

L'HYDROGÈNE - VECTEUR ÉNERGÉTIQUE : USAGES ET ACCEPTABILITÉ



Étudiants :

Tim BENOITS

Ariane PROVENSAL

Chloé TRAN-HONG

Simon FOUQUET

Marie-Madeleine RAVEL

Nathanaël VALLÉE

Enseignant responsable du projet :

David HONORÉ

Date de remise du rapport : 17/06/2019

Référence du projet : STPI/P6/2019 - 16

Intitulé du projet : *L'hydrogène - vecteur énergétique : usages et acceptabilité*

Type de projet : *Bibliographique, expérimental*

Objectifs du projet :

Le premier objectif de ce projet est tout d'abord de découvrir les différents types de production, de stockage et d'utilisation de l'hydrogène.

En parallèle de cela, nous souhaitons comprendre le fonctionnement du modèle pédagogique mis à notre disposition lors des séances.

Enfin, la mise en évidence de l'acceptabilité de l'hydrogène au sein de notre société est également un aspect majeur de notre étude.

Mots-clefs du projet : *Hydrogène ; vecteur énergétique ; futur ; acceptabilité*

TABLE DES MATIÈRES

1. Introduction.....	6
2. Méthodologie, Organisation du travail.....	6
3. Travail réalisé et résultats.....	7
3.1. La production d'hydrogène.....	7
3.1.1. Pourquoi produire de l'hydrogène ?.....	7
3.1.2. Comment produit-on l'hydrogène actuellement ?.....	7
3.1.3. Comment pourrait-on produire l'hydrogène à l'avenir ?.....	8
3.1.4. Étude sur les électrolyseurs.....	9
3.2. Le stockage de l'hydrogène.....	11
3.2.1. Les différentes formes de stockage.....	12
3.2.2. Power to gas.....	14
3.3. Les utilisations de l'hydrogène.....	16
3.3.1. Technologie de la pile à combustible.....	16
3.3.2. Domaines d'utilisation de l'hydrogène.....	17
3.3.3. Expérience.....	19
3.4. L'acceptabilité de l'hydrogène.....	21
3.4.1. L'usage quotidien de l'hydrogène dans l'histoire moderne.....	22
3.4.2. L'utilisation de l'hydrogène dans le futur.....	22
3.4.3. Les obstacles de l'acceptabilité.....	23
3.4.4. Expérimentation – Sondage (cf annexe 4.2).....	23
4. Conclusion.....	25
5. Bibliographie.....	26
6. Annexes.....	33
6.1. Partie 1 : La production d'hydrogène.....	33
6.1.1. Gazéification.....	33
6.1.2. Étude comparative des électrolyseurs commercialisés.....	33
6.2. Partie 2 : Le stockage de l'hydrogène.....	39
6.2.1. Solution de stockage sous forme liquide.....	39
6.3. Partie 3 : Les utilisations de l'hydrogène.....	39
6.3.1. Détail des différents composants de la PAC.....	39

6.3.2. Structure d'une micro-pile à combustible.....	40
6.3.3. Présentation de Hype.....	40
6.3.4. Projets de véhicules terrestres.....	41
6.3.5. Le projet d'avion électrique à l'hydrogène de HES.....	42
6.3.6. La PEMPower 1-Eco.....	42
6.4. Partie 4 :L'acceptabilité de l'hydrogène.....	43
6.4.1. Définitions de l'acceptation sociale par des scientifiques.....	43
6.4.2. Résultats du sondage.....	43

1. INTRODUCTION

« 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. » affirme Cyrus Smith dans *L'Île mystérieuse* de Jules Verne, en 1875. Et si l'hydrogène était la solution, face à la croissance des besoins énergétiques qui s'accompagne de l'épuisement des ressources fossiles et du réchauffement climatique ?

« Hydro-gène », appelé ainsi par Lavoisier, vient du grec et signifie « ce qui engendre l'eau ». Premier élément de la classification périodique de Mendeleïev, l'atome d'hydrogène contient un seul électron et un seul proton, ce qui en fait le plus léger.

Dans le cadre de notre projet P6, nous nous sommes intéressés au sujet suivant : « L'hydrogène -vecteur énergétique : usages et acceptabilité ».

L'étude porte sur le dihydrogène, molécule stable composée de deux atomes d'hydrogène, mais nous utiliserons le terme « hydrogène » pour la désigner. L'hydrogène est un vecteur énergétique, c'est-à-dire un moyen de stocker et transporter de l'énergie pour ensuite la restituer, au même titre que l'électricité ou l'essence. Il doit être produit à partir d'une source d'énergie primaire avant usage.

A l'aide de recherches bibliographiques et sitographiques, l'objectif est, d'une part, de découvrir les différents moyens de production et de stockage de l'hydrogène, ainsi que ses différents usages. L'exploitation du modèle PEMPower 1-Eco a ensuite pour but de comprendre le fonctionnement d'une pile à combustible. Enfin, le projet consiste à mettre en évidence l'acceptation sociétale de l'hydrogène. Finalement, l'hydrogène a-t-il vraiment sa place dans le domaine de l'énergie ?

Nous tâcherons d'y répondre en voyant d'abord comment l'hydrogène est produit, avant de nous intéresser à son stockage. Ensuite, nous découvrirons ses nombreuses utilisations, pour terminer avec la question de son acceptabilité.

2. MÉTHODOLOGIE, ORGANISATION DU TRAVAIL

	07/03/19	14/03	21/03	28/03	Vacances	25/04	02/05	09/05	16/05	23/05	30/05	06/06
Intro												Marie-Madeleine
I) Production						Ariane - Marie-Madeleine						
Méthodes						Ariane - Marie-Madeleine						
Etude d'électrolyseurs						Marie-Madeleine						
II) Stockage						Chloé - Nathanaël						
Différentes formes						Nathanaël						
Power-to-gas et projets						Chloé						
III) Utilisations						Simon - Tim						
Etude d'une PAC						Tim						
Usages						Simon						
IV) Acceptabilité												
Sondage										Ariane		
Expérience												
PEMPower 1-Eco										Simon - Tim		
Conclusion												Nathanaël
Mise en page												Simon
Affiche												Tim
Diaporama												Chloé

figure 1 : Tâches réalisées, avec la période et l'élève associés

En ce qui concerne notre organisation de travail, nous avons tenu un tableau de type diagramme de Gantt (cf ci-dessus). Pour la communication, nous avons créé une conversation Messenger, et un Google Drive afin de faciliter les échanges de documents. Nous nous sommes mis en binômes pour le début des recherches bibliographiques. Au fil du semestre, nous avons davantage travaillé de notre côté. La dernière partie de l'année a notamment été consacrée à la réduction du corps de notre rapport, tâche ardue. Après nous être réunis une dernière fois à cinq, nous nous sommes finalement relayés pour terminer la mise en page, gardant un esprit d'entraide.

3. TRAVAIL RÉALISÉ ET RÉSULTATS

3.1. La production d'hydrogène

3.1.1. Pourquoi produire de l'hydrogène ?

- **Faire face à l'intermittence de la production d'énergie renouvelable**

Depuis plusieurs années, les « énergies propres » ont été largement développées. Cependant, elles dépendent de facteurs intermittents (ensoleillement, vent...). En 2016, ces énergies représentent seulement 16 % de la consommation finale brute d'énergie de la France, d'après les chiffres du ministère de la transition écologique et solidaire. Utiliser l'hydrogène comme vecteur énergétique pourrait assurer la sécurité de l'approvisionnement et lutter contre le changement climatique avec plus de compétitivité dans ce secteur.

- **L'hydrogène, plutôt qu'une autre molécule**

L'hydrogène n'est pas nocif, et sa combustion ne produit que de l'eau. De plus, cette molécule est particulièrement énergétique. A titre d'exemple, la combustion d'1 kg d' H_2 libère 120 MJ contre 45 MJ pour 1 kg d'essence, c'est ainsi presque trois fois plus d'énergie libérée. L'hydrogène étant un combustible, celui-ci peut facilement s'enflammer et exploser au contact de l'air. Cependant, comme les molécules sont légères et petites, il se disperse rapidement dans l'air.

- **Produire de l'hydrogène, alors qu'il y en a déjà sur Terre**

L'atome d'hydrogène est abondant : élément le plus présent dans l'Univers (près des 3/4 de sa masse), il est également présent dans l'eau (H_2O) qui recouvre environ 70 % de la Terre, et encore dans toutes les matières organiques.

En revanche, l'hydrogène pur n'existe presque pas à la surface de la terre. Ce qu'on entend par "produire de l'hydrogène", ce n'est pas créer un atome d'hydrogène à partir d'autres atomes, mais extraire la molécule élémentaire H_2 . Finalement, l'expression "Présent partout ... mais disponible nulle part" employée par le CEA dans son rapport intitulé *L'hydrogène* résume bien la situation.

3.1.2. Comment produit-on l'hydrogène actuellement ?

L'hydrogène serait une ressource presque inépuisable si nous pouvions le produire en grande quantité et de manière rentable. Pour en obtenir, il faut donc passer par des mécanismes chimiques. Actuellement, il y en a trois principaux.

- **Le vaporeformage**

Technique la plus utilisée pour obtenir de l'hydrogène, c'est environ 95% de la production globale (d'après les chiffres du CEA). L'hydrogène est produit à partir des combustibles fossiles. Le reformage consiste à casser les molécules d'hydrocarbure, dès lors qu'elles sont chauffées et exposées à la vapeur d'eau à haute température, pour libérer le dihydrogène qu'elles contiennent.

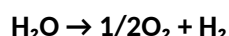
Bien que l'hydrogène soit pur à 99,9 % avec cette méthode d'après les chiffres d'AirLiquide, l'inconvénient du reformage est qu'il rejette du CO₂. Pour continuer d'utiliser cette méthode et pour qu'elle soit la plus inoffensive possible, il faudrait trouver une méthode (telle que la photosynthèse) permettant d'absorber le CO₂.

- **La gazéification**

Cette technique permet de transformer des matières organiques (notamment la biomasse) en un gaz, via l'injection en quantité contrôlée d'un agent oxydant, composé majoritairement de monoxyde de carbone et d'oxygène. (cf annexe 1.1)

- **L'électrolyse**

L'électrolyse de l'eau est un procédé qui décompose l'eau liquide en dihydrogène et dioxygène gazeux à l'aide d'un courant électrique circulant dans l'eau. L'énergie électrique fournie est alors transformée en énergie chimique. Le courant décompose la molécule H₂O en ions H₃O⁺ et HO⁻. Les protons acceptent ensuite des électrons pendant l'oxydation et forment donc de l'hydrogène gazeux. L'électrolyse peut être résumée par l'équation suivante :



Lors de la production d'hydrogène par électrolyse, il faut tenir compte de la production d'électricité (son prix et émissions de gaz à effet de serre). Cette méthode permet de produire de faibles volumes d'hydrogène.

Une façon d'améliorer l'électrolyse serait de la faire à haute température, avec de la vapeur d'eau. Elle utiliserait ainsi moins d'électricité, car entre 700°C et 1000°C la cinétique est nettement améliorée. Cette technique pourrait, de plus, être couplée, par exemple, à des miroirs solaires qui concentrent les rayons (pour atteindre au moins 700°C).

3.1.3. **Comment pourrait-on produire l'hydrogène à l'avenir ?**

La recherche et développement travaille non seulement à l'amélioration des trois procédés existants, mais également à la mise au point de nouvelles méthodes de production, en ayant pour critères le rendement, le coût, l'écologie et la facilité d'utilisation.

- **Les cycles thermochimiques**

Comme pour l'électrolyse, le principe est de décomposer l'eau en oxygène et hydrogène, mais sans électricité. En effet, l'eau se décompose spontanément à très haute température, de l'ordre de 2500°C. Réaliser une succession de réactions chimiques à travers un cycle permet d'effectuer la réaction à 800-1000 °C, au lieu de 2500 °C. Parmi les 3000 cycles thermochimiques envisagés, le cycle iode/soufre est le plus prometteur.

L'inconvénient de ce procédé est qu'il nécessite de chauffer l'eau à haute température grâce à l'énergie nucléaire, le solaire étant peu efficace.

- **La bio-photolyse de l'eau**

La bio-photolyse de l'eau exploite la photosynthèse des micro-organismes. Habituellement, cette réaction permet aux plantes, à partir de dioxyde de carbone, d'eau et de lumière, de produire des glucides et de l'oxygène. Mais dans des conditions précises : milieu anaérobie et privé de soufre, les algues vertes unicellulaires et les cyanobactéries, éclairées, produisent de l'hydrogène grâce à l'hydrogénase.

Cette enzyme catalyse de façon réversible la conversion des ions H⁺, protons obtenus par oxydation de l'eau, en dihydrogène, selon la réaction : 2H⁺+2e⁻=H₂.

Cependant, l'hydrogénase est sensible au dioxygène, produit en parallèle lors de la photosynthèse. La bio-photolyse de l'eau est donc un phénomène transitoire, la synthèse de l'hydrogène est rapidement inhibée.

- **Autres procédés en cours de recherche**

D'autres méthodes sont en cours de recherche, pour un hydrogène toujours plus écologique et économique. On peut citer la photo-électrolyse, qui permet de produire de l'hydrogène en éclairant un composant électronique immergé dans de l'eau. Mieux encore, on parle d'hydrogène naturel. En effet, les instituts de recherche comme l'Ifremer ont la preuve de la présence de gisements d'hydrogène sur Terre, notamment grâce à des émanations d'hydrogène dans les océans. Mais, pour accéder à ces sources océaniques, il faut descendre à 4000 mètres de profondeur.

3.1.4. Étude sur les électrolyseurs

1 Le modèle PEMPower 1-Eco

On complète notre étude théorique par une étude expérimentale avec la PEMPower 1-Eco. Ce modèle comprend un panneau solaire qui transforme l'énergie solaire en énergie électrique, un réservoir d'eau, un électrolyseur, qui transforme l'énergie électrique en énergie chimique, par la production d'hydrogène. S'ajoutent à ces éléments un réservoir à hydrogène, une pile à combustible (PAC) qui permet d'obtenir de l'électricité à partir de l'hydrogène, et enfin une hélice approvisionnée électriquement. Le panneau solaire et l'hélice peuvent être remplacés.

Les détails de la pile à combustible et de son fonctionnement sont donnés dans la partie 3.3.1.

A partir de ce modèle, nous voulons produire de l'hydrogène pour finalement obtenir de l'électricité en sortie. Le récit de nos expérimentations est disponible en fin de partie 3.3.3.

2 L'alimentation en électricité

Nous avons cherché des moyens autres que le panneau solaire pour fournir de l'électricité à notre électrolyseur. La condition est de fournir au plus 2W. À titre de comparaison, un batteur électrique consomme entre 200 et 500 W. L'énergie éolienne nous a paru une meilleure alternative, du fait de sa facilité apparente de mise en place, que l'énergie géothermique, la biomasse ou l'énergie hydraulique. Nous avons donc commencé à chercher des modèles pédagogiques d'éolienne, chez Horizon. Nous nous sommes heurtés au manque d'informations disponibles, notamment sur la puissance délivrée. Nous avons également contacté un professeur, M. Didier Lemosse, pour finalement constater qu'une éolienne fournissant une si faible puissance est difficile à trouver.

Lorsque nous nous sommes aperçus que notre modèle ne fonctionnait pas correctement, nous avons abandonné cette requête et nous sommes tournés vers les kits complets de PAC, chez les fournisseurs Horizon et Fischertechnik et sur Fuelcellstore. Le problème résolu, il n'y a pas eu à acheter un nouveau kit. Mais comme l'« épreuve des fils » nous a fait perdre du temps et de l'intérêt pour la manipulation, nous n'avons finalement pas remplacé le panneau solaire.

3 La production d'hydrogène avec un électrolyseur : comparaison d'électrolyseurs

Dans une PAC, il se passe exactement la réaction inverse de l'électrolyse. De ce fait, un électrolyseur et une PAC se composent des mêmes éléments (cf partie 3.3.1.). Pour résumer, un électrolyseur est composé d'une ou plusieurs cellules élémentaires nommées stack, empilement en anglais. Chacune comprend un assemblage membrane électrode (MEA), composé lui-même de deux électrodes, un catalyseur, et un électrolyte en membrane polymère échangeuse de protons (PEM).

Si l'on peut produire de l'hydrogène avec notre électrolyseur, qu'en est-il des autres électrolyseurs ? On réalise une étude afin de déterminer ce qui fait qu'un électrolyseur est plus performant qu'un autre, quelles caractéristiques influent sur le débit d'hydrogène en sortie, et comment. Entre autres, vaut-il mieux avoir un électrolyseur avec une seule grande cellule ou plusieurs petites ? Comment optimiser le débit massique et avoir une électrolyse plus efficace ?

- **Réalisation d'un tableau comparatif d'après le site <https://www.fuelcellstore.com/>**

Pour ce faire, on consulte le site <https://www.fuelcellstore.com/> et on réalise un tableau dans lequel on compare les différents électrolyseurs en vente selon leurs caractéristiques (taille d'une cellule active, nombre de cellules élémentaires, puissance à apporter à l'électrolyseur, débit d'hydrogène obtenu...). Le débit d'oxygène n'est pas indiqué dans le tableau, puisqu'il est toujours égal à la moitié du débit d'hydrogène. Le tableau est fourni en annexe 1.2.

Pour exploiter les données, on choisit une seule unité par grandeur. Les températures sont en degré Celsius et les pressions en barg (bar gauge) et psig (pound-force per square inch gauge) sont converties en bar. On mesure la capacité d'un électrolyseur à la quantité d'hydrogène gazeux produit et non au volume, sinon il suffirait de détendre le gaz le plus possible. Mais, les fournisseurs indiquent le débit volumique d'hydrogène produit, et non le débit massique. Pour s'affranchir de la température et de la pression, on exprime ainsi le débit en cm^3/min dans les conditions standards (sccm), à savoir 20°C et 1013 mbar .

On se focalise sur trois colonnes : la surface totale active (S en cm^2), produit du nombre de membranes (MEA) par la taille d'une seule cellule. Ensuite, le débit d' H_2 en conditions standards (D en cm^3/min s IE sccm). Et enfin, la puissance nominale (P en W), puissance à fournir à l'électrolyseur en fonctionnement optimal, ou à défaut, la puissance maximale.

- **Exploitation des données**

De façon générale, D augmente avec S et P . On dresse un premier graphique montrant la variation de P en fonction de D . On établit alors des régressions linéaire, polynomiale de degré 2, exponentielle, logarithmique. Les comparaisons des différentes équations et coefficients de détermination permettent de déduire que P et D sont liés par une relation linéaire : $P=a \times D$ ici $a=0,329\text{ W/sccm}$. Mais si l'on regarde les petits électrolyseurs comme Electrolyzer Hardware Round 450, la puissance maximale est de 80W pour un débit de 450 sccm , ce qui donne $a=0,18\text{ W/sccm}$. Il y a un manque de précision, qui a plus d'impact sur les petites valeurs : on n'est pas à $100\text{ cm}^3/\text{min}$ près pour C30 HydrogenGeneration System ($D=537000\text{ sccm}$), mais pour Electrolyzer Hardware - Square ($D=350\text{ sccm}$), si.

Afin que les gros électrolyseurs « n'avalent » pas les petits modèles pour la modélisation, on se concentre sur les petits modèles. Le tracé du graphe $D=f(S)$ révèle un profil linéaire. Mais, les courbes d'équation $P=f(D)$ et $P=f(S)$ sont difficiles à modéliser : les valeurs sont trop étalées, pour le premier, une régression linéaire donne un coefficient de détermination d'environ $0,33$.

On décide donc de regarder le tableau tel quel. D'après les deux déclinaisons de Electrolyzer Hardware - Square, pour S donnée, on aura le même débit qu'il y ait plusieurs petites membranes ou une grosse. Pourtant, on pourrait penser qu'une grande membrane permet de limiter les effets de bord ou coin et éviter les interactions des plaques bipolaires. La meilleure efficacité de la forme ronde par rapport à la forme carré va dans ce sens. En effet, pour une membrane de 50 cm^2 , l'ElectrolyzerHardare Round produit jusqu'à $450\text{ cm}^3/\text{min}$ contre 350 pour le modèle carré. La nature du courant (si on accroit le nombre de membranes alors on amplifie la puissance en augmentant la tension, et si on augmente la taille en augmentant l'intensité), l'encombrement ou encore la durabilité (si une membrane montée en dérivation est en panne, les autres continuent de fonctionner) sont autant de critères à prendre en compte.

En outre, on peut souligner que l'hydrogène obtenu avec un électrolyseur affiche une pureté inégalable, 99.9995% pour HydrogenGeneration System de Proton Onsite.

L'étude est à prendre avec du recul, étant donné qu'il manque des informations dans le tableau. Par ailleurs, certaines tailles de membranes ont été déterminées à partir d'une photographie, et les conversions sont aussi assorties d'une marge d'erreur.

L'analyse ne permet pas de déterminer si, à puissance fournie égale, deux électrolyseurs de capacités différentes produisent de l'hydrogène avec le même débit massique.

On peut retenir qu'augmenter le nombre de stacks permet d'augmenter le débit d'hydrogène. Et, les trois grandeurs P, D et S sont proportionnelles entre elles, mais pour une gamme d'électrolyseurs donnée. Ainsi $P=a \times D=a \times b \times S$ avec a et b des constantes positives, mais qui dépendent de la gamme. Il y a donc d'autres paramètres à prendre en compte, tels que l'efficacité du catalyseur ou le matériau de la membrane polymère de l'électrolyte.

- **La membrane électrolyte : un point à améliorer pour augmenter le débit**

Cette dernière est généralement en Nafion pour un électrolyseur ou une PAC PEM. Elle doit conduire facilement les ions mais pas les électrons. En plus de la conductivité ionique, les critères à prendre en compte pour le choix de la molécule sont la facilité à l'obtenir chimiquement, sa durée de vie (10000 heures pour le Nafion en pile) et sa tenue mécanique. Ce dernier point fait défaut au Nafion, qui perd ses propriétés au-delà de 80°C. Une voie consiste alors à créer des membranes composites, mais ce n'est qu'un des axes de recherche afin d'optimiser le fonctionnement des électrolyseurs.

Actuellement, produire de l'hydrogène est un moyen porteur d'espoir pour résoudre les problèmes énergétiques majeurs. En dehors de la biomasse, les seules techniques de production non polluantes sont celles basées sur la décomposition de l'eau. Elles produisent un hydrogène pur en ne rejetant que de l'oxygène.

Parmi elles, seule l'électrolyse est déjà employée. Mais reste d'une part le souci d'améliorer le fonctionnement des électrolyseurs : le rapport (Débit de l'hydrogène produit/Puissance fournie) doit être le plus grand possible, et l'électrolyseur fonctionnel suffisamment longtemps pour ne pas créer trop rapidement des déchets. Et d'autre part, l'accès à l'électricité pose question, l'électricité d'origine renouvelable semble la meilleure voie mais reste à développer.

3.2. Le stockage de l'hydrogène

- **Contextualisation**

De nos jours, l'un des plus grands problèmes que rencontrent les entreprises dans le domaine des énergies est le stockage de ces dernières. En effet, il est possible de piloter une centrale nucléaire ou une centrale à charbon et ainsi gérer la production pour répondre aux besoins des populations en temps réel. Mais la plupart des énergies renouvelables (EnR) ne se pilotent pas. On ne peut pas prévoir la production de notre centrale photovoltaïque ou éolienne de façon exacte et décider d'augmenter celle-ci car quand il y a plus de demande sur le réseau d'énergie électrique : les EnR sont dépendantes des conditions météorologiques. Il y a des intermittences dans la production et le moyen de palier à celles-ci est de savoir stocker l'énergie.

Nous nous sommes donc intéressés aux différents moyens de stocker l'hydrogène afin de pouvoir utiliser la source initiale d'énergie (solaire, vent) à tout moment mais aussi de pouvoir la transporter du lieu d'où elle est produite jusqu'au lieu où celle-ci sera transformée.

En France les capacités de stockage de gaz sont 300 fois plus importantes que celles du réseau électrique (137 TWh contre 0,4). En revanche, la production de l'hydrogène est assez coûteuse et ce constituant est extrêmement inflammable et corrode de nombreux systèmes d'alliages, les fragilisant. Il faut donc prendre de grandes précautions lors de sa manipulation.

- **Contraintes techniques et solutions**

L'hydrogène ou plutôt dihydrogène (H_2) existe sous 4 phases (solide, liquide, gazeuse et plasma), il se trouve à l'état naturel sous forme gazeuse. Il est très léger (11 fois plus que l'air que nous respirons) et volumineux. Aux conditions normales de température et de pression (CNTP), la masse volumique de l'hydrogène est d'environ 0,09 g/L. Si nous souhaitons stocker 1 kg d'hydrogène dans ces conditions il nous faudrait alors un volume de 11 m³. Or, 1 kg d'hydrogène permet aujourd'hui de parcourir 120 km en voiture mais un réservoir de voiture peut contenir au maximum 80 litres de carburant. Si l'on utilisait l'hydrogène comme carburant en remplissant notre réservoir (aux CNTP) nous pourrions alors parcourir 0,85 km.

Ainsi, la principale contrainte de ce vecteur énergétique est l'encombrement: il est nécessaire de réduire le volume qu'occupe l'hydrogène lorsqu'on souhaite le stocker. Nous n'allons pas nous attarder sur la forme plasma car cette dernière est quasi-impossible à atteindre.

3.2.1. *Les différentes formes de stockage*

1 *Forme gazeuse*

Dans un premier temps, nous avons cherché les solutions de stockage de l'hydrogène gazeux étant donné que c'est l'état sous lequel on le produit.

- **Stockage à basse pression**

Ce type de stockage est celui qui nous est le plus familier au quotidien. Il faut comprimer l'hydrogène jusqu'à 200 bars et le mettre dans des bouteilles de gaz en acier. Cependant sous cette pression on ne peut stocker que peu d'hydrogène (55 litres pour 1 kg).

- **Stockage sous haute pression**

Les industriels ont donc décidé d'utiliser des réservoirs dits de type III et IV sous une pression de 700 bars où la taille du réservoir reste raisonnable pour stocker des quantités de gaz suffisantes pour faire avancer un véhicule de particulier. (Autonomie 500-600 km → 4-5 kg d'hydrogène).

Ces réservoirs doivent répondre aux contraintes spécifiques que l'hydrogène impose en terme de sécurité. Il est le plus petit des atomes existant dans l'Univers et la mise sous haute pression présente des dangers en terme de fuites du réservoir ou de fissures de celui-ci.

En conséquence, les réservoirs sont composés d'une enveloppe étanche, d'une structure composite, d'une couche de protection ainsi que d'une soupape de sécurité.

Le stockage de l'hydrogène sous forme gazeuse existe donc mais celui-ci ne propose pas de solution viable pour stocker et déplacer des centaines de kilos d'hydrogène. Sous cette forme, nous pouvons néanmoins équiper des moyens de transport tels que les voitures ou les bus.

D'autres solutions ont donc été envisagées pour le transport de masse. En effet, les liquides et solides sont des phases condensées donc elles permettront de réduire l'encombrement et ainsi stocker plus d'hydrogène dans un volume plus réduit.

2 *Forme liquide*

Pour liquéfier l'hydrogène, il faut le porter à une température de -253 °C. Ainsi, il existe des unités de liquéfaction.

Une fois le changement d'état effectué, le réservoir doit maintenir la température du liquide contenu grâce à des "cryostats" (réservoirs à double paroi). Dans un premier temps, on protège des apports de chaleur par conduction directe en faisant le vide dans la paroi. Dans un second temps, on protège des apports par rayonnement avec une fine couche (multi-feuille) métallique réfléchissante.



figure 2 : Liquéfacteur Linde à Leuna (2008)

Cette solution n'est pas pleinement satisfaisante car les apports thermiques sur notre hydrogène liquide sont inévitables puisqu'il y a entre 0,2% et 0,3% qui s'évapore.

Voir annexe 2.1 pour les recherches actuelles à ce sujet.

3 Forme solide

Les scientifiques ont cherché à stocker l'hydrogène sous sa forme solide afin de tenter de s'affranchir des différentes contraintes rencontrées dans le cas du gaz et du liquide.

L'une des innovations majeures a été initiée par la société McPhy qui stocke l'hydrogène sous forme de galette d'hydrures métallique à basse pression (10 bars sont nécessaires et suffisants pour provoquer l'absorption d'hydrogène par le métal, la réaction effectuée est exothermique). C'est l'hydrure de magnésium ($Mg + H_2 = MgH_2$) qui est utilisé par cette entreprise.

Entreposer l'hydrogène sous forme solide présente de nombreux avantages :

L'hydrogène peut exploser lorsqu'il est sous forme gazeuse à plus de 200 bars et s'enflammer lorsqu'il est liquide tandis que les galettes d'hydrure ne présentent pas ce problème.

Les problèmes d'encombrement sont réduits car la masse volumique de l'hydrogène sous cette forme est de 106 g/L (la phase solide est la plus condensée des 3 phases de la matière).

Par ailleurs, cette innovation permet de stocker à court terme comme à long terme notre vecteur énergétique, sans perte de matière dans le temps comme dans le cas du liquide.

En outre, le magnésium est un métal peu cher dont l'impact environnemental est faible.

Aujourd'hui, stocker sous cette forme semble être idéal mais présente néanmoins des inconvénients.

Il est possible de retransformer ces disques pour produire de l'électricité, c'est-à-dire séparer le magnésium et l'hydrogène. Cependant, les coûts de cette opération restent importants actuellement car il faut apporter de la chaleur aux hydrures de magnésium. De plus, ces disques sont bien plus lourds que les gaz comprimés ou les liquides cryogéniques. Par exemple, pour équiper un véhicule automobile, il faudrait utiliser 250 kilos de galettes d'hydrure.


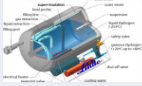
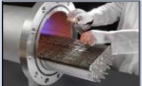
Etat	Pression bar	Température °C	Capacité kg/m ³ matériau	Capacité % masse H ₂ /système	Sécurité
Gaz comprimé 	350-700	25°C	45	6	Haute P
Liquide cryogénique 	1	-253 °C	70	6	Cryogénique Evaporation
Solide (hydrures métalliques) 	1-10	25°C	100	2	Basse P

figure 3 : Tableau récapitulatif des moyens de stockage de l'hydrogène utilisés.

Aujourd'hui, aucun de ceux-ci n'est idéal. Les industriels font en fonction de leurs besoins et choisissent la solution la plus adaptée pour leurs applications.

Afin de pérenniser l'hydrogène en tant que vecteur énergétique, les recherches effectuées sur son stockage sont essentielles pour trouver une meilleure alternative qui serait moins coûteuse et moins encombrante tout en proposant un niveau de sécurité optimal.

3.2.2. Power to gas

La technologie *Power to Gas* est une solution d'avenir. En effet, cela consiste à convertir l'électricité en gaz combustible grâce à l'électrolyse de l'eau pour produire du dihydrogène (fonctionnement de la pile à combustible). Ensuite, par la réaction de méthanation pour produire du méthane (le CO₂ utilisé lors de cette méthode est lui-même renouvelable grâce à la purification du biogaz). Ces gaz seront ensuite transportés dans les réseaux de gaz naturel pour les stocker (puis convertis directement en électricité via la pile à combustible) ou utilisés dans différents usages (chauffage, eau chaude, mobilité). De plus, étant donné la présence de réseaux de gaz déjà existant, aucune nouvelle infrastructure ne sera nécessaire.

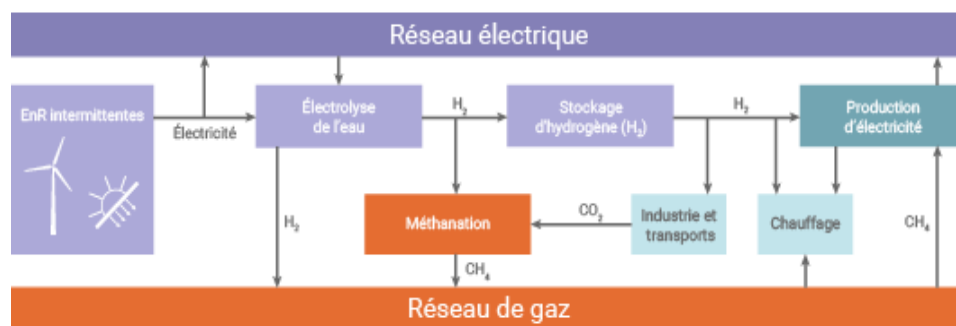


figure 4 : Schéma de principe du Power-to-Gas

Ainsi, le Power to Gas est nettement plus intéressant lorsqu'il permet de transformer l'électricité issue des énergies renouvelables dont la difficulté est le stockage du surplus. En effet, les énergies renouvelables fonctionnent par intermittence.

Le Power to Gas facilitera donc l'intégration des énergies renouvelables intermittentes dans le mix énergétique et augmentera la part du renouvelable dans la consommation finale.

Le potentiel du Power to Gas est estimé à 30 TWh (térawatt-heure= 10^{12} Watt-heure) par an d'après l'ADEME (l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie) pour la France métropolitaine à l'horizon de 2035. Cette technique s'impose donc comme la solution de stockage des excédents de longue durée. En effet, les possibilités de valorisation des excédents d'électricité sont démultipliées par leurs usages finaux quels que soient l'espace temporel et spatial.

- **Enjeux et perspective de développement**

Projet GRHYD

Le projet GRHYD (**G**estion des **R**éseaux par l'injection d'**H**ydrogène pour **D**écarboner les énergies) lancé en 2014, réunissant une douzaine de partenaires français dont Engie et porte sur une durée de 5 ans. Il permet de tester l'injection d'hydrogène produit à partir d'électricité renouvelable dans le réseau de distribution de gaz naturel sur le territoire de Dunkerque. Ce projet est le premier à mettre en application le concept du Power to Gas.

Le premier démonstrateur concerne les transports avec la mise en place d'une station de bus GNV adaptée au mélange hydrogène-gaz naturel. Pour des raisons de sécurité, le volume en hydrogène dans le mélange ne peut pas excéder les 20 %.

Ensuite, le second démonstrateur porte sur l'injection d'hydrogène dans le réseau local de distribution de gaz naturel d'un quartier de Dunkerque (Cappelle-la-Grande) pour alimenter une centaine de logements.

Projet Jupiter 1000

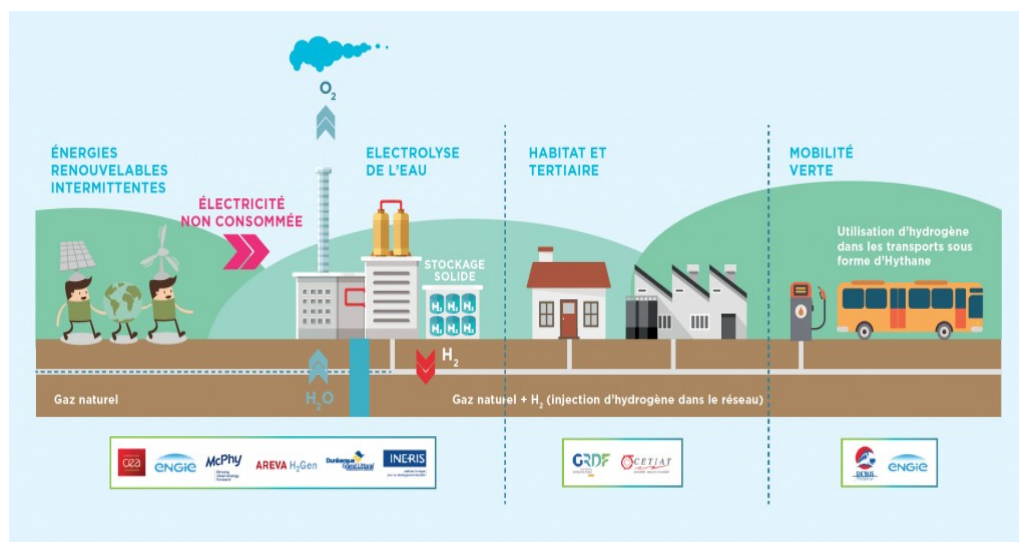


figure 5 : Le Projet Jupiter 1000 schématisé

Jupiter 1000 est le deuxième projet de démonstrateur industriel de Power to Gas en France à Fos sur Mer (Bouches sur Rhône) avec une puissance de 1 MWe (mégawatt électrique). Il a été officiellement lancé par GRTgaz, filiale d'ENGIE et mis en service en 2018 pour 3 ans de fonctionnement et 30 millions d'euros de budget. Il a pour but de stocker sous forme de gaz l'électricité produite par les filières renouvelables et de capter le CO₂ dans des fumées d'usine.

Pour cela, le projet utilise un couplage de Power to Gas avec la méthanisation. Cette combinaison donnera du méthane de synthèse (25 m³ par heure) qui est de nouveau exploitable pour la mobilité.

Ces deux projets sont actuellement toujours en cours d'exécution.

3.3. Les utilisations de l'hydrogène

Dans cette partie traitant des utilisations de l'hydrogène, nous nous intéresserons aux principales utilisations de celui-ci en tant que vecteur énergétique. Pour cela, nous commencerons par détailler ce qu'est la technologie de la pile à combustible en étudiant son principe de fonctionnement et ses différents composants. Puis, nous parlerons dans un second temps des secteurs dans lesquels l'hydrogène est employé.

3.3.1. Technologie de la pile à combustible

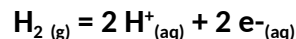
La pile à combustible que nous étudions est un système qui permet de convertir du dihydrogène (H_2) en énergie électrique, en chaleur et en eau. C'est un générateur d'électricité mais aussi de chaleur. La pile à combustible est constituée d'un empilement d'éléments anode-électrolyte-cathode reliés par l'intermédiaire de plaques bipolaires formant un « stack » qui signifie « tas », « pile » en anglais.

- **Principe de la pile à combustible :**

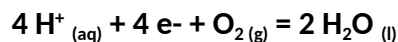
Le principe de fonctionnement d'une pile à combustible consiste en l'oxydation d'un combustible au niveau de l'une des électrodes et de la réduction de l'oxydant sur l'autre électrode.

Dans le cas de la pile à combustible à hydrogène, le dihydrogène constitue le combustible et le dioxygène le comburant. Les couples oxydant/réducteur mis en jeu sont alors : H^+/H_2 et O_2/H_2O .

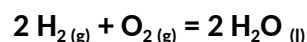
Dans un premier temps, l'hydrogène qui est alimenté par un réservoir, est oxydé au niveau de l'anode. Et les protons sont transportés à travers l'électrolyte vers la cathode selon la réaction :



Ensuite, les électrons passent de l'anode à la cathode et se recombinent avec les protons et le H_2 réagit avec O_2 provenant de l'air ambiant qui se réduit, pour former H_2O .



Finalement, l'équation globale de la PAC à hydrogène a pour équation globale :



Ainsi, on produit à partir d'hydrogène et d'oxygène, de l'eau, de l'électricité et de la chaleur. Cela s'apparente à la réaction inverse de l'électrolyse de l'eau.

Cependant, afin de rendre possible le déplacement des protons H^+ , il est primordial d'humidifier la membrane car le transfert des protons est assuré par l'eau située sur celle-ci. De plus, un manque d'eau sur la membrane provoque de plus faibles performances et peut lui causer des dommages irréversibles. Inversement, une trop grande quantité d'eau noie les électrodes et bloque l'arrivée du gaz.

Ainsi, un taux d'humidité trop faible augmente la résistance alors qu'un taux élevé bloque les pores et donc réduit l'activité catalytique. Dans les deux cas, le rendement sera diminué.

On remarque également grâce à l'équation globale que la pile à combustible ne rejette que de l'eau avec pour réactifs H_2 et O_2 . Ainsi, elle peut être considérée comme une source d'énergie propre.

Mais dans certaines piles à combustibles, les électrodes sont séparées par un électrolyte qui ne sont efficaces qu'à partir d'une certaine température. Cela nécessite donc un préchauffage. Nous concernant, les PAC PEMFC fonctionnent pour une échelle de température allant de 25 à 90 °C qui est une étendue de température proche de l'ambiant.

Cependant la chaleur peut aussi être considérée comme un autre aspect positif puisque ce rejet de chaleur peut être récupéré afin d'alimenter un générateur thermique et donc augmenter son rendement. Ce type de procédé s'appelle un « cogénérateur ».

- **Constitution de la pile à combustible :**

Il existe de nombreux types de piles à combustibles (PAC). Nous nous intéresserons ici à la pile à combustible à membrane échangeuse de protons : PEMFC, (Proton Exchange Membrane Fuel Cell) soit en anglais : SPEFC (Solid Polymer Electrolyte FuelCell) ou IEMFC (Ion Exchange Membrane FuelCell).

Cette pile à combustible est constituée de :

- Un électrolyte ;
- Deux électrodes ;
- Plaques de diffusion ;
- Plaques bipolaires.

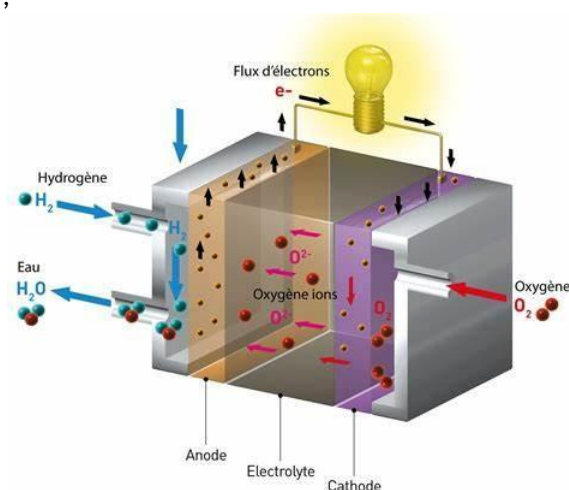


figure 6 : Empilement des composants de la PAC

Nous nous sommes intéressés en détail à ces différents composants en annexe 3.1.

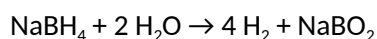
3.3.2. Domaines d'utilisation de l'hydrogène

1 Domaine portable (cf annexe 3.2)

Contrairement aux autres piles à combustible qui sont pour la plupart de grandes tailles. Il existe aujourd'hui des piles à combustibles miniaturisées pouvant ainsi être utilisées dans le domaine de la téléphonie. Mais aussi, dans les ordinateurs ou tout autre objet nécessitant une batterie portable que l'on peut regrouper sous le terme PDA (Personal Digital Assistant).

Les PAC de ce domaine ont une puissance allant de 100mW à 1kW et fonctionnent à température ambiante.

Il existe aujourd'hui sur le marché, deux technologies de PAC permettant l'utilisation de ce procédé au sein de PDA que ce sont la PEMFC et la DMFC. Cependant, il faut stocker l'hydrogène. Ceci se fait par différentes manières : sous forme liquide, sous forme d'iodure métallique, sous forme de méthane ou sous forme d'une solution de NaBH₄ qui produit du dihydrogène grâce à la réaction :



Mais nous pouvons trouver de nombreux inconvénients à l'utilisation des PAC dans ce domaine dont le majoritaire est la faible autonomie d'environ 3 heures pour les ordinateurs. De plus, le coût est

relativement élevé comparé aux piles ordinaires. Et enfin, la recharge pose de nombreux problèmes car elle nécessite une batterie externe ou un générateur d'hydrogène.

2 Transports

La pollution atmosphérique, le bruit et les encombrements ne sont que quelques-uns des nombreux dommages sur l'environnement que l'on peut citer causés par les transports. Et ils peuvent se produire à tous les stades, de la production à la mise hors service. S'élevant à 35 % des émissions globales, le secteur des transports est le premier émetteur de dioxyde de carbone (CO₂) en France avec des émissions qui sont passées de 110,7 à 120,4 milliards de tonnes entre 1990 et 2011 selon l'ADEME.

L'utilisation de l'hydrogène à travers la pile à combustible notamment se démarque comme étant une solution alternative très prometteuse dans un but de réduction des différents types de pollutions liées aux transports. Toutefois, la production d'hydrogène en amont est énergivore et peut entraîner une émission de gaz à effet de serre. Dans cette partie, nous verrons plusieurs applications de l'hydrogène en tant que nouveau vecteur énergétique.

3 Domaine terrestre

Le domaine des transports terrestres s'annonce être le plus vaste en terme d'applications de l'hydrogène. En effet, des compagnies ont déjà anticipé la problématique liée à l'émission massive de GES pendant que d'autres commencent petit à petit à travailler leur transition vers l'hydrogène. C'est notamment au Japon qu'une volonté de « société hydrogène » voit le jour, basée notamment sur un objectif de 100% de voitures fonctionnant à l'hydrogène. Celles-ci peuvent fonctionner selon des technologies différentes que nous allons décrire.

- **Les voitures à pile à combustible**

Comme décrit précédemment, la PAC permet d'obtenir un courant électrique sans utiliser d'énergies fossiles. Cette technologie est la plus présente à ce jour dans le domaine des transports car elle permet un rendement très satisfaisant tout en conservant un impact moindre sur l'environnement. C'est notamment ce système que l'entreprise française Hype utilise pour démocratiser son réseau de taxis électriques (*cf annexe 3.3.*)

- **Le moteur à combustion hydrogène**

Le moteur à explosion est basé sur une réaction explosive qui entraîne un piston exactement comme le fait un moteur classique à essence ou diesel. Celui-ci convertit l'énergie chimique de la réaction explosive entre le dihydrogène et le dioxygène en énergie mécanique suivant la même équation que la PAC.

Le principal intérêt d'un tel moteur est que l'on peut garder le moteur de sa voiture fonctionnant à l'essence, au diesel, etc. Malheureusement cette méthode présente à ce jour plusieurs défauts majeurs tels que la distribution de l'hydrogène au sein du moteur, complexe dû à son état gazeux et l'autonomie des batteries.

C'est pour ces raisons que pour le moment aucune voiture fonctionnant avec cette technologie n'est disponible sur le marché, celles-ci ne faisant pas le poids face aux piles à combustible ou aux hybrides.

- **Autres**

Il existe à ce jour de nombreux autres moyens de transports fonctionnant avec une PAC tels que les bus, les vélos et les trains. Les principaux projets européens sont dirigés par Pragma Industries et quelques entreprises multinationales. Nous avons détaillé quelques exemples de projets en annexe 3.4.

4 Les domaines aéronautique et spatial

Dès les années 70, l'hydrogène est utilisé sous sa forme liquide, comme carburant dans l'industrie spatiale. Depuis, il fait l'objet de nombreuses recherches et montre un fort potentiel pour le secteur aéronautique pour la production d'électricité. Les évolutions technologiques récentes permettent de considérer l'hydrogène comme une énergie d'avenir pour l'aéronautique, notamment en devenant la principale source à bord des avions pour les fonctions non propulsives.

La principale difficulté technique pour stocker de l'hydrogène à bord d'un avion est de respecter les contraintes en termes de masse et de volume. En effet, les réservoirs doivent être légers et compacts, ce qui influe fortement sur leur géométrie et leur intégration. Parallèlement à ces difficultés d'architecture, la sécurité du système doit être garantie afin de prévenir d'éventuelles fuites pouvant conduire à un risque d'explosion. Comme dans les autres secteurs les systèmes de stockage (hydrures ou réservoirs) et d'alimentation (piles à combustible) restent chers comparés aux systèmes classiques fonctionnant au kérosène.

HES EnergySystems, une entreprise basée à Singapour, a dévoilé en 2017 son projet d'avion électrique à l'hydrogène qui est une grande réussite pour le moment d'après les premiers retours. (cf annexe 3.5)

5 Le domaine maritime

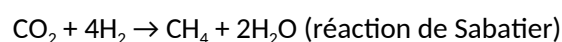
La pile à combustible est là encore utile pour la propulsion d'un navire ou d'un sous-marin. Sur le plan militaire, la réduction du bruit, des vibrations et de la signature thermique qu'engendre l'utilisation de la pile se révèle être un atout important. En ce sens de nombreux projets de recherche existent avec l'utilisation de différentes technologies de piles, permettant d'utiliser des combustibles plus conventionnels. De plus, le rendement d'une PAC étant plus important, elle permet une autonomie des batteries plus élevée, ce qui permettrait à un sous-marin de rester plus longtemps dans les profondeurs.

D'un autre côté, sur le plan touristique la pile devient un argument de vente séduisant les voyageurs ecofriendly. L'entreprise norvégienne Viking est en train de développer le premier paquebot de croisière à hydrogène sur ce principe. Cette embarcation reprendrait les mêmes caractéristiques de jauge brute (47 832 tonnes) et de capacité (9 330 passagers et 440 équipiers) que l'actuelle flotte de Viking Cruise mais avec un saut technologique immense. Le ravitaillement en hydrogène lors des longues croisières sera effectué par des petits bateaux externes.

6 Méthanation

La méthanation est un procédé industriel consistant à faire réagir du dihydrogène H_2 avec du dioxyde de carbone (CO_2) ou du monoxyde de carbone (CO) afin de produire du méthane (CH_4).

Une réaction de méthanation a pour équation bilan :



Un avantage de la méthanation est de revaloriser le « synga » qui est un mélange d'hydrogène, de monoxyde de carbone et de dioxyde de carbone obtenu par gazéification du charbon.

3.3.3. Expérience

L'objectif de notre expérience est dans un premier temps de se familiariser avec le système de pile à combustible PEMPower 1-Eco présent dans la salle de projet (cf caractéristiques des différentes parties, annexe 3.6). Ce modèle simplifié de PAC industrielle se constitue comme ci-contre :

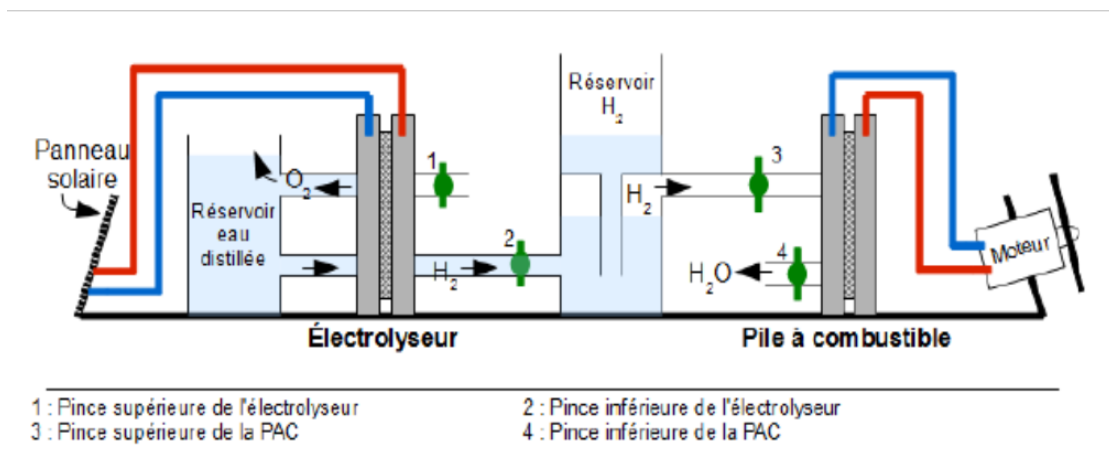


figure 7 : Schématisation de la PEMPower 1-Eco

- 1ère expérience

Avec l'aide du protocole mis à disposition avec la pile nous avons donc démarré la production d'hydrogène à l'aide du générateur. La pile a été bien humidifiée et nous nous sommes assurés que la tension du générateur ne dépasse pas les 2V maximum autorisés.

Après une attente de 7 min, nous observons les premières bulles. Cette durée nous a paru très grande devant celle obtenue les années précédentes. Nous nous sommes donc interrogés sur les causes de cette production ralentie (10 cm^3 en 40 min devant 9 min l'an dernier). Faut-il mouiller la membrane de l'électrolyseur ? Faut-il fournir une tension inférieure au début puis graduellement monter jusqu'à 1.9V?

- 2ème expérience

Lors de cette 2ème expérience, nous allons tenter de remplacer le générateur de courant par la lampe, malgré l'échec de la semaine passée. Malgré les précautions prises et la présence de M. Honoré à nos côtés, nous n'obtiendrons aucun résultat. Nous envisageons donc de booster la production sur le départ avec le générateur, pour ensuite le remplacer par la lampe une fois la production lancée. Ceci car nous savons d'après la 1ère expérience que l'hydrogène arrive à être produit, doucement, avec le générateur à 1.9V.

- 3ème expérience

Avec l'aide de M. Honoré et après avoir contacté des anciens élèves nous avons trouvé la cause du problème. En effet, les fils de branchement que nous utilisions étaient de diamètre trop fin pour laisser passer le courant jusqu'à l'électrolyseur. Nous avons donc procédé à l'expérience prévue.

Protocole :

- Nous avons commencé par brancher le multimètre en parallèle aux bornes de la pile à combustible pour contrôler que la tension ne dépasse pas 1.9V.
- Nous avons ensuite rempli d'eau distillée les deux réservoirs prévus à cet effet.
- Nous avons pris soin d'humidifier la membrane de la pile pour assurer le bon fonctionnement de celle-ci.
- Nous avons branché le générateur à l'électrolyseur à une tension de 1.85V

- On attend ensuite que le réservoir d'hydrogène se remplisse, toutes vannes fermées. Passé 35 cm³, nous avons effectué une première purge du réservoir et de la membrane avec l'hydrogène, c'est-à-dire que nous avons ouvert toutes les vannes afin de laisser l'hydrogène circuler dans la membrane. L'eau est alors retombée dans le réservoir. Pendant la production, nous avons relevé le temps tous les 5cm³ de H₂ produits dans le but de déterminer un flux de production.

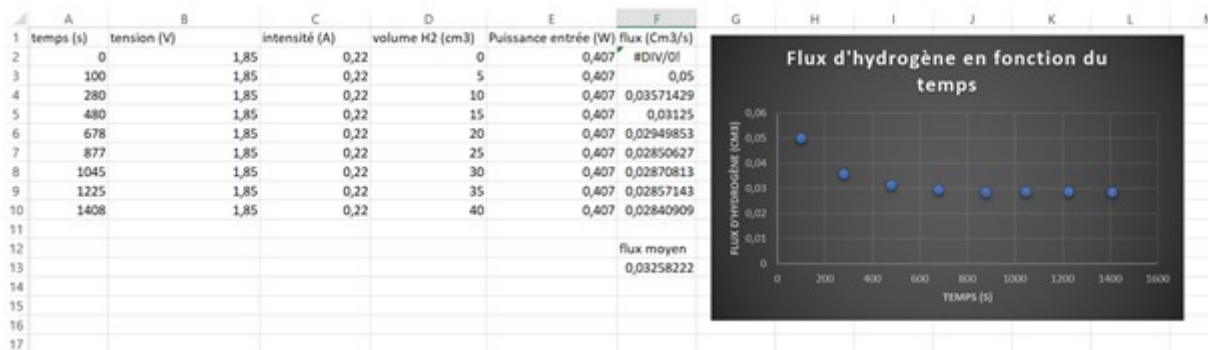


figure 8 : Relevé des caractéristiques électriques et du débit d'hydrogène au cours du temps

Le débit moyen obtenu est de 0.035 cm³/s.

- 4ème expérience

Lors de cette quatrième et dernière expérience, nous avons cherché à obtenir le temps nécessaire pour faire tourner le moteur et l'hélice situés après la pile. Pour ce faire, nous avons suivi le même protocole que dans l'expérience 3, en modifiant un paramètre. En effet nous ne cherchions plus à quantifier la production de H₂ donc nous nous sommes axés sur des relevés de tensions à la sortie de la pile. La tension nécessaire pour faire tourner la pale est de 400mV.

Voici la courbe montrant l'évolution de la tension en sortie moyen de la pile en fonction du temps.

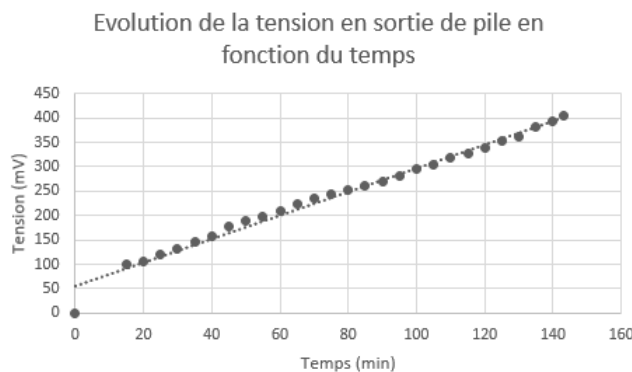


figure 9 : Evolution de la tension en sortie de la pile, en fonction du temps

On remarque donc une progression linéaire de la tension dans le temps. La pale se met à tourner au bout de 142 min (2h22).

On remarque donc que la production et l'utilisation de l'hydrogène est un processus peu rapide si l'on utilise une seule pile. Cette expérience nous a permis de mettre en évidence la capacité à créer du courant via la molécule d'hydrogène. Mais gardons en tête qu'ici, notre source d'énergie était un générateur à 1.85V, poussant ainsi la productivité de la pile à son maximum. Donc pour créer de l'électricité verte, le processus sera indéniablement plus long...

3.4. L'acceptabilité de l'hydrogène

Nous définirons, dans ce chapitre, l'acceptabilité comme l'ensemble des conditions concrètes de réalisation qui font qu'une technologie est conforme à l'usage naturel dans une société donnée.

Cependant de nombreuses autres définitions de l'acceptabilité sociale relative à une innovation ont été données par des auteurs scientifiques dont quelques-unes sont dans l'annexe 4.1.

Ainsi nous en déduisons que l'acceptabilité sociale dépend des individus et fait appel à leurs perceptions, leurs valeurs, et leurs attitudes propres. Il est difficile de pouvoir satisfaire toutes les demandes et objections vis-à-vis de la technologie en question. Néanmoins, si elle correspond à des demandes d'une majorité de potentiels futurs usagers, alors elle sera très certainement acceptée.

3.4.1. L'usage quotidien de l'hydrogène dans l'histoire moderne

- **Historique / Introduction**

L'hydrogène est présent dans les villes, pour une utilisation quotidienne, depuis environ 1820.

La peur de l'hydrogène est récente. En effet, aujourd'hui les moyens de communication sont plus avancés, les informations circulent mieux qu'à l'époque. Les populations savent notamment que l'hydrogène s'enflamme très vite et assez facilement, qu'il présente des risques d'explosion en particulier parce qu'il peut passer par la moindre fissure. Toutefois, ces informations ne sont pas assez précises, la connaissance de l'hydrogène est approximative, ce qui contribue à augmenter la méfiance des populations vis-à-vis de ce gaz.

- **Les accidents**

Il existe de nombreux exemples d'incidents et d'accidents liés à l'utilisation de l'hydrogène.

Le plus connu est très probablement l'incendie du dirigeable LZ 129 Hindenburg en 1937. Ce dernier était gonflé au dihydrogène et propulsé par 4 moteurs diesel. Lors de son atterrissage, le dirigeable s'est enflammé très vite et a tué 35 personnes.

Un autre exemple est celui de la centrale nucléaire de Fukushima. Celle-ci avait un défaut de refroidissement des réacteurs qui a entraîné d'importants rejets radioactifs. Cela a conduit à un important dégagement d'hydrogène qui a continué de s'accumuler. Plusieurs explosions ont alors eu lieu dans les réacteurs. Cependant, peu de personnes semblent savoir que la réaction dans les réacteurs est due à de l'hydrogène.

De plus, depuis les années 1950, les essais de plusieurs pays sur la bombe H peuvent effrayer. En effet, cette bombe est très puissante, son énergie est équivalente à celle de 14000 tonnes de TNT.

Ces accidents contribuent à attiser la peur dans la société vis-à-vis de l'utilisation de l'hydrogène.

Cependant les accidents ne sont jamais sans cause, les accidents industriels dus à l'hydrogène (fuites non détectées, incendie ou explosion) sont très souvent conséquences d'un problème humain ou matériel.

3.4.2. L'utilisation de l'hydrogène dans le futur

- **L'hydrogène, une molécule particulièrement inflammable**

La molécule de H_2 est la plus petite molécule qui existe (74,14pm) avec les masses molaire (2,0158g.mol⁻¹) et volumique gazeuse (0,09kg.m⁻³) les plus faibles. Elle a une propagation rapide dans l'air par rapport à d'autres gaz.

Nous pouvons d'ailleurs comparer la molécule de dihydrogène avec le méthane, molécule que l'on retrouve dans le gaz naturel.

Tout d'abord, l'hydrogène a un domaine d'explosivité très étendu. Il peut brûler dès lors qu'il est présent dans une proportion de 4 % et ce jusqu'à 75 %. En effet, un combustible brûle dès lors qu'il est en proportion stœchiométrique (29,53 % lorsqu'il est dans l'air), ou avec un excès ou un déficit léger pour qu'il y ait tout de même un équilibre entre combustible et comburant. Quant au méthane, il ne peut brûler que si sa proportion est comprise entre 5,3 et 15 %.

En outre, sa flamme se propage environ 7 fois plus vite que celle du méthane, 260 cm.s^{-1} contre 37 cm.s^{-1} et ceci est dû à son haut coefficient de diffusion. Ce dernier mesure le rapport entre le flux molaire (lié à la diffusion moléculaire), et le gradient de concentration de l'hydrogène ou du méthane dans notre cas.

- **L'hydrogène dans notre vie quotidienne ?**

Utiliser l'hydrogène dans la vie quotidienne nécessiterait un travail de grande ampleur pour adapter la réglementation actuelle aux applications éventuelles de l'hydrogène.

Ce travail consisterait en la définition de règles strictes d'usage en terme de sécurité technique, humaine et organisationnelle.

Par exemple, le stockage gazeux de l'hydrogène nécessite d'installer un réservoir de 150 litres, pesant 100 kg et pressurisé à 700 bars, pour avoir une autonomie comparable à celle du pétrole.

Cependant, une utilisation à cette pression énorme de 700 bars soulève des problèmes de sécurité considérables, en effet, l'industrie utilise aujourd'hui des pressions toujours inférieures à 43 bars.

Pour répondre à ces problématiques et éviter les accidents, certaines mesures ont été pensées comme la formation du personnel aux procédures de manipulation, des mesures en continu du taux d'hydrogène dans l'air, et l'utilisation de matériaux étanches et résistants aux chocs.

3.4.3. Les obstacles de l'acceptabilité

- **Le développement de projets**

Aujourd'hui, de nombreuses villes et régions veulent utiliser l'hydrogène pour ses propriétés non polluantes. Des projets tels que la mise en place de transports à hydrogène sont donc lancés un peu partout dans le monde et notamment en France.

Cependant, les projets développés à partir de l'hydrogène sont trop peu visibles, du moins comparés à des projets comme ceux de l'ESA menés par Thomas Pesquet en 2017. Ceci est donc, d'une certaine façon, un frein à l'acceptabilité, du fait du peu de communication sur ce sujet.

Tout comme de nombreux pays ont développé la mobilité électrique nécessaire à la réduction des émissions (CO_2 , NO_x , particules) notamment dans les transports, ils développent à présent les technologies relatives à l'hydrogène. Cependant, rien ne garantit que les populations de ces pays adhèrent et acceptent d'utiliser ces technologies à partir des énergies renouvelables.

Par ailleurs, développer l'hydrogène serait une offre pour l'économie française qui investit, au travers de laboratoires et d'entreprises dans ce domaine, de nombreuses recherches sont en cours.

La France a développé d'excellentes technologies dans ses centres de recherche, elle doit donc maintenant les déployer dans l'industrie pour développer les emplois, réussir la transition énergétique et améliorer la qualité de vie des Français.

L'acceptation sociale de ce vecteur énergétique résulte majoritairement de l'analyse des risques, des pollutions, et des coûts, mais aussi parfois des controverses et des rêves qu'il suscite auprès des populations.

3.4.4. **Expérimentation – Sondage (cf annexe 4.2)**

Nous avons décidé de recueillir l'avis d'un maximum de personnes sur le sujet de l'hydrogène.

Nous avons posé 9 questions sur ce sujet se rapportant au coût, à la fiabilité des technologies, notamment se rapportant à l'hydrogène dans la vie quotidienne (transports routiers).

Nous avons recueilli 274 réponses.

Le public que nous visons était le plus large possible (de lycéen à retraité mais aussi dans tous domaines d'études ou de travail), l'objectif étant de récolter les avis les plus divers possibles pour avoir un aperçu le plus global possible de l'acceptation de l'hydrogène dans la société.

Les réponses que nous avons eu proviennent majoritairement d'étudiants entre la 1ère et la 5ème année d'études (55,8%), mais aussi de professionnels (36,7 % dont 4,7 % de jeunes professionnels).

Parmi ces personnes 55,6 % travaillent ou étudient dans un domaine qui se rapporte à la science ou à l'ingénierie. Cependant, d'après le reste des réponses, on voit que ces personnes ne sont pas pour autant informées sur les technologies relatives à l'hydrogène.

En effet, nous leur avons demandé de comparer les moteurs à hydrogène à ceux électriques classiques, actuellement commercialisés, ainsi qu'aux diesels et essence et les réponses apportées montrent que les votants ne savent pas juger la différence d'utilisation. Respectivement 42,3 % et 35,8 % des personnes répondent « ne sais pas » aux questions.

Néanmoins, ce n'est pas pour autant que la recherche sur l'hydrogène est refusée. Au contraire, 85 % n'y sont pas opposés, 13,9 % ne savent pas et seules 3 personnes interrogées (1,1 % des voies) sont contre.

Deux qualificatifs sont très donnés pour décrire une technologie qui se rapporte à l'hydrogène, ce sont les adjectifs innovante (58 %), écologique (53,6 %). Viennent ensuite deux autres idées un peu moins répandues : dangereuse (21,5%) et économique (17,2%). Douze personnes n'ont cependant aucune idée de la manière de qualifier une technologie qui fonctionne avec de l'hydrogène.

Nous avons ensuite axé nos questions sur l'éventuel achat d'un véhicule à hydrogène.

La question qui divise le plus est celle de la date d'achat en supposant qu'il soit disponible dans le commerce à des prix concurrentiels aux voitures actuelles. Nous avons divisé les réponses en 4 tranches de plusieurs années.

La plupart des personnes, 51,5 %, achèteraient une voiture à hydrogène dans 3 à 9 ans. Cependant 11,7 % l'achèteraient dès maintenant et pour 13,9 % ce serait dans 1 à 2 ans. On peut mettre en lien ce résultat avec l'âge moyen des personnes correspondant à celui d'étudiant dans des proportions similaires. Il semble donc assez légitime qu'un étudiant d'une vingtaine d'année n'achète une voiture que dans plus de 3ans, qu'elle soit traditionnelle ou électrique.

Au contraire, 13,5 % des sondés seraient prêts à en avoir seulement dans plus de 10 ans et 9,5 % envisagent de ne jamais en acheter.

Si la question d'acheter un nouveau véhicule par prime de reprise de l'ancien se posait, 49,3 % de personnes donneraient leur ancien véhicule, seulement 10,9 % ne le feraient pas et 39,8 % n'ont pas d'idée sur la question (soit 109 personnes !).

Et enfin, si le choix entre hydrogène et « traditionnel » (essence, diesel ou électrique) se présente, 58% restent sur un véhicule traditionnel mais tout de même 42 % (soit 115 personnes) en achèteraient un à hydrogène, comme on peut le voir ci-dessous.

Vous devez acheter un véhicule neuf prochainement, à prix et options égaux, opteriez-vous pour un véhicule à hydrogène ou un véhicule « traditionnel » ?

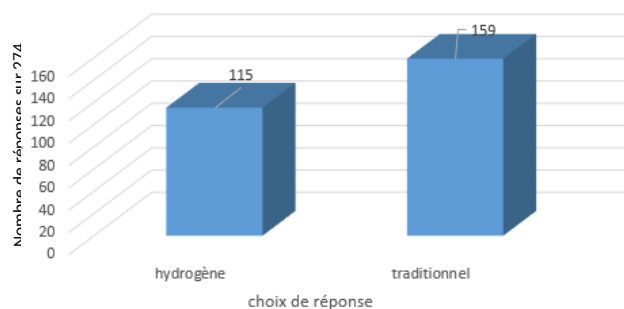


figure 10 : Répartition des réponses à la question n°10 – sondage acceptabilité

Les motivations des personnes qui resteraient sur le choix d'un véhicule « traditionnel » en grosse majorité sont le manque de connaissances de la technologie (63,7%) ou encore de stations à hydrogène (54,3%). Les autres arguments qui ressortent sont le sentiment de sûreté (12,8%) et la préférence des habitudes (8,0%).

On peut déduire de ce sondage qu'il y a une corrélation entre la connaissance de la technologie de l'hydrogène et son acceptation.

4. CONCLUSION

Au cours de nos échanges, de nos découvertes nous nous sommes rendus compte de ce que le travail en projet peut nous apporter en tant qu'individus, nous avons pu en apprendre plus sur nous-mêmes et notre capacité à travailler avec d'autres élèves-ingénieurs mais aussi consolider notre culture scientifique. Ainsi, le projet que nous avons mené est avant tout une expérience humaine dont le support est l'hydrogène.

Aujourd'hui, l'hydrogène est un vecteur énergétique viable, il nous semble être un bon levier pour la transition énergétique vers laquelle l'ensemble de notre société se dirige. Il pourrait ainsi résoudre le problème de l'intermittence des énergies renouvelables.

Par ailleurs, de nombreux travaux de recherche sont réalisés autour de l'hydrogène et il est d'ores et déjà utilisé comme carburant pour les voitures et les bus. Le plus difficile reste d'adapter les solutions trouvées en laboratoire aux exigences de productivité, de coût et de transport du monde de l'entreprise. Cependant, il faudra du temps pour que celles-ci soient adoptées par les industriels et le grand public.

En effet, l'hydrogène reste peu connu et appréhendé du grand public.

En définitive, l'hydrogène est une solution d'avenir et nous espérons en entendre parler de plus en plus au cours de notre carrière. En tant qu'ingénieur en savoir plus sur ce sujet est essentiel au vu de notre responsabilité sociétale et environnementale.

Par ailleurs, devoir communiquer autour de notre projet de physique est un exercice (poster, soutenance orale, rapport) qui nous rendra service. De nos jours, nous entendons régulièrement dans les médias pratiquement toutes les catégories socio-professionnelles (médecins, infirmiers, professeurs, commerciaux ...), une seule manque à l'appel : l'ingénieur qui pourtant se doit de vulgariser son travail et de le partager à ses concitoyens. Si celui-ci communique mieux, alors il pourra mieux faire accepter les innovations aux membres de la société qui l'entourent.

5. BIBLIOGRAPHIE

Couverture :

<https://alkaway.com/blog/all-the-best-tips-on-using-hydrogen-tablets/> [valide le 12/06/2019]

Introduction :

Méziane BOUDELLAL. *La pile à combustible - 2e éd. L'hydrogène et ses applications*. Dunod, 2012.

J-M AGATOR, J. CHERON, C. NGO, G. TRAP. *Hydrogène Energie de demain ?* Omniscience, 2008

https://fr.wikisource.org/wiki/Page:Jules_Verne_-_L'E2%80%99%C3%8ELe_myst%C3%A9rieuse.djvu/318 [valide le 23/05/2019]

<https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/vecteur/81232/locution?q=vecteur+%C3%A9nerg%C3%A9tique#176747> [valide le 23/05/2019]

<http://www.cea.fr/multimedia/Documents/publications/livrets-thematiques/livretHydrogene2013-web.pdf> [valide le 23/05/2019]

Partie 1.1 :

<https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/energies-renouvelables-en-france-chiffres-cles-2018> [valide le 14/03/2019]

<https://fr.wikipedia.org/wiki/Hydrog%C3%A8ne> [valide le 14/03/2019]

<http://www.airproducts.fr/industries/Energy/Power/Power-Generation/hydrogen-basics.aspx> [valide le 14/03/2019]

<http://www.cea.fr/multimedia/Documents/publications/livrets-thematiques/livretHydrogene2013-web.pdf> [valide le 14/03/2019]

<https://fr.wikipedia.org/wiki/Mol%C3%A9cule> [valide le 14/03/2019]

Partie 1.2 :

<http://www.cea.fr/multimedia/Pages/editions/livrets-thematiques/l-hydrogene.aspx> [valide le 7/03/2019]

http://www.cea.fr/comprendre/pages/energies/renouvelables/essentiel-sur-hydrogene.aspx?g_d95f407e_befb_4ec1_ad72_d86d264dd6fd=2 [valide le 7/03/2019]

<https://fr.wikipedia.org/wiki/Hydrog%C3%A8ne> [valide le 7/03/2019]

<https://www.h2life.org/fr/hydrogene/sources/vaporeformage> [valide le 7/03/2019]

<https://fr.wikipedia.org/wiki/Dihydrog%C3%A8ne> [valide le 7/03/2019]

<http://www.gazeification.info/> [valide le 7/03/2019]

<http://www.afhycac.org/documents/tout-savoir/Fiche%203.2.1%20-%20Electrolyse%20de%20l%27eau%20revjanv2017%20ThA.pdf> [valide le 7/03/2019]

https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89lectrolyse_de_l%27eau [valide le 7/03/2019]

<https://energies.airliquide.com/fr/mediatheque-planete-hydrogene/comment-produire-lhydrogene> [valide le 7/03/2019]

Partie 1.3 :

<https://fr.wikipedia.org/wiki/Hydrog%C3%A8ne> [valide le 14/03/2019]

<https://www.industrie-techno.com/article/l-hydrogene-naturel-future-source-d-energie.42054> [valide le 14/03/2019]

<https://www.planete-energies.com/fr/medias/decryptages/comment-fabriquer-l-hydrogene> [valide le 14/03/2019]

<https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/hydrogene-energie> [valide le 14/03/2019]

<http://www.cea.fr/multimedia/Documents/publications/livrets-thematiques/livretHydrogene2013-web.pdf> [valide le 14/03/2019]

<https://energies.airliquide.com/fr/mediatheque-planete-hydrogene/comment-produire-lhydrogene> [valide le 14/03/2019]

https://www.ineris.fr/sites/ineris.fr/files/contribution/Documents/Techniques_prod_H2_web.pdf [valide le 14/03/2019]

https://www.college-de-france.fr/media/jean-marie-tarascon/UPL58650_hydrogenecollege.pdf [valide le 14/03/2019]

<http://www.afhypac.org/documentation/tout-savoir/> [valide le 14/03/2019]

https://www.econologie.com/file/technologie_energie/decomposition_eau_CEA.pdf [valide le 8/06/2019]

Partie 1.4 :

<http://doctord.webhop.net/Courses/BEI/EE361/PascoGreenPower.pdf> [valide le 16/05/2019] (manuel d'instructions de la PEMPower 1-Eco)

https://fr.wikipedia.org/wiki/Membrane_%C3%A9changeuse_de_protons [valide le 16/05/2019]

https://fr.wikipedia.org/wiki/Pile_%C3%A0_combustible_%C3%A0_membrane_d_%27%C3%A9change_de_protons [valide le 16/05/2019]

https://en.wikipedia.org/wiki/Proton-exchange_membrane [valide le 16/05/2019]

https://fr.wikipedia.org/wiki/Machine_synchrone [valide le 16/05/2019]

https://en.wikipedia.org/wiki/Membrane_electrode_assembly [valide le 16/05/2019]

<https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89lectrolyte> [valide le 16/05/2019]

<https://en.wikipedia.org/wiki/Nafion> [valide le 16/05/2019]

https://www.darty.com/nav/achat/petit_electromenager/beaute_feminine/seche_cheveux/index.html [valide le 16/05/2019]

https://www.darty.com/nav/achat/petit_electromenager/robots_cuisine/batteur/index.html [valide le 16/05/2019]

- <https://www.fuelcellstore.com/tutorial-basic?search=hydrogen> [valide le 11/04/2019]
- <https://www.fischertechnik.de/en/products/playing/profi/520401-profi-fuel-cell-kit> [valide le 11/04/2019]
- <http://www.horizonfuelcellshop.com/europe/product/solar-hydrogen-science-kit/?v=928568b84963> [valide le 11/04/2019]
- <https://www.conrad.fr/o/accouplements-darbre-1101149> [valide le 20/04/2019]
- <http://www.re-energy.ca/docs/hydroelectric-generator-cp.pdf> [valide le 20/04/2019]
- <https://www.fuelcellstore.com/hydrogen-equipment/educational-electrolysis> [valide le 2/05/2019]
- <https://www.fuelcellstore.com/hydrogen-equipment/laboratory-gas-generators> [valide le 2/05/2019]
- <https://mcphy.com/fr/nos-produits-et-solutions/electrolyseurs/petite-et-moyenne-capacite/> [valide le 2/05/2019]
- https://fr.wikipedia.org/wiki/Standard_Cubic_Centimeters_per_Minute [valide le 16/05/2019]
- https://fr.wikipedia.org/wiki/Conditions_normales_de_temp%C3%A9rature_et_de_pression [valide le 16/05/2019]
- <https://www.quora.com/What-are-the-differences-between-a-bar-and-a-barg> [valide le 16/05/2019]
- https://fr.wikipedia.org/wiki/Livre-force_par_pouce_carr%C3%A9 [valide le 16/05/2019]
- https://fr.wikipedia.org/wiki/Pied_cube_par_minute [valide le 16/05/2019]
- <https://fr.wikipedia.org/wiki/SCFM> [valide le 16/05/2019]
- <http://www.fclab.fr/thematiques/stockage-de-lelectricite-sous-forme-hydrogene/> [valide le 16/05/2019]
- https://www.ineris.fr/sites/ineris.fr/files/contribution/Documents/DRA-71_BENCHMARK%20PAC-30012017.pdf [valide le 23/05/2019]
- <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01775220/document> [valide le 23/05/2019]
- <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01201723/document> [valide le 23/05/2019] (thèse sur le Nafion)
- <http://www.afhypac.org/documents/tout-savoir/Fiche%203.2.1%20-%20Electrolyse%20de%20l%27eau%20revjanv2017%20ThA.pdf> [valide le 23/05/2019]
- <https://www.actu-environnement.com/media/pdf/news-26748-rapport-cgedd-cgeiet-hydrogene.pdf> [valide le 23/05/2019]
- http://www.palais-decouverte.fr/fileadmin/fileadmin_Palais/fichiersContribs/ressources-en-ligne/revue-decouverte/complements/343_dec_06/PMILLET_n343_p17-25_w.pdf [valide le 23/05/2019]
- <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00442970/document> [valide le 23/05/2019]

Parties 2.contextualisation, 2.2 et 2.3 :

- <https://mcphy.com/fr/vos-applications/power-to-gas/> [valide le 14/03/2019]

<https://www.engie.com/activites/gaz/hydrogene/power-to-gas/> [valide le 14/03/2019]

https://fr.wikipedia.org/wiki/Conversion_d%27%C3%A9lectricit%C3%A9_en_gaz
[valide le 14/03/2019]

https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/resume_etude_powertogas_ademe-grdf-grtgaz.pdf [valide le 14/03/2019]

<https://www.latribune.fr/entreprises-finance/industrie/energie-environnement/hydrogene-la-france-a-son-usine-de-production-d-electrolyseurs-582002.html> [valide le 14/03/2019]

<https://lenergeek.com/2014/07/03/lelectrolyse-pem-une-technologie-davenir-pour-areva-et-lademe-2/> [valide le 14/03/2019]

https://www.lemonde.fr/economie/article/2019/04/08/l-hydrogene-un-marche-en-devenir_5447191_3234.html [valide le 14/03/2019]

<https://www.engie.com/activites/gaz/hydrogene/power-to-gas/projet-demonstration-grhyd/>
[valide le 14/03/2019]

https://fr.wikipedia.org/wiki/Conversion_d%27%C3%A9lectricit%C3%A9_en_gaz [valide le 14/03/2019]

<http://grhyd.fr/presentation/> [valide le 14/03/2019]

<http://grhyd.fr/faq/hythane/> [valide le 14/03/2019]

<https://www.jupiter1000.eu/> [valide le 14/03/2019]

<https://www.engie.fr/actualites/jupiter-1000-premier-power-to-gaz-france/> [valide le 14/03/2019]

<https://www.gaz-mobilite.fr/actus/jupiter-1000-demonstrateur-power-to-gas-servir-mobilite-gnv-1863.html> [valide le 14/03/2019]

<https://www.connaissancedesenergies.org/stockage-delectricite-quappelle-t-le-power-gas-170908> [valide le 14/03/2019]

<https://www.connaissancedesenergies.org/power-gas-la-construction-de-jupiter-1000-officiellement-lancee-171220> [valide le 14/03/2019]

https://www.lemonde.fr/economie/article/2019/04/08/l-hydrogene-un-marche-en-devenir_5447191_3234.htm [valide le 14/03/2019]

Partie 2.1 :

<https://www.techniques-ingenieur.fr/actualite/articles/lhydrogene-ancre-dans-le-mix-energetique-en-2050-53726/> [valide le 14/03/2019]

<http://www.cea.fr/comprendre/Pages/energies/renouvelables/essentiel-sur-hydrogene.aspx>
[valide le 14/03/2019]

https://fr.wikipedia.org/wiki/Stockage_de_l'hydrog%C3%A8ne [valide le 14/03/2019]

<https://energies.airliquide.com/fr/mediatheque-planete-hydrogene/comment-stocker-lhydrogene> [valide le 14/03/2019]

<https://les-smartgrids.fr/revolution-hydrogene-stockage/> [valide le 14/03/2019] (Hydrosil ouverture)

http://www2.cnrs.fr/sites/communiqu/fichier/gp_presentation.pdf [valide le 14/03/2019]
(présentation cnrs stockage PAC)

<https://www.actu-environnement.com/media/pdf/news-26748-rapport-cgedd-cgeiet-hydrogene.pdf> [valide le 14/03/2019] (EnR classique + gazéification biomasse (combustion incomplète))

http://www.afhypac.org/documents/tout-savoir/Fiche%204.2%20-%20Stockage%20hydrog%C3%A8ne%20comprim%C3%A9_rev%20dec2016%20ThA.pdf [valide le 14/03/2019] (stockage réservoir type III et IV)

<https://www.ergosup.com/> [valide le 14/03/2019]

http://www.afhypac.org/documents/tout-savoir/Fiche%204.3%20-%20H2%20liquide%20rev_juillet2011Th%20A.pdf [valide le 14/03/2019]

<https://www.hydrogenious.net/index.php/en/hydrogen-2-2/> [valide le 14/03/2019] (liquide)

<http://erh2-bretagne.strikingly.com/blog/lohc-nouveau-procede-de-stockage-liquide-d-hydrogene-en-alleomag> [valide le 14/03/2019] (startup allemande : hydrogène dans un solvant organique)

http://www.cnrs.fr/publications/imagesdelaphysique/couv-PDF/IdP2011/13_De_Rango.pdf [valide le 14/03/2019] (startup allemande : hydrogène dans un solvant organique)

<https://moovely.fr/hydrogene-solide-solution-stockage-energetique-avenir/> [valide le 14/03/2019]

<https://energies.airliquide.com/fr/mediatheque-planete-hydrogene/comment-stocker-lhydrogene> [valide le 14/03/2019]

<https://www.techniques-ingenieur.fr/res/pdf/encyclopedia/42503210-in170.pdf> [valide le 14/03/2019]

Parties 3.1 et 3.3 :

<https://www.connaissancedesenergies.org/quest-ce-que-la-methanation-170905> [valide le 14/03/2019] (méthanation/power to gas)

<https://www.top-hydrogene.com/methanation> [valide le 14/03/2019] (idem)

<http://www.afhypac.org/documents/tout-savoir/Fiche%209.1%20-%20PAC%20dans%20le%20transport%20automobile%20revfev2018-thA.pdf> [valide le 14/03/2019] (automobile)

<http://pileacombustible.free.fr/utilisations.htm> [valide le 14/03/2019]

<http://www.afhypac.org/documents/tout-savoir/Fiche%205.2.1%20-%20Les%20PAC%20-%20revjuillet%202016ThA.pdf> [valide le 14/03/2019] (tout sur la PAC + applications : portable/stationnaire/transport)

<https://www.planete-energies.com/fr/medias/decryptages/les-multiples-utilisations-de-l-hydrogene> [valide le 14/03/2019]

<http://www.beep.ird.fr/collect/thies/index/assoc/HASH018c.dir/pfe.gm.0072.pdf> [valide le 14/03/2019] (thèse)

<https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/pile-a-combustible> [valide le 14/03/2019] (PAC)

<https://www.planete-energies.com/fr/medias/decryptages/les-differents-types-de-pile-combustible> [valide le 14/03/2019] (PAC)

<http://pileacombustible.free.fr/utilisations.htm> [valide le 14/03/2019] (applications de la PAC)

<http://pilesacombustibles.e-monsite.com/pages/application-de-la-pile-a-combustible/application-portable.html> [valide le 14/03/2019](application portable PAC)

<http://gaetan.delacheze.free.fr/pile-combustible/pile.html> [valide le 14/03/2019]

<https://www.jupiter1000.eu/projet> [valide le 14/03/2019] (Projet Jupiter 1000)

Partie 3.2 :

<http://moteur-hydro-tpe.e-monsite.com/pages/content/le-moteur-a-hydrogene/le-fonctionnement-du-moteur-a-hydrogene.html> [valide le 14/03/2019]

<https://hype.taxi/> [valide le 14/03/2019]

<https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/hydrogene-dans-les-transports> [valide le 14/03/2019]

<https://energies.airliquide.com/fr/mediatheque-planete-hydrogene/applications-lhydrogene> [valide le 14/03/2019]

<https://www.planete-energies.com/fr/medias/decryptages/les-multiples-utilisations-de-l-hydrogene> [valide le 14/03/2019]

<https://www.ademe.fr/expertises/mobilite-transports/elements-contexte/impacts-transports-lenvironnement> [valide le 14/03/2019]

<https://eashymob.normandie.fr/fr/eas-hymob/le-programme> [valide le 14/03/2019]

Partie 4 :

http://www.afhypac.org/documents/tout-savoir/fiche_1.2_donnees_physicochimiques_rev.mars_2013.pdf [valide le 16/05/2019]

http://www.afhypac.org/documents/tout-savoir/fiche_7.1_inflammabilite_explosivite_rev._fev_2015_ineris_bwe_pm.pdf [valide le 16/05/2019]

https://www.economie.gouv.fr/files/files/directions_services/cge/Rapports/2016_05_03_Filiere_hydrogene_energie.pdf [valide le 16/05/2019]

<http://www.smartgrids-cre.fr/index.php?rubrique=dossiers&srub=hydrogene&action=imprimer> [valide le 16/05/2019]

<https://www.strategie.gouv.fr/sites/strategie.gouv.fr/files/atoms/files/201-08-06na-fs-hydrogene-hd.pdf> [valide le 16/05/2019]

<https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00908226/> [valide le 23/05/2019]

<https://eduscol.education.fr/orbito/pedago/pileh2/pile31.htm> [valide le 27/05/2019]

À titre d'exemples,

Rapport de projet P6 2018 n°5-6 : L'hydrogène : vecteur énergétique du futur

Rapport de projet P6 2018 n°34 : Pile à combustible et applications

Rapport de projet P6 2017 n°40 : Pile à combustible et applications

En guise de vue d'ensemble,

Conférence : L'hydrogène tiendra-t-il ses promesses ? | 20ème Cycle 'Utilisation rationnelle de l'énergie et environnement' - 26 Mars 2019, organisée par SIA-CNAM, tenue par Pierre SERRE-COMBE du CEA et transmise en visioconférence au Coria

http://ledome.info/index.php?page=fiche_agenda&id_manifestation=2215 [valide le 2/05/2019] (renseignements sur les Mercredis de l'hydrogène à Caen)

6. ANNEXES

6.1. Partie 1 : La production d'hydrogène

6.1.1. *Gazéification*

La gazéification se divise en quatre étapes :

- le séchage du combustible entré.
- la pyrolyse : produit, à hautes températures et en absence d'agent oxydant, des matières volatiles (CO , CO_2 , H_2 , CH_4 , $\text{H}_2\text{O}_{\text{vap}}$ et hydrocarbures gazeux) et du charbon.
- la combustion : injection d'un agent oxydant qui oxyde les matières produites lors de la pyrolyse.
- la réduction (ou gazéification proprement dite) : convertit le charbon (carbone) en un gaz combustible riche en CO et H_2 .

6.1.2. *Étude comparative des électrolyseurs commercialisés*

Voici le tableau réalisé à l'aide d'un tableur, pour comparer différents électrolyseurs commercialisés sur <https://www.fuelcellstore.com/> :

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
7	Lien internet	Prix (€)	Modèle	Taille d'une membrane active (cm²)	Nombre de membranes	Surface totale active (cm²)	Débit maximal de H ₂ (cm³/min)	Pression (bar)	Température de fonctionnement (°C)	Débit en conditions standards (cm³/min s)	Puissance nominale (W) DC	Tension d'entrée (V)	Courant d'entrée (A)	Membrane électrolyte
8														
9			Electrolyseur de la PEM Power 1-Eco	16	1	16?						20-1,9	0-2	
10	https://www.fuelcellstore.com/hydrog	49,13	Horizon Mini PEM Electrolyzer FCSU-010	7	1	7	7					31,8-3		0,7
11														
12	https://www.fuelcellstore.com/hydrog	78,78	Electrolyzer Cell 5 E103 (H-TEC Education)	8	1	8	5					1,16		
13	https://www.fuelcellstore.com/hydrog	101,79	Electrolyzer Cell 10 E104 (H-TEC Education)	8	2	16	10					2,33		
14	https://www.fuelcellstore.com/hydrog	3319,31	Electrolyzer Hardware – Round 450 (Fuel Cell Store)	50	1	50		2120-55		450	80		2	40
15		5116,17	Electrolyzer Hardware – Round 900 (Fuel Cell Store)	50	2	100		2120-55		900	160		4	40
16		8674,47	Electrolyzer Hardware – Round 1800 (Fuel Cell Store)	50	4	200		2120-55		1800	320		8	40
17	https://www.fuelcellstore.com/hydrog	4186,76	Electrolyzer Hardware – Square (Fuel Cell Store)	5	10	50		1-4	35-75	350				
18		3759,23	Electrolyzer Hardware – Square (Fuel Cell Store)	50	1	50		1-4	35-75	350				
19	https://www.fuelcellstore.com/hydrog	464,7	QLC-60 PEM Electrolyzer Cell Stack	57	1	57	60				18		2	9 Nafion PFSA
20	https://www.fuelcellstore.com/hydrog	632,88	QLC-120 PEM Electrolyzer Cell Stack	57	2	114	120				36		4	9
21	https://www.fuelcellstore.com/hydrog	765,65	QLC-180 PEM Electrolyzer Cell Stack	57	3	171	180				54		6	9
22	https://www.fuelcellstore.com/hydrog	911,7	QLC-240 PEM Electrolyzer Cell Stack	57	4	228	240				72		8	9
23	https://www.fuelcellstore.com/hydrog	995,79	QLC-300 PEM Electrolyzer Cell Stack	150	1	150	300				90		2	45
24	https://www.fuelcellstore.com/hydrog	1270,19	QLC-500 PEM Electrolyzer Cell Stack	150	2	300	500				144		4	36
25	https://www.fuelcellstore.com/hydrog	2084,5	QLC-1000 PEM Electrolyzer Cell Stack	150	4	600	1000				288		8	36
26														

figure 11 : Tableau comparatif d'électrolyseurs (première partie)

Lien internet	Prix (€)	Modèle	Taille d'une membrane active (cm²)	Nombre de membranes	Surface totale active (cm²)	Débit maximal de H ₂ (cm³/min)	Pression (bar)	Température de fonctionnement (°C)	conditions standards (cm³/min s)	Puissance nominale (W)	Tension d'entrée (V DC)	Courant d'entrée (A)	Membrane électrolyte
https://www.fuelcellstore.com/hydrog	835,54	Horizon HydroFILL PRO				50		3110-40	1550		2310-19		PEM electrolysis cell
https://www.fuelcellstore.com/hydrog	1814,56	OL-150 PEM Hydrogen Generator				1500,2-4		5-45	600		90220/110		Nafion PFSA membrane
https://www.fuelcellstore.com/hydrog	2057,97	QL-300 PEM Hydrogen Generator				3000,2-4		5-45	1200		150		
https://www.fuelcellstore.com/hydrog	2602,34	QL-500 PEM Hydrogen Generator				5000,2-4		5-45	2000		300		
https://www.fuelcellstore.com/hydrog	4955,95	QL-1000 PEM Hydrogen Generator				10000,2-4		5-45	4000		500		
https://www.fuelcellstore.com/hydrog	8134,53	QL-2000 PEM Hydrogen Generator				20000,2-4		5-45	8000		1000		
https://www.fuelcellstore.com/hydrog	7895,54	Proton Onsite Laboratory Hydrogen Generator - G200				2004-9		5-40	1800		110120-230 VAC		Proton Exchange Membrane
https://www.fuelcellstore.com/hydrog	11197,2	Proton Onsite Laboratory Hydrogen Generator - G400				4004-9		5-40	3600		180		
https://www.fuelcellstore.com/hydrog	12569,1	Proton Onsite Laboratory Hydrogen Generator - G600				6004-9		5-40	5400		250		
https://www.fuelcellstore.com/hydrog		Proton Onsite Hydrogen Generator - S20						5-40	9000		3500208-240 VAC		
https://www.fuelcellstore.com/hydrog		Proton Onsite Hydrogen Generator - S40						5-40	18000		7000		
https://www.fuelcellstore.com/hydrog		C10 Hydrogen Generation System						315-40	179000		62000		PSA technology
https://www.fuelcellstore.com/c20-hy		C20 Hydrogen Generation System						315-40	358000		120000		
https://www.fuelcellstore.com/c30-hy		C30 Hydrogen Generation System						315-40	537000		174000		

NB : il a été jugé inutile d'ajouter une colonne débit d'oxygène produit car, pour chaque électrolyseur, celui-ci est égal à la moitié du débit d'hydrogène (ce qui est cohérent avec l'équation de l'électrolyse de l'eau)
Rappel des conditions standards de température et de pression : 20 °C et 1013 mbar

figure 12 : Tableau comparatif d'électrolyseurs (deuxième partie)

Courbes de tendance et régression :

- **D'abord avec tous les électrolyseurs du tableau pour lesquels les deux colonnes considérées sont remplies :**

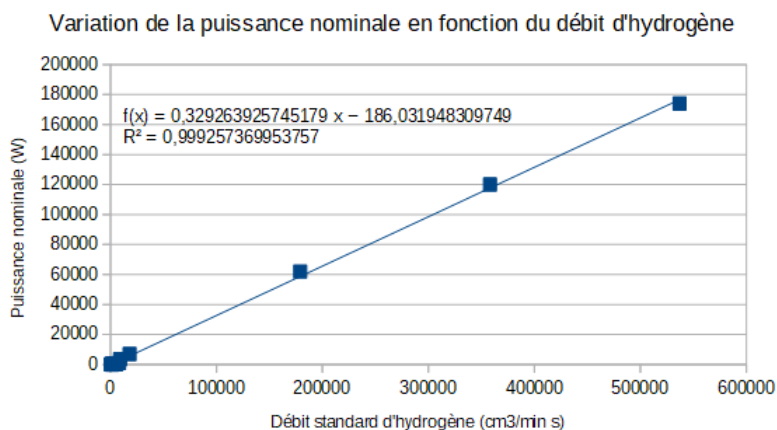


figure 13 : $P=f(D)$, régression linéaire

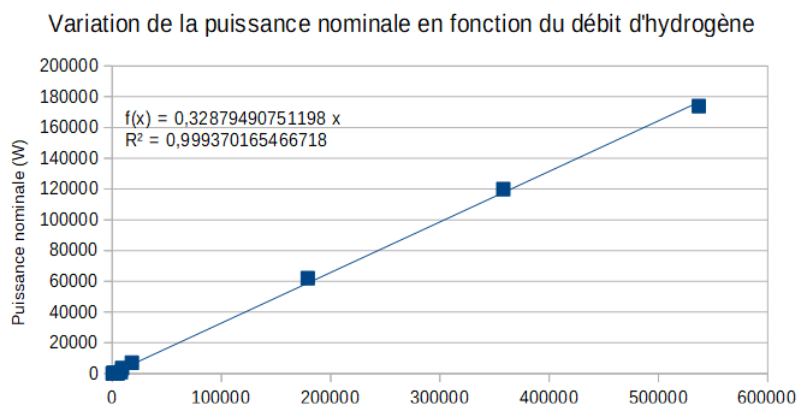


figure 14 : $P=f(D)$, régression linéaire, ordonnée à l'origine

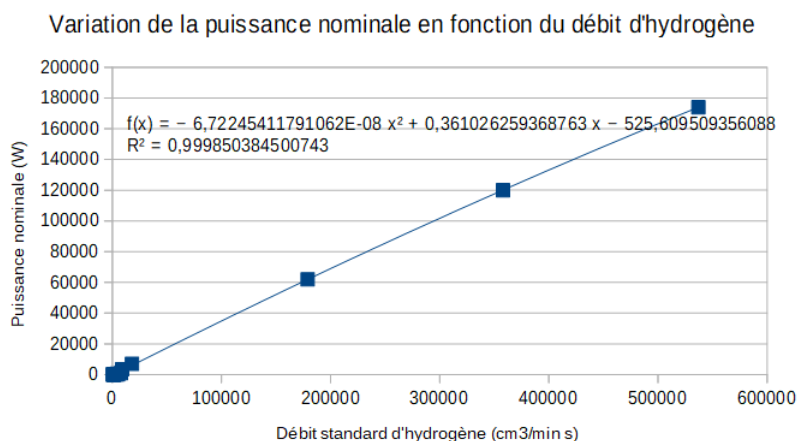


figure 15 : $P=f(D)$, régression polynomiale de degré 2

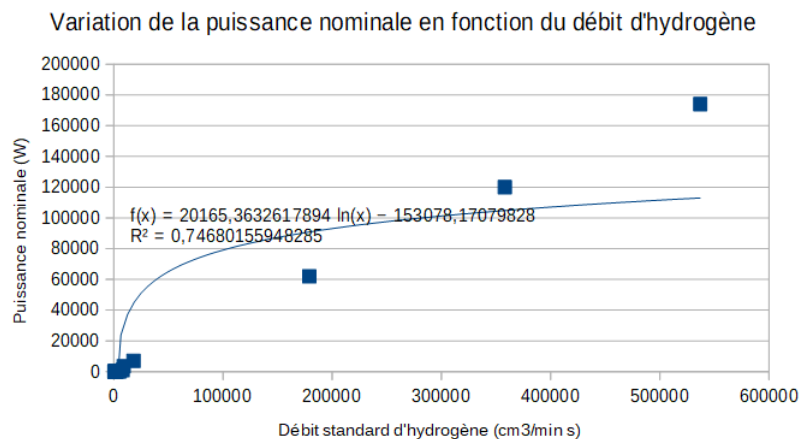


figure 16 : $P = f(D)$, régression logarithmique

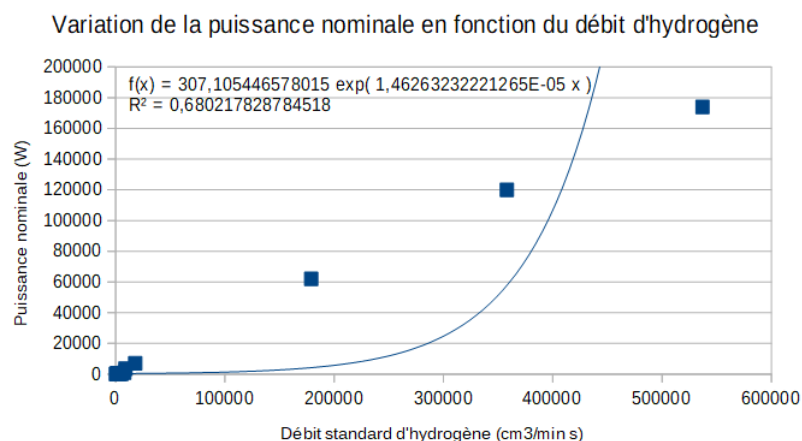


figure 17 : $P = f(D)$, régression exponentielle

- **Puis pour les électrolyseurs avec une puissance nominale d'au plus 500 W :**

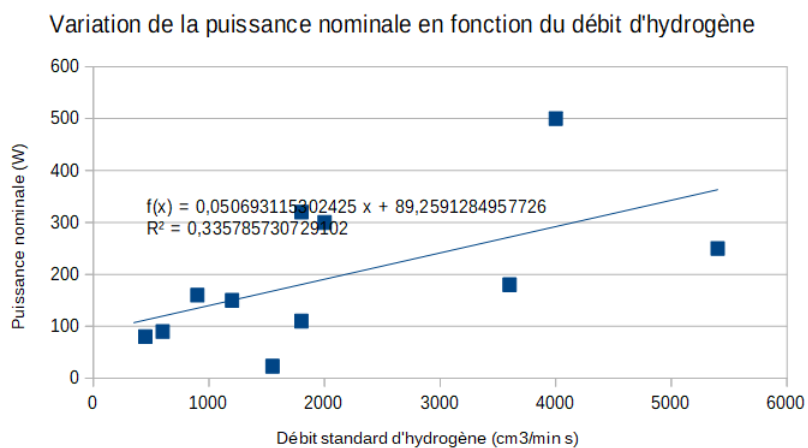


figure 18 : $P = f(D)$, régression linéaire

Variation du débit d'hydrogène en fonction de la surface active de l'électrolyseur

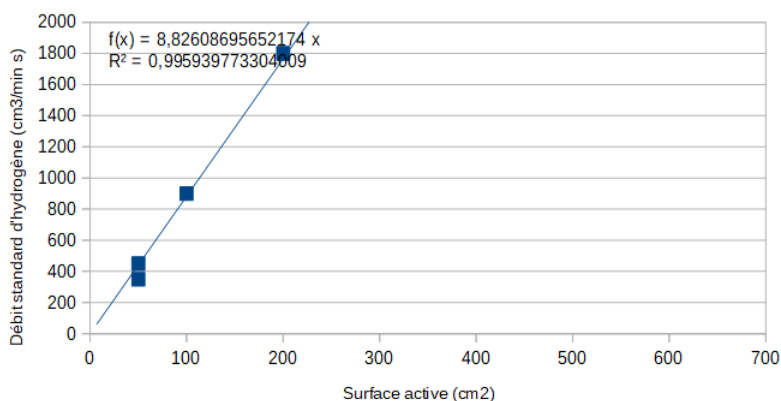


figure 19 : $D=f(S)$, régression linéaire, ordonnée à l'origine

Variation du débit d'hydrogène en fonction de la surface active de l'électrolyseur

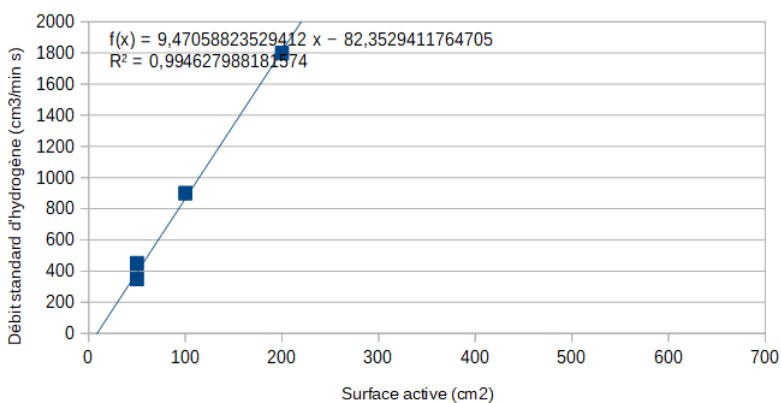


figure 20 : $D=f(S)$, régression linéaire

Variation de la puissance nominale en fonction de la surface active de l'électrolyseur

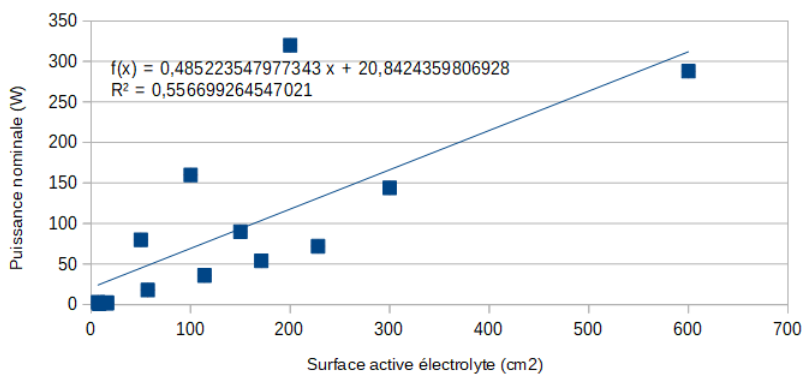


figure 21 : $P=f(S)$, régression linéaire

6.2. Partie 2 : Le stockage de l'hydrogène

6.2.1. Solution de stockage sous forme liquide

Aujourd'hui, beaucoup de solutions sont à l'état de recherche dans ce domaine et de nombreuses sociétés innovent. Par exemple, Hydrogenious (une start-up allemande) utilise des composés LOHC (liquidorganichydrogen carrier) permettant de stocker de grandes quantités d'hydrogène dans un petit volume.

Une autre startup Hysilabs a permis la création d'Hydrosil un vecteur énergétique liquide qui permettrait de stocker de l'hydrogène liquide à pression atmosphérique.

Plusieurs technologies arrivent sur le marché pour mieux stocker l'hydrogène mais celles-ci restent des promesses. Seul l'avenir pourra nous dire si une solution innovante et facilement implémentable a été trouvée dans le cas de l'hydrogène liquide.

6.3. Partie 3 : Les utilisations de l'hydrogène

6.3.1. Détail des différents composants de la PAC

- **Plaques bipolaires**

Les deux plaques bipolaires, placées sur les parties extérieures de la PAC (épaisseur du millimètre pour celles en graphite ou de la dizaine de millimètre pour celles en métal) permettent de relier les différentes cellules électriques. Elles ont différents rôles au sein d'une PAC.

Ces plaques servent dans un premier temps de maintien aux cellules élémentaires et les protègent des vibrations et toutes autres contraintes extérieures. Les plaques bipolaires approvisionnent également en gaz les électrodes. C'est pourquoi elles doivent être conçues de telle sorte à laisser passer les réactifs à travers elles par le biais de petits canaux.

Enfin ces plaques évacuent la chaleur due aux réactions et transmettent le courant électrique. Les plaques doivent être fabriquées à partir d'un matériau imperméable au gaz afin d'éviter toutes fuites ou réactions non voulues avec l'air mais aussi un matériau possédant une bonne conductivité à la fois thermique et électrique.

Ainsi, les plaques bipolaires servent à canaliser les gaz venant de l'extérieur, collecter le courant et gérer les flux d'eau au sein de la pile.

- **Plaques de diffusion (« backings »)**

Les plaques de diffusion entourent les électrodes et permettent comme leur nom l'indique la diffusion du gaz jusqu'aux électrodes mais aussi le transfert des électrons de l'anode à la cathode. Elles doivent donc être conductrices et poreuses.

- **Electrolyte**

L'électrolyte est une membrane qui retient les ions négatifs et laisse passer les ions H⁺ qui vont de l'anode vers la cathode. L'électrolyte doit toujours être humide et sa conductivité ionique dépend de la température. Ce type de membrane a une durée de vie allant de 3500 à 4500 heures si la température se situe entre 25 et 90 °Celsius.

- **Électrodes**

Les électrodes, souvent en platine, sont séparées l'une de l'autre par l'électrolyte et permettent de dissocier l'hydrogène et de transférer les protons vers l'électrolyte. Elles sont constituées d'un couple anode/cathode.

Chaque électrode est divisée en deux zones. La zone active et la zone de diffusion.

La première citée est l'endroit où a lieu la réaction, au niveau de la membrane dite électrolyte. Et la seconde permet la traversée des réactifs jusqu'à la zone active. Cette zone est constituée d'un matériau poreux aux gaz et à l'eau et possède une très bonne conduction thermique et électrique.

6.3.2. Structure d'une micro-pile à combustible

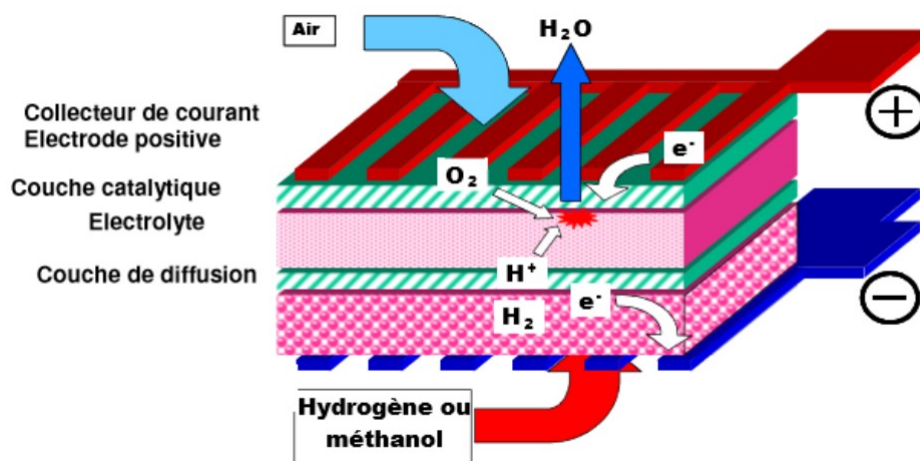


figure 22 : Structure d'une micro-pile à combustible, CEA

6.3.3. Présentation de Hype

Hype est une entreprise lancée le 7 décembre 2015 pendant la COP 21, par la Société du Taxi Électrique Parisien (STEP) et compte aujourd'hui 500 taxis entièrement alimentés par une PAC. Les principaux véhicules utilisés sont des Toyota Mirai (cf image) et des Hyundai Nexo, deux véhicules assez lourds (1.5t et 1.8t) mais entièrement électriques et produisant leur électricité nécessaire au fur et à mesure des besoins par la pile à combustible. Ces taxis à hydrogène disposent d'une autonomie de plus de 500 km et se rechargent en 3 à 5 minutes sur des bornes adaptées, le tout n'émettant ni polluants locaux, ni CO2, ni bruit, seulement de l'eau.



figure 23 : La Toyota Mirai (2014)

6.3.4. Projets de véhicules terrestres

- **Les vélos à l'hydrogène**

Propulsé par une pile à combustible, le vélo « Alpha » est le seul fonctionnant avec une telle technologie sur le marché français. Il produit l'hydrogène de manière classique à l'aide d'un électrolyseur. Pragma Industries, société spécialisée dans les utilisations de la pile à combustible, a publié des informations détaillées sur sa propre utilisation du vélo Alpha, l'argument principal de vente est son autonomie proche de 100km et sa durée de recharge très courte. La pile est alimentée par une bouteille de gaz d'hydrogène comprimé de 2L en environ 2min en station-service. Ces caractéristiques ont plu à la ville de Cherbourg qui a mis en place un système de location de vélo à hydrogène, place Chantereyne. La ville a par conséquent installé une station de recharge sur le port avec l'aide de ses partenaires du projet BHYKE. Ce projet (dont fait partis Pragma Industrie) vise à développer ce mode de transport n'émettant pas de CO₂ à l'échelle régionale, dans un premier temps.

- **Les bus à l'hydrogène**

Un domaine de l'automobile a su prédire l'émergence de la PAC bien avant les autres : les bus. En effet depuis la fin des années 90 des bus « vert » circulent sur les routes européennes sous le nom de Nebus (pour « no emission bus »). Ce bus n'est non pas une création de toutes pièces mais une adaptation d'un bus à moteur classique O 405 N.

Ce modèle proposé par Mercedes a donné écho à de nombreux autres modèles en Europe. L'avantage d'une telle technologie, outre son impact minime sur l'environnement, est l'autonomie de la PAC qui est calculée pour subvenir aux besoins du bus sur sa ligne. Une fois arrivé à son terminus, le bus s'arrête une dizaine de minutes pour se recharger sur une station préalablement installée. L'aspect prévisible d'un trajet de bus permet de minimiser le nombre de stations de recharge et d'optimiser l'autonomie de la PAC.

- **Les trains à l'hydrogène**

L'industrie ferroviaire est connue pour être très conservatrice et a du mal à adopter de nouvelles technologies de propulsion notamment. Mais l'hydrogène semble échapper à cette tradition de par son faible impact environnemental et son coût intéressant. La revue spécialisée *The RailwayEngineer* a postulé en 2017 que la prédominance croissante de l'énergie éolienne conduira à des excédents d'énergie électrique la nuit (ou en période venteuse et ensoleillée). Ces excédents seront facilement convertis en stocks d'hydrogène alors produit à coût raisonnable suivant les méthodes décrites précédemment. À titre d'exemple, un parc éolien de 15MW peut produire environ 3t d'hydrogène/jour, ce qui permettrait d'alimenter 17 trains adaptés avec une autonomie de 600km/jour.

Ce qui explique la facilité qu'ont les trains à envisager une transition à l'hydrogène est que ceux-ci fonctionnent déjà à l'électrique, contrairement aux véhicules abordés précédemment. La seule problématique est liée au stockage de l'hydrogène. En 2011 l'Université de Valladolid (Espagne) lance le projet FC Tram H2.

Ce projet a abouti en la reconversion d'un Fabiolos série 3400 (train appartenant à la SNCV) en un train à l'hydrogène. Celui-ci peut transporter 30 passagers et atteint une vitesse de pointe de 20km/h. Cette vitesse étant faible du fait du stockage de H₂ dans des petites bonbonnes. C'est en septembre 2016 qu'une compagnie française annonce la sortie de son nouveau train iLint, inspiré du projet Tram H2. Celui-ci opte pour un stockage de l'hydrogène sur son toit, ce qui lui permet de pousser sa vitesse de pointe à 150km/h pour une autonomie de 1000km.

6.3.5. Le projet d'avion électrique à l'hydrogène de HES

Cet aéronef zéro pollution pourrait apporter un élément de réponse alors que l'aviation représente déjà 3 % des émissions polluantes mondiales et que le nombre des voyages aériens devrait tripler d'ici 2050. Disposant d'une autonomie de 2 000 à 5 000 kilomètres il pourra être ravitaillé en moins de 10 minutes à l'aide d'un système de nacelles automatisées.

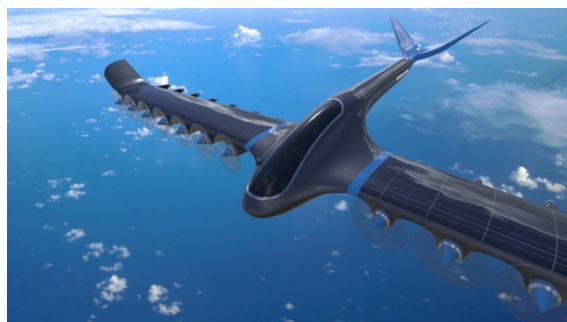


figure 24 : Prototype fourni par HES

6.3.6. La PEMPower 1-Eco

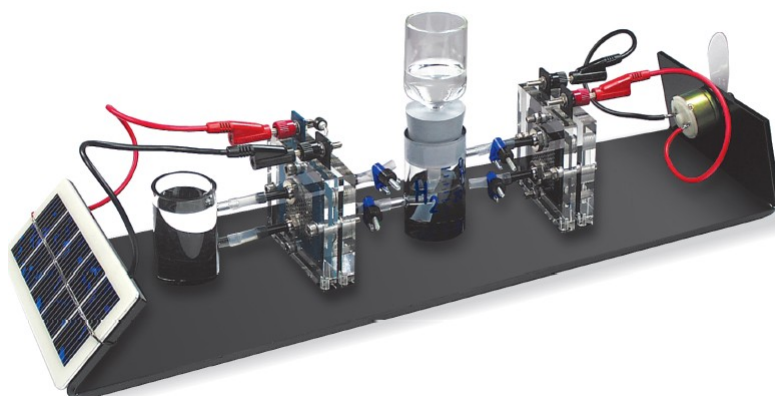


figure 25 : Photographie de la PEMPower 1-Eco

<u>Panneau solaire :</u> Surface : 90 cm ² Intensité : 300 mA Tension : 2,5 V Puissance : 0,5 W	<u>Electrolyseur :</u> Surface électrode : 16 cm ² Puissance : 2 W Tension acceptée : de 0 à 1,9 V Intensité acceptée : de 0 à 2 A	<u>Réservoir à H₂ :</u> Volume : 40 cm ³	<u>PEMFC :</u> Surface électrode : 16 cm ² Puissance (H ₂ /O ₂) : 600 mW Puissance (H ₂ /air) : 300 mW Tension : de 0,3 à 0,9 V	<u>Ventilateur :</u> Puissance : 20 MW
--	---	---	--	---

Source : manuel de la PEMPower 1-Eco

figure 26 : Caractéristiques des parties composant la PEMPower-1 Eco

6.4. Partie 4 :L'acceptabilité de l'hydrogène

6.4.1. Définitions de l'acceptation sociale par des scientifiques

- L'acceptabilité sociale est une des trois dimensions à prendre en compte lorsqu'on étudie l'usage d'une technologie nouvelle en plus de son utilité (conception) et de son utilisabilité (ergonomie) - Alain Somat [Somat, 2008]
- « les individus, (1) comparent la réalité perçue avec ses alternatives connues et, (2) décident si la condition réelle est supérieure, ou suffisamment similaire, à la plus favorable condition alternative » - Brunson [Brunson, 1996]
- « bien plus qu'un jugement de comparaison, c'est un choix de tolérance où la société accepte une technologie qui n'amplifie pas la dégradation de certaines conditions jugées critiques » -Stankey [Stankey, 1996], [Stankey and Shindler, 2006]

6.4.2. Résultats du sondage

- **Public ayant répondu au questionnaire :**

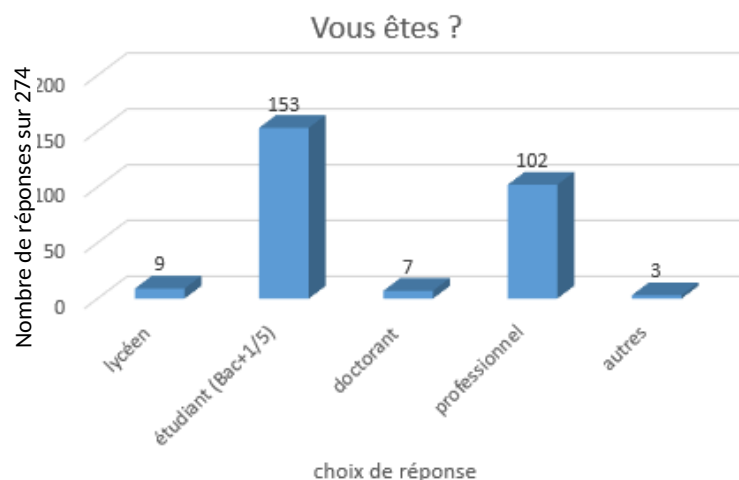


figure 27 : Répartition des réponses à la question n°1 – sondage acceptabilité

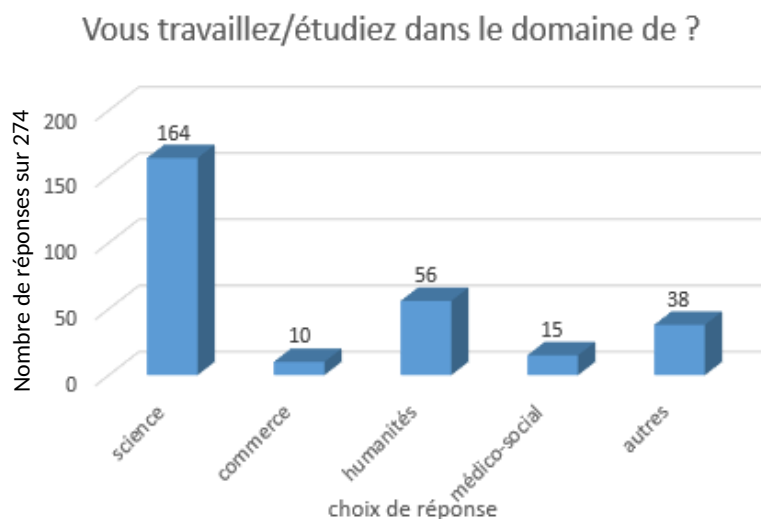


figure 28 : Répartition des réponses à la question n°2 – sondage acceptabilité

• Avis sur l'hydrogène :

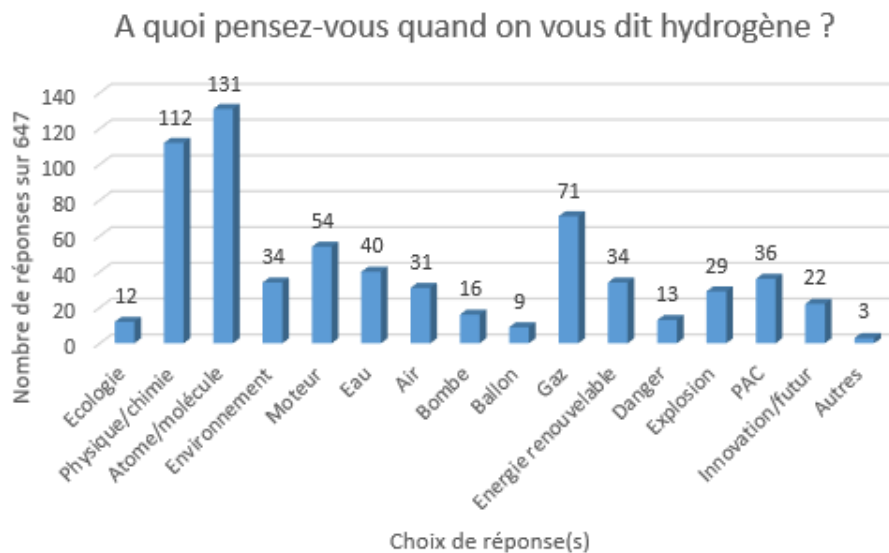


figure 29 : Répartition des réponses à la question n°3 – sondage acceptabilité

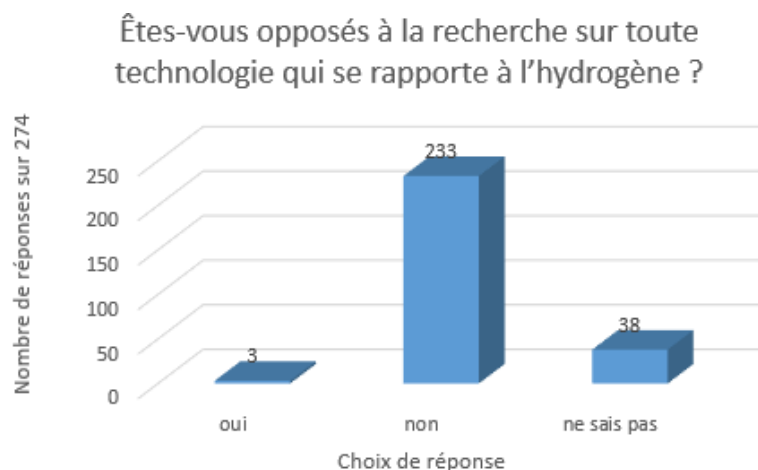


figure 30 : Répartition des réponses à la question n°4 – sondage acceptabilité

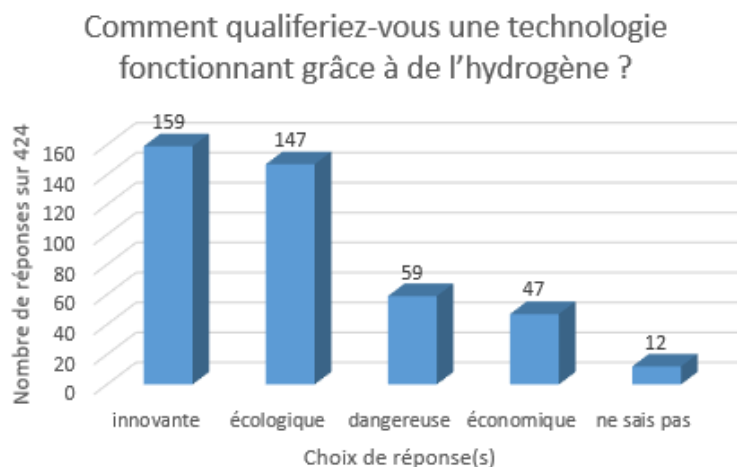


figure 31 : Répartition des réponses à la question n°5 – sondage acceptabilité

- **Comparaison des moteurs :**

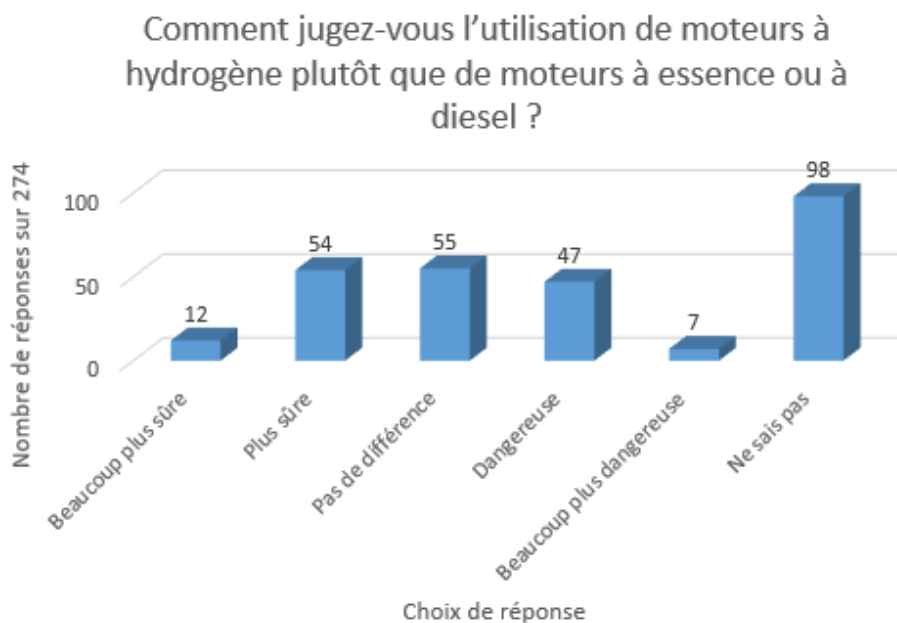


figure 32 : Répartition des réponses à la question n°6 – sondage acceptabilité

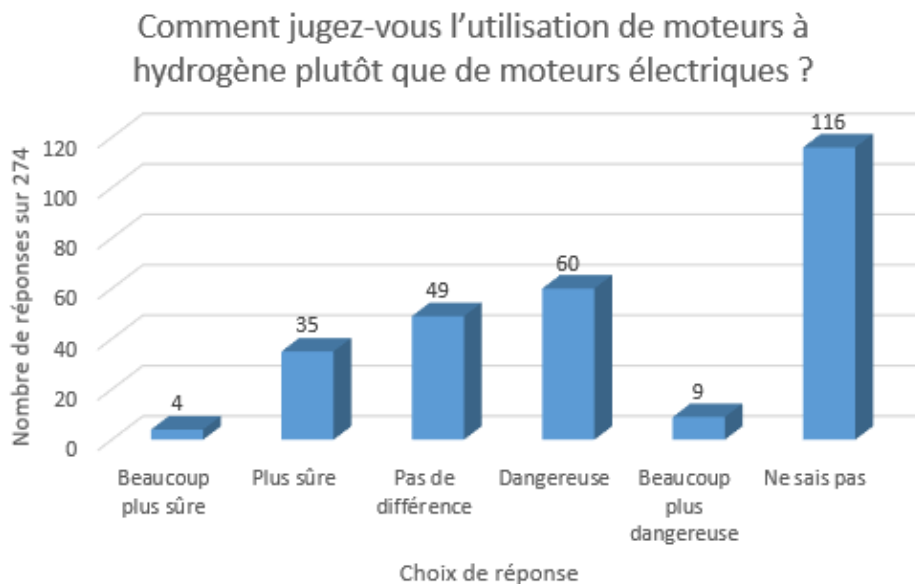


figure 33 : Répartition des réponses à la question n°7 – sondage acceptabilité

- Achat potentiel d'un nouveau véhicule**

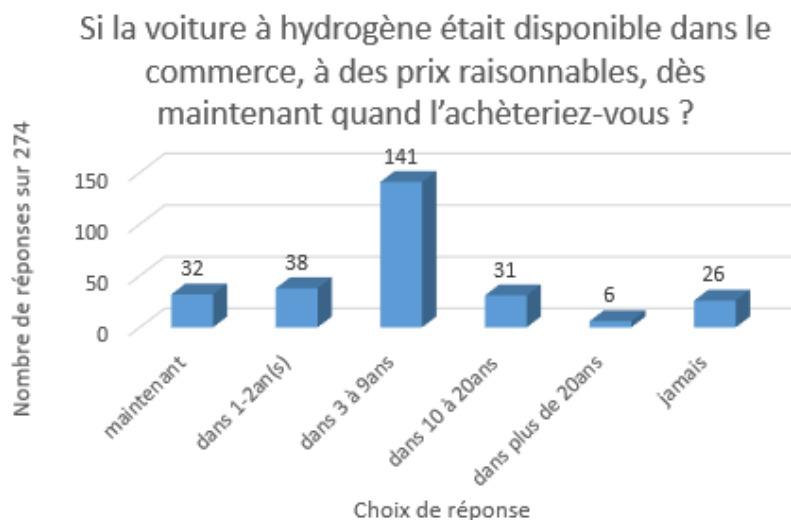


figure 34 : Répartition des réponses à la question n°8 – sondage acceptabilité

Si on vous propose une prime pour reprendre votre ancien véhicule et en acheter un à hydrogène, le feriez-vous ?

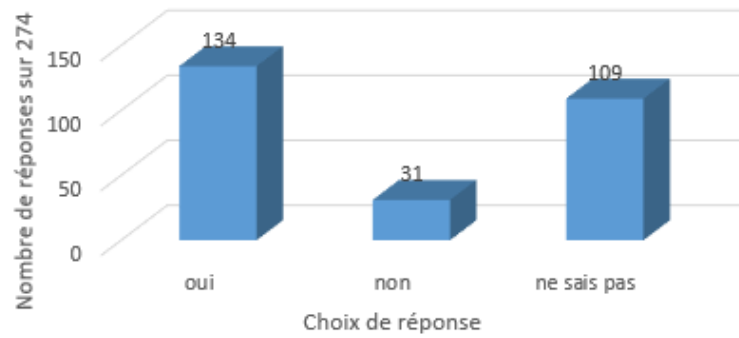


figure 35 : Répartition des réponses à la question n°9 – sondage acceptabilité

Pourquoi un véhicule "traditionnel" ?

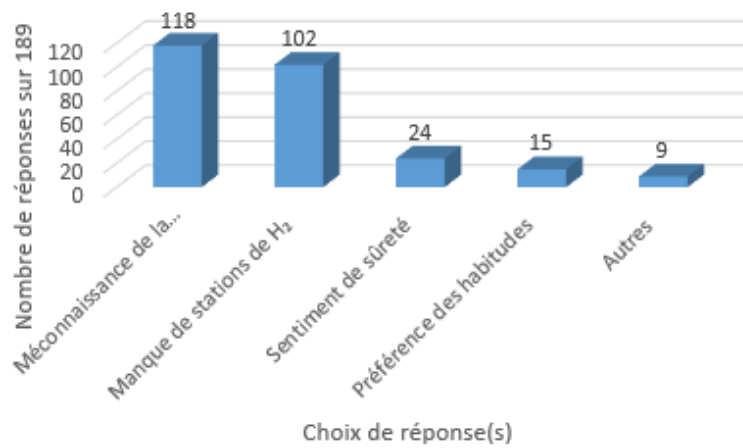


figure 36 : Répartition des réponses à la question n°11 – sondage acceptabilité