été réalisés en termes de recherche et développement dans le milieu des années 2000 et sont poursuivies encore aujourd'hui mais avec des moyens un peu plus réduits qu'auparavant.

Malgré les efforts engagés, depuis plus de vingt ans, dans notre pays comme en Europe, l'intégration des énergies renouvelables dans le réseau électrique reste en partie problématique et notre consommation d'énergie fossile est actuellement en lente dégression.

En effet, la France à ce jour fait preuve d'un manque de reconnaissance du fort potentiel industriel et économique de cette nouvelle filière Hydrogène. La mauvaise implication des pouvoirs publics constitue

un frein majeur à son développement [2]. De plus, Il faut remarquer que l'absence de cadre réglementaire adapté entraîne une réticence des assureurs à garantir les risques liés aux usages énergétiques de l'hydrogène, ce qui se traduit par des délais supplémentaires.

La mauvaise adaptation de la réglementation sur la véritable nature du composé dihydrogène, pourtant incontournable en termes de recherche, met en difficultés de nombreux acteurs en France et freine son développement et sa mise en place [19].

Fait contradictoire : La direction prise par le gouvernement français contraste néanmoins avec les missions de l'ADEME sur la transition énergétique et la nécessité d'intégrer de plus en plus les énergies renouvelables. Les actions entreprises étant limitées par le manque de visibilité donnée aux organismes en charge de donner un cadre défini au stockage à hydrogène.

B. Le positionnement de pays majeurs dans le domaine des avancées technologiques

La France à une position assez attentiste vis-à-vis de l'hydrogène énergie dans le sens où elle contraste avec celle de plusieurs autres grandes puissances industrielles, il s'agit ici de l'Allemagne et le Japon. Ces deux nations ont, depuis plusieurs années, décidés d'engager les efforts nécessaires à la mise en place d'une nouvelle filière industrielle.

Il faut savoir que le Japon voit les applications à l'hydrogène comme un vecteur mettant en concurrence les autres sources d'énergies. L'Allemagne quant à-elle, cherche à intégrer à moindre coût, les énergies renouvelables.

Sur le plan commercial, ces deux grandes puissances industrielles considèrent les applications énergétiques de l'hydrogène comme une opportunité pour conquérir de nouveaux marchés de haute technologie. Le but est d'être les premiers sur le marché mondial de l'hydrogène. L'expansion inéluctable de la part des énergies assez variables comme le photovoltaïque et l'éolien conduira à l'essor des applications énergétiques de l'hydrogène.

Ces objectifs contrastent avec ceux mis en place par la France, qui malgré tout, dispose d'une grande capacité technologique dans la filière hydrogène grâce aux moyens mis en place dès le début des années 2000 mais perd de son dynamisme à cause du cadre mal défini de la réglementation sur le stockage hydrogène et la prise de position économique non concrète de l'état Français.

VI. Plan de développement de groupes internationaux

Nous pouvons aborder également le sujet des entreprises car celle-ci sont un bon indicateur quant à la fiabilité et l'application potentiel de l'hydrogène. Nous pouvons partir de la transition énergétique qui est en grande marche depuis la COP 21 notamment avec les accords de Paris pour la diminution des émissions de CO2 et également pour un arrêt de l'augmentation de la température. Tout le monde est impacté par ce changement et le non-respect de ces accords aurait des répercussions économiques, environnementales et sociétales importantes. De plus le stockage de l'énergie est au cœur de l'innovation pour les producteurs et distributeurs d'énergie, celui-ci permettrait d'optimiser les ressources énergétiques, ajuster la production et la consommation d'énergie tout en limitant les pertes, pour les ressources d'énergies renouvelables, le stockage permettrait de répondre à une demande constante de la consommation, ce que toutes les énergies renouvelables ne peuvent pas fournir. C'est pour cela que les entreprises sont également très investies dans cette transition. Plusieurs sujets sont alors mis en place et notamment celui de l'utilisation de l'hydrogène comme source de stockage de l'électricité.

A. Cas EDF

Dans un premier temps, si nous prenons en compte le groupe le plus important concernant la production d'électricité en France, à savoir Edf, on peut vite se rendre compte de l'importance de l'évolution des projets de stockage de l'énergie. En effet ce groupe prévoit un plan ayant pour objectif de devenir numéro un dans ce domaine d'ici 2035. A ce jour, l'entreprise arrive à stocker 5GW, l'objectif pour 2035 est de 10GW supplémentaires [15]. Cela engendre des coûts d'investissement très important notamment en ce qui concerne le pôle de recherche et développement, celui-ci atteint-les 70 millions d'investissement pour la période actuelle (le double des précédents investissements), pour ce qui de l'investissement total dans le développement de nouvelles technologie de stockage il est de 8 milliards d'euros. Ces chiffres nous montrent bien l'importance et l'enjeu qu'apporte le stockage d'électricité pour les entreprises. En ce qui concerne les projets de développement de cette entreprise pour le stockage de l'électricité, ils ne sont pas réellement portés sur le stockage par hydrogène, en effet, ils portent notamment sur de nouveaux barrages hydraulique ou également sur la mise en place de nouvelles batteries avec des projets comme l'installation Mc Henry ou encore leur filiale Zinium

en plein développement d'une batterie zinc-air. Par contre le groupe a de grands projets avec l'hydrogène pour des utilisations en transport et en industrie. En effet, de nos jours, l'hydrogène utilisé est, en majeure partie des cas, produit à partir d'énergies fossiles et donc produisant énormément de CO2. On sait que pour produire 1kg d'hydrogène on émet 10kg de CO2. C'est pourquoi Edf a lancé une nouvelle filiale, Hynamics, filiale entièrement dédiée à la transition énergétique des entreprises avec une distribution d'hydrogène par électrolyse (de l'investissement, exploitation et maintenance). Le développement de nouvelles filiales comme Hynamics montre un grand intérêt pour la performance et l'efficacité de l'utilisation de l'hydrogène dans la transition énergétique par Edf.

Pour revenir sur le stockage de l'électricité par hydrogène, Edf a décerné un prix lors de la 5eme édition des prix EDF PULSE à l'entreprise HySiLabs dans la catégorie « Smart City ». Le projet a été mis en place il y a 10 ans par Vincent Lôme et Pierre-Emmanuel Casanova qui mettent en œuvre une manière simplifiée de stocker et transporter l'hydrogène avec un vecteur liquide, en supprimant ainsi les facteurs risques du gaz ainsi que les bonbonnes de stockage sous haute pression. Lors de ce projet, ils ont pu mettre en avant une solution sur l'une des principales problématique liée à l'hydrogène, qui était l'aspect sécurité (l'hydrogène sous forme gazeuse présente en effet de gros risque d'explosion). Pour cela ils utilisent un vecteur liquide chargé en H2. L'entreprise va ainsi contribuer à une diminution très importante des émissions de CO2, qui est de 70Mt/an (échelle française).

Pour encore montrer leur implication dans l'utilisation de l'hydrogène comme source d'avenir dans la transition énergétique, Edf a également publié le 5 juin 2019 un livre, « L'hydrogène décarboné », écrit par les chercheurs recherche et développement d'Edf. Il fait suite à un autre livre « Le stockage de l'électricité : Un défi pour la transition énergétique ».

B. Cas Areva

Nous pouvons également mettre en avant le projet Greenergy Box [8], qui est une création d'une filiale d'Areva spécialisée dans le stockage de l'énergie. Ce projet permet donc de stocker l'hydrogène ainsi que l'oxygène récupéré par électrolyse de l'eau pour les périodes durant lesquelles la demande est faible puis lorsque la demande augmente, il y a une reconversion qui permet donc de produire de l'électricité.

Nous avons pu voir auparavant que la production d'énergie par hydrogène crée beaucoup d'émission de CO₂, le projet Greenenergy Box a trouvé une solution en couplant les énergies renouvelables à ce projet. Ainsi lorsque l'énergie produite n'est pas suffisante, les énergies renouvelables peuvent prendre le relais. La Greenenergy est capable de produire une puissance modulaire de 20KW à 100KW, avec une possibilité de stockage sur une longue durée. Il est aussi possible d'ajouter des systèmes permettant d'augmenter la puissance et la capacité de la machine. Le premier prototype a été mis en place avec la plateforme de démonstration MYRTE dans la ville d'Ajaccio. Tout ce projet a pu se mettre en place à l'aide d'investisseurs qui ont porté leur confiance dans l'avancé de l'hydrogène au sein de la transition énergétique. Dans un premier temps, il y a eu le soutien d'OCEO qui est une entreprise permettant le financement d'entreprises françaises sur des projets d'innovation.

Il y a aussi le projet MYRTE financé par l'Université de Corse, par Areva et par le CEA.

VII. Les perspectives d'avenir de trois grands acteurs de l'hydrogène.

A. La France

A ce jour, la France n'a pas de problème d'intermittence dû à la grande part du nucléaire dans sa production d'électricité mais sa balance économique est déficitaire et doit rester dans la course sur une filière à fort caractère technologique. Il est vrai que la France possède des compétences très large allant de la conception des systèmes jusqu'à leur intégration aux installations mais un travail d'industrialisation et de précision de la réglementation doit encore être effectué.

L'actuel scénario énergétique de la France est tourné vers le nucléaire et une grande partie de la recherche est dédiée à son développement pour des applications futures moins dangereuses en termes de stockage de produits finis. Néanmoins la nécessité d'intégrer de plus en plus la part des énergies renouvelables dans le réseau avec notamment les applications au stockage à hydrogène dans le secteur des transports par exemple, commence à faire prendre conscience au gouvernement et instances françaises la nécessité de se lancer dans la course pour rattraper le retard sur nos voisins. Le gouvernement a donc un rôle majeur afin de donner l'impulsion et les objectifs nécessaires aux différents acteurs de la filière pour rentrer à la fois sur un marché concurrentiel voir même économique mais également dans une optique de s'imposer encore davantage dans les énergies renouvelables.

B. L'Allemagne

L'Allemagne, dont la culture énergétique est très tournée vers la diversité des énergies, considère l'hydrogène comme un grand moyen de stockage de l'électricité issue du développement des énergies renouvelables. La continuité des recherches est doublement intéressante puisque l'Allemagne va chercher dans les années à suivre, à se libérer des énergies fossiles qui occupent actuellement une partie de sa production d'électricité mais également dans le but de conquérir un nouveau marché dans le domaine des transports et d'être concurrentiel dans cette nouvelle filière « hydrogène » émergente. Avec pour exemple, la réalisation progressive des infrastructures par une grande partie des constructeurs automobiles allemands de renommée internationale.

En revenant au stockage d'énergie, de nombreuses expérimentations visent à valoriser l'hydrogène produit par électrolyse pour alimenter directement les véhicules, pour la méthanisation ou encore même pour être injecter sur le réseau de gaz.

C. Le Japon

Sur le même schéma que celui de l'Allemagne mais encore plus poussé, le Japon est en développement sur toutes les pistes, voyant dans l'hydrogène une source d'indépendance énergétique mais aussi un moyen de commercialiser de nombreuses applications de technologies de pointe et très concurrentielle et cela au dépend de l'aspect de décarbonation du pays.

Aujourd'hui, le pays du soleil levant est un leader dans le secteur automobile et la cogénération résidentielle et a déjà déployé de nombreuses stations à hydrogène ainsi que mis en place le lancement de la commercialisation à moyenne et grande échelle des voitures électriques à pile à combustible.

Il faut savoir que, politiquement, le Japon force l'arrêt brutale de la production d'électricité par les centrales nucléaires et va donc investir de grandes ressources dans les nouvelles technologies en lien avec les énergies renouvelables pour rétablir cet équilibre entre production et consommation.

Enfin, le Japon reste parmi les précurseurs dans le domaine du stockage à hydrogène grâce aux actions conjointes mises en place il y a plusieurs années entre les différents acteurs et le gouvernement.

VIII. Conclusion

A l'échelle nationale, nous pouvons voir que les projets démonstrateurs de l'utilisation de l'hydrogène pour permettre le stockage de l'énergie sont en pleines essors. Les investissements et l'engagement des grands groupes dans ces genres de projet nous indiquent bien la confiance de par la fiabilité et l'efficacité de l'utilisation de l'hydrogène dans la transition énergétique. Malheureusement de nos jours son utilisation par les entreprises et les particuliers est tout de même rare car il ne présente pas encore la ressource de stockage la plus performante sur le marché. En effet, même si l'hydrogène présente l'intérêt de pouvoir être produit à l'aide d'énergies renouvelables, les systèmes mis en place ont souvent un coût d'investissement élevé pour un rendement assez faible qui ne dépasse pas les 50% [12]. De plus, dans le cadre d'applications couplées au réseau électrique, leur durée de vie est également assez faible. L'hydrogène n'est pourtant pas encore abandonné car il est fortement utilisé dans un substitut de carburant pour les véhicules équipés de moteurs à combustion fonctionnant au gaz. Nous pouvons prendre comme exemple la création de la première ligne de bus à hydrogène dans la ville d'Houdain dans les Hauts de France.

Le stockage de l'énergie sous forme de dihydrogène est aujourd'hui moins attractif que d'autres techniques telle que le stockage par batterie. Ce manque d'attractivité s'explique par un manque de maturité des techniques de production, de stockage et d'utilisation du dihydrogène. En effet le dihydrogène produit est à 96% issus d'hydrocarbures obstruant ainsi l'idéal écologique du dihydrogène. Le stockage du dihydrogène est limité du fait de sa haute inflammabilité et de son potentiel énergétique volumique assez faible. L'utilisation quant à elle présente un rendement très faible, de l'ordre de 50%. Sur l'ensemble de la chaîne de production – stockage - utilisation, les constats les plus optimistes estiment à 30% le rendement global du dihydrogène.

IX. Recommandations

Il est important de noter que le stockage par hydrogène est moins compétitif et intéressant que d'autres formes de stockage de l'énergie pour des zones fortement interconnectées telle que la France métropolitaine mais peut trouver son intérêt pour des zones isolées ou faiblement connectées telle que les îles ou les zones très faiblement peuplées telles que la Guyane française. En effet le stockage par hydrogène est à ces échelles-là très intéressant dans le sens où cette technologie, associée à une production verte d'énergie, apporte une flexibilité

indispensable au réseau électrique et permet de limiter l'usage de moyen de production thermique d'appoint à la fois coûteux et très émetteur de pollution.

L'usage du dihydrogène reste indispensable dans certaines industries et il est nécessaire de continuer à investir dans la recherche sur ce domaine afin d'en faire diminuer les coûts de production et d'utilisations notamment sur les techniques décarbonées de production (électrolyse).

Si le dihydrogène n'est pas compétitif en tant que système de stockage d'énergie, il n'en reste pas moins intéressant pour le transport de personnes et de marchandises. En effet, le dihydrogène issus de sources renouvelables telle que l'éolien ou le solaire par électrolyse et aux caractéristiques énergétiques similaire à celles du gaz naturel pourrait être mis à disposition pour le transport notamment collectif (bus, navette maritimes, etc).

L'intérêt et la curiosité des collectivités envers le dihydrogène se traduit par l'études de solutions de transports collectifs tels que le bus fonctionnant à partir de cette source d'énergie répondant ainsi à un besoin de plus en plus important des concitoyens à propos de l'écologie.

La grande force du dihydrogène est d'avoir la possibilité d'être produit de manière décarbonée et de présenter de nombreux usages et domaines d'application. Il est ainsi nécessaire d'encourager par le biais d'avantages fiscaux ou de subventions publiques les entreprises et particuliers qui s'investissent dans cette technologie que ce soit en tant que producteur, opérateur ou usager.

Il est nécessaire d'équiper la France d'un corps de lois spécifique et précis sur le dihydrogène, de dessiner un ensemble de réglementations strictes et globales afin de démocratiser la filière hydrogène et d'établir une juridiction s'établissant en référence dans le domaine. La France en tant que membre influent de l'union européenne pourra se placer, en partenariat avec l'Allemagne, en tant que leader d'une « transition hydrogène » et ainsi conforter la présence française, via les industriels et l'INERIS notamment, dans les travaux de normalisation européenne.

Il pourra de plus être intéressant de demander à l'ADEME de publier périodiquement un baromètre de l'opinion publique vis-à-vis de la filière hydrogène à l'instar de ce qui est fait en matière de rénovation énergétique des bâtiments.

IX. Références

- [1] Jules Verne. L'île mystérieuse [e-book] Édition de référence : Le Livre de Poche no 16086. 1874. [consulté le 8 octobre 2019]. Disponible sur : <https://beq.ebooksgratuits.com/vents/Verne-ile.pdf>
- [2] ADEME. Retour sur quinze années de recherche sur l'hydrogène [en ligne]. ADEME. Mars 2017. [Consulté le 19/10/2018]. Disponible sur : https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/ademe_lalettre_recherche_18.pdf
- [3] ADEME. Hydrogène, nouvelle énergie verte [en ligne]. Franck Barnu. Novembre 2013. [Consulté le 19/10/2018]. Disponible sur : https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/89957_7944-la-recherche-hydrogene-energie-verte.pdf
- [4] ADEME. Étude sur le potentiel du stockage d'énergies [en ligne]. ADEME. 21/10/2013. [Consulté le 02/11/2019]. Disponible sur : https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/20140409_rapport-potentiel-stockage-NRJ.pdf
- [5] INERIS. Veille technologique et évaluation des risques sur les procédés de stockage d'hydrogène [en ligne]. INERIS. Date non renseignée. [Consulté le 12/10/2018]. Disponible sur : <https://www.ineris.fr/sites/ineris.fr/files/contributions/Documents/fiche-hydrogene-v31-1381496338.pdf>
- [6] Air Liquide [en ligne]. Stocker l'hydrogène [en ligne]. Air Liquide. Date non renseignée [Consulté le 19/10/2018]. Disponible sur : <https://energies.airliquide.com/fr/mediatheque-planete-hydrogene/comment-stocker-lhydrogene>
- [7] EDF [en ligne]. EDF, pas de date de publication, 2019 [Consulté le 14/10/2019]. Disponible sur : <https://www.edf.fr/groupe-edf/nos-energies/hydrogene-bas-carbone;>
- [8] AREVA [en ligne]. CRE, pas de date de publication, pas de date de mise à jour [Consulté le 28/10/2019]. Disponible sur : <http://www.smartgrids-cre.fr/index.php?p=stockage-greenergy-box;>
- [9] Le Parisien [en ligne]. Le Parisien [Consulté le 28/10/2019]. Disponible sur : <http://www.leparisien.fr/economie/transports-la-chine-prepare-sa-societe-de-l-hydrogene-15-06-2019-8093991.php>
- [10] CAFCP. Road map to a us hydrogen economy [en ligne]. CAFCP [Consulté le 10 octobre 2019]. Disponible sur : https://cafcp.org/sites/default/files/Road-map-to-a-US-hydrogen-economy_Executive-Summary.pdf
- [11] The future of hydrogen [en ligne]. IEA [Consulté le 05/11/2019]. Disponible sur : <https://webstore.iea.org/download/summary/2803?fileName=English-Future-Hydrogen-ES.pdf>
- [12] Vive le nucléaire heureux [en ligne]. Michel Gay, 06/07/2019, 2019 [Consulté le 12/11/2019]. Disponible sur : <https://www.vive-le-nucleaire-heureux.com/blog-vive-le-nucleaire-heureux/102-le-mythe-du-stockage-par-hydrogene.html>
- [13] revolution-energetique. Guyane : une centrale solaire couplée à du stockage hydrogène [en ligne]. Michaël TORREGROSSA. 9 Juin 2018, 2019 [Consulté le 05/11/2019]. Disponible sur : <https://www.revolution-energetique.com/guyane-centrale-solaire-couplee-stockage-hydrogene/>
- [14] AFHYPAC. Mémento de l'Hydrogène [en ligne]. AFHYPAC - Th. A. Date non renseignée, janvier 2017 [Consulté le 02/11/2019]. Disponible sur : <http://www.afhypac.org/documents/tout-savoir/Fiche%203.2.1%20-%20Electrolyse%20de%20l%20eau%20revjanv2017%20ThA.pdf>
- [15] EDF [en ligne]. Plan de stockage électrique [en ligne]. EDF. 27/03/2018.2019 [Consulté le 12/10/2018]. Disponible sur : <https://www.edf.fr/plan-stockage-electrique>
- [16] CNRS. Énergie : les promesses de l'hydrogène [en ligne]. Daniel Hissel. 21/10/2013. [Consulté le 02/11/2019]. Disponible sur : <https://lejournel.cnr.fr/billets/energie-les-promesses-de-lhydrogene>
- [17] Science-climat-énergie. hydrogene-naturel-etat-de-la-question [en ligne]. Alain Prétat 16/07/2018. [Consulté le 04/11/2019]. Disponible sur : <https://www.science-climat-energie.be/2018/07/16/lhydrogene-geologique-ou-hydrogene-naturel-etat-de-la-question/>
- [18] IFP. Tout savoir sur le dihydrogène [en ligne]. IFP. Date non renseignée. [Consulté le 03/11/2019]. Disponible sur : <https://www.ifpenergiesnouvelles.fr/enjeux-et-prospective/decryptages/energies-renouvelables/tout-savoir-lhydrogene>

[19] Actu environnement. Filière hydrogène-énergie [en ligne]. Ministère de l'environnement. 2015. [Consulté le 08/10/2019]. Disponible sur : <https://www.actu-environnement.com/media/pdf/news-26748-rapport-cgedd-cgeiet-hydrogene.pdf>