

# L'HYDROGÈNE: VECTEUR ÉNERGÉTIQUE DU FUTUR

**Etudiants :**

<b>Pauline BODET</b>	<b>Marina GORNY</b>
<b>Maxime CARLIER</b>	<b>Thomas LEMOINE</b>
<b>Justine CLEMENT</b>	<b>Moinour MLAZINDROU</b>
<b>Marie DESSOUDE</b>	<b>Louise OESTER</b>
<b>Mathilde DUHOUX</b>	<b>Alice PINEDRE-LECOMTE</b>
<b>Clémentine GORNY</b>	<b>Juliane TESTOT</b>

**Enseignant-responsable du projet :****David HONORÉ**



Date de remise du rapport : *18/06/2018*

Référence du projet : *STPI/P6/2017 – 5,6*

Intitulé du projet : *L'Hydrogène : Vecteur énergétique du futur*

Type de projet : *Bibliographique*

Objectifs du projet:

*Le but de ce projet était de s'informer sur l'hydrogène et de voir en quoi il pouvait être le combustible du futur. Afin de répondre à cette question, nous nous sommes renseignés sur différents aspects de l'hydrogène : ses méthodes de production, les moyens de stockage, les applications de l'hydrogène-combustible dans des domaines variés, les risques qu'il peut présenter ainsi que l'acceptabilité de son utilisation auprès des populations.*

Mots-clefs du projet :

- *Hydrogène*
  - *Combustible*
  - *Futur*
  - *Energie*
-

## TABLE DES MATIÈRES

1. Introduction	4
2. Méthodologie / Organisation du travail	5
3. Travail réalisé et recherches effectuées	6
3.I. Production	6
3.I.1. Le reformage	6
3.I.2. La gazéification	8
3.I.3. L'électrolyse	11
3.I.4. Les techniques en cours d'essai	16
3.II. Stockage de l'Hydrogène	18
3.II.1. Stockage mobile	18
3.II.2. Sites intégrés	23
3.II.3. L'Hydrogène dans le réseau de gaz naturel	24
3.III. Les différentes utilisations de l'Hydrogène	28
3.III.1. La pile à combustible	28
3.III.2. Les Transports	30
3.III.2.1. Automobile	30
3.III.2.2. Ferroviaire	33
3.III.2.3. Aéronautique	34
3.III.2.4. Aérospatiale	36
3.III.3. L'Hydrogène, combustible domestique	37
3.III.4. L'hydrogène dans l'industrie	40
3.IV. Risques et acceptabilité de l'Hydrogène	41
3.IV.1. Les risques industriels	41
3.IV.2. Les risques sur la santé	44
3.IV.3. L'acceptabilité sociale	45
3.IV.4. L'acceptabilité politique	48
4. Conclusion et perspectives	51
5. Annexes	52
6. Bibliographie/Sitographie	67
7. Crédits d'illustrations	74

## 1. Introduction

*“Rien ne se perd, rien ne se crée, tout se transforme”* disait Antoine Lavoisier. Cette formule célèbre s’applique à toutes les structures atomiques. L’hydrogène, le premier élément de la classification périodique, qui est aussi le plus abondant, pourrait devenir une des énergies renouvelables du futur grâce à cette maxime.

Au vu de la diminution des sources d’énergies fossiles, nous devons trouver de nouvelles sources d’énergies plus vertes et surtout renouvelables. Néanmoins, les énergies renouvelables les plus connues (comme l’éolien, le solaire, le photovoltaïque...) posent un problème assez important : l’intermittence de la production. Cependant ce n’est pas le cas de l’hydrogène moléculaire dont la production peut être maîtrisée et adaptée aux besoins.

L’hydrogène moléculaire, ou dihydrogène, est composé de deux atomes d’hydrogène et possède un avantage énergétique non négligeable. Il libère environ trois fois plus d’énergie que l’essence lors de sa combustion. Cependant cette propriété est aussi un inconvénient, l’ $H_2$  est extrêmement inflammable.

Ainsi dans le cadre de notre projet P6, nous avons choisi d’étudier la possibilité que l’hydrogène devienne le combustible du futur selon plusieurs axes. Tout d’abord, nous étudierons les différents types de production. Ensuite, nous présenterons les options de stockage puis les différentes utilisations du dihydrogène. Et nous finirons avec les risques liés à l’utilisation de l’ $H_2$  et l’acceptabilité de celui-ci auprès des populations.

Nous avons trouvé plus cohérent de regrouper les projets “Hydrogène, combustible du futur” et “Hydrogène, Impact sur la santé, production, stockage, alimentation et risques”. En effet, cela nous a permis d’avoir une vision plus complète du projet et d’ainsi mieux répondre à notre problématique. Notre travail a été uniquement bibliographique. De ce fait, notre rapport constitue notre production finale. Tous les résultats présentés sont ceux de nos recherches débutées dès février et face à la grande quantité d’informations, nous avons fait de notre mieux pour les synthétiser.

## 2. Méthodologie / Organisation du travail

Afin de se répartir les tâches équitablement, nous avons utilisé la méthode du diagramme de Gantt. Voici la répartition des différentes parties entre tous les membres du projet. Sur ce diagramme, on peut voir les prévisions des dates de rédaction des différentes parties. Ces échéances ont globalement été respectées et ceux qui avaient de l'avance aidaient les autres un peu plus en retard.

Taches	Semaines	MARS		AVRIL			MAI			06/01/18
		03/23/18	03/30/18	04/13/18	04/20/18	VACANCES	05/18/18	05/25/18		
<b>I PRODUCTION</b>										
1 Electrolyse	O			Marie						
2 Reformage				Clémentine						
3 Gazéification			Moinour							
4 Techniques en cours d'essai				Moinour						
5 Décomposition Thermochimique									Justine	
<b>II STOCKAGE</b>										
1 Stockage Mobile			Justine				Justine			
2 Sites intégrés				Alice						
3 Gaz naturels			Mathilde							
<b>III UTILISATIONS</b>										
1 Pile a combustible			Pauline/Maxime							
2 Transport										
automobile					Thomas/ Maxime			marina (chariots élévateurs)		
aéronautique								Thomas/ Maxime		
ferroviaire et autre			Marina							
aérospatial			Marina							
3 L'hydrogène comme combustible dans l'industire						Marina ; Thomas	Marina ; Thomas	Marina ; Thomas	Marina ; Thomas	Marina (gaz de cokerie)
4_Hydrogène besoins énergétiques bâtiments			Clementine							
<b>IV RISQUES</b>										
1 Santé			Juliane	Louise						
2 Industriel					juliane, louise					
3 Acceptabilité sociale			Juliane							
4 Acceptabilité politique			Louise							
<b>INTRODUCTION</b>									Alice	
<b>CONCLUSION</b>								Clémentine, Marie (partie apport person		
Bibliographie (mise en commun)									Marina	

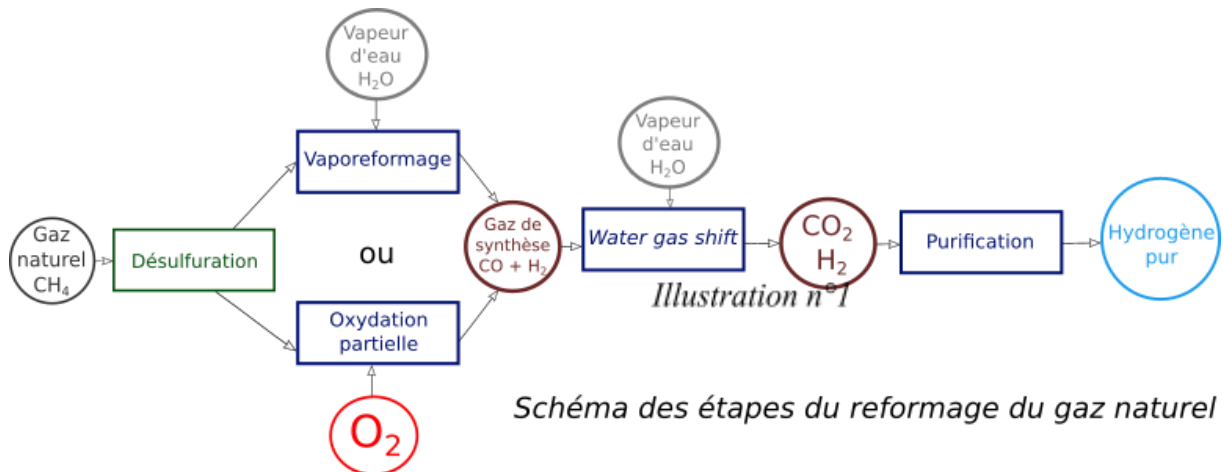
### 3. Travail réalisé et recherches effectuées

#### I. Production

##### I.1. Le Reformage

Le reformage est un procédé de production d'hydrogène à partir d'énergies fossiles. Le reformage d'hydrocarbures a été mis au point par le chimiste allemand Friedrich Bergius au début du XX<sup>ème</sup> siècle. Cette technologie s'est progressivement répandue et développée. Dans les années 1960, le reformage a commencé à être utilisé dans les unités de production d'ammoniac, en produisant l'hydrogène nécessaire à la synthèse de NH<sub>3</sub>. La technologie a continué d'évoluer en permettant de produire plus d'ammoniac, et est encore utilisée aujourd'hui. En effet, d'après des chiffres du Commissariat à l'Energie Atomique datant de 2013, 95% de l'hydrogène H<sub>2</sub> est produit par reformage. C'est donc le mode de production d'H<sub>2</sub> le plus répandu dans l'industrie.

Ce procédé utilise des hydrocarbures comme les gaz résiduaux de raffinerie, le gaz de pétrole liquéfié, le naphtha (liquide transparent issu de la distillation du pétrole) ou le gaz naturel, qui contient essentiellement du méthane CH<sub>4</sub>. Le reformage du gaz naturel (GN) est plus répandu. Le GN est disponible en plus grande quantité que d'autres combustibles fossiles. De plus, il est moins coûteux, c'est pourquoi son utilisation est rentable.

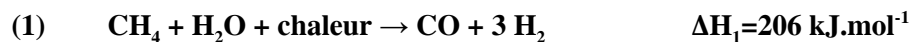


Le principe général consiste à transformer le méthane du GN, ayant préalablement subi une désulfuration en gaz de synthèse (*syngas*) qui est composé de monoxyde de carbone et d'hydrogène.

La transformation en *syngas* peut être faite soit par vaporeformage, c'est-à-dire en utilisant de la vapeur d'eau, soit par oxydation partielle où on utilise de l'oxygène, soit par reformage autotherme, qui est une combinaison des deux technologies précédentes. Ensuite, le *syngas* réagit avec l'eau pour former de l'H<sub>2</sub> (*water gas shift*). Enfin, le produit obtenu doit être purifié via différentes méthodes possibles pour récupérer de l'hydrogène pur. (voir Illustration n°1).

##### I.1.1. Vaporeformage du gaz naturel

Le vaporeformage consiste à faire réagir le méthane avec de la vapeur d'eau selon la réaction suivante:

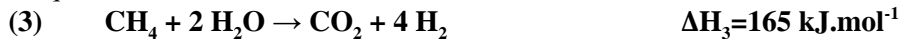


Cette réaction se déroule dans des tubes contenant un catalyseur (en général du nickel), sous une pression comprise entre 15 à 30 fois la pression atmosphérique, et à une température allant de 750 °C à 1000°C.

Ensuite, le monoxyde de carbone CO est converti en dioxyde de carbone et en hydrogène par la *water gas shift reaction* (ou réaction du gaz à l'eau). Le *syngas* est mélangé à un fort apport d'eau, afin que le monoxyde carbone CO réagisse avec l'eau pour obtenir du dihydrogène et du dioxyde de carbone.



Cette réaction a lieu à des températures variant de 200°C à 475°C. Elle peut être réalisée en une ou deux étapes permettant de maximiser la production d'H<sub>2</sub>. La réaction globale est endothermique:



La chaleur nécessaire à la réaction provient de la combustion d'une partie du gaz naturel et des gaz à la sortie du système de purification.

Les proportions de H<sub>2</sub> dans le gaz obtenu avec la réaction (2) sont comprises entre 70% à 80%. Il faut donc purifier ce gaz pour obtenir de l'hydrogène d'une pureté supérieure.

### **I.1.2. Oxydation partielle du gaz naturel**

Pour produire de l'hydrogène industriel, l'oxydation partielle sera plutôt appliquée sur des résidus lourds du pétrole que sur du gaz naturel. L'oxydation partielle du GN trouve plutôt ses applications dans le domaine de la chimie.

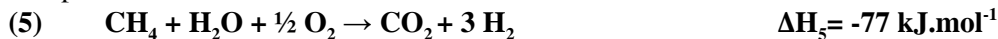
Les réactifs sont des hydrocarbures de formule brute C<sub>n</sub>H<sub>m</sub>, pour présenter la méthode de l'oxydation partielle nous prendrons n=1 et m=4. Les réactions principales (production du *syngas* puis *water gas shift*) seront les mêmes pour le méthane et d'autres hydrocarbures, mais avec des coefficients stoechiométriques différents.

La réaction d'oxydation partielle proprement dite est la suivante:



Cette réaction se déroule souvent sans catalyseur, à des températures entre 900°C et 1500°C et à une pression pouvant varier de 20 à 60 bars.

Ensuite a lieu la réaction du gaz à l'eau, c'est la réaction (2). L'équation bilan de la technologie d'oxydation partielle est:



On remarque que la réaction globale est exothermique contrairement à celle du vaporeformage.

### **I.1.3. Reformage autotherme du gaz naturel**

La complémentarité des réactions de vaporeformage et d'oxydation partielle peut être exploitée par la technologie du reformage autotherme. En effet, la réaction de vaporeformage étant endothermique, elle a besoin d'un apport de chaleur. Or, la réaction d'oxydation partielle est exothermique, elle produit de la chaleur. Le reformage autotherme est surtout utilisé sur le GN. On mélange le GN et l'oxygène à de la vapeur d'eau, puis ils sont chauffés. Ensuite, ils sont dirigés vers un même réacteur où a lieu une oxydation partielle, suivie par le vaporeformage. Les réactions se font à une pression allant de 20 à 60 bars, à une température de 900°C à 1100°C, et à l'aide d'un catalyseur à base de nickel. Le produit est le gaz de synthèse. La fin du procédé est identique à celle des deux technologies utilisées seules.

### **I.1.4. Purification**

L'hydrogène obtenu après le *water gas shift* doit être purifié. Il faut séparer le CO<sub>2</sub> et l'H<sub>2</sub>, et éliminer les traces restantes d'impuretés. On distingue essentiellement deux technologies de purification : grâce à des tamis moléculaires (matériau poreux qui a la capacité de retenir certaines molécules à l'intérieur de ses pores) de type PSA (*Pressure Swing Adsorption*) et la méthanisation ou méthanation.

Le PSA ou adsorption modulée en pression est le procédé de purification le plus répandu dans l'industrie de l'hydrogène. Cette technologie se base sur le principe d'adsorption sélective des



impuretés par un solide appelé adsorbant. L'adsorption est la pénétration superficielle d'un gaz ou d'un liquide dans un solide (ou un autre liquide). Dans le cas de l'hydrogène, les molécules d'impuretés (le CO<sub>2</sub>, le CO, le N<sub>2</sub> et des traces d'hydrocarbures) présentent des interactions avec l'adsorbant plus fortes que les molécules d'H<sub>2</sub>. L'adsorbant utilisé est généralement formé de couches successives de gels de silice, charbons actifs et zéolithes (cristaux poreux d'aluminosilicate). Pour éliminer les impuretés, on joue sur les pressions partielles des gaz indésirables. En effet, plus on augmente sa pression partielle, plus l'impureté est adsorbée par l'adsorbant. Le PSA permet d'obtenir un hydrogène d'une très grande pureté, allant jusqu'à 99,9999%. Avec la méthanation, il est possible d'obtenir un hydrogène d'une pureté comprise entre 95 et 98%. (voir annexe 1 pour plus de détails sur le PSA et sur la méthanation).

### **I.1.5. Perspectives**

Globalement, le vaporeformage est plus avantageux que l'oxydation partielle, comme le montre ce tableau comparatif d'une unité de vaporeformage et d'une unité d'oxydation partielle produisant la même quantité de H<sub>2</sub> par an et utilisant la voie PSA pour la purification

	<i>Oxydation Partielle</i>	<i>Vaporeformage</i>
<i>Coût de fonctionnement (en €/h)</i>	880	330
<i>Electricité consommée (en kWh)</i>	16000	1200
<i>Rendement énergétique (en %)</i>	55	65
<i>Emission de CO<sub>2</sub> (en tonne par tonne d'H<sub>2</sub> produite)</i>	15	10

*Illustration n°2 - Tableau comparatif du vaporeformage et de l'oxydation partielle*

L'inconvénient principal du reformage en général est la génération de CO<sub>2</sub>. Pour restreindre le rejet de gaz à effet de serre dans l'atmosphère, on peut envisager la capture et la séquestration du CO<sub>2</sub>. L'idée est de stocker les émissions, en les injectant dans, par exemple, d'anciennes mines, dans les fonds océaniques, dans les poches d'hydrocarbures épuisées. Cependant, ces méthodes géologiques sont controversées et on ne sait pas quels pourraient être les impacts, à long terme, sur les écosystèmes. Des méthodes biologiques sont aussi à considérer : planter des forêts, accroître la productivité du phytoplancton,... Il serait également possible d'utiliser la biomasse à la place du gaz naturel et des hydrocarbures.

Les méthodes de production d'hydrogène à partir de sources d'énergies carbonées, comme le reformage, sont probablement vouées à disparaître car elles ne correspondent pas à des optiques de développement durable.

## **I.2 La Gazéification**

### **I.2.1. Un procédé pour produire de l'énergie**

Selon le site de la Fondation d'entreprise d'ALCEN, la gazéification est un procédé thermo-chimique. La réaction de gazéification se passe dans des conditions de température supérieure à 1000°C. Par la production de chaleur et la présence d'un réactif gazeux, un solide combustible carboné comme le charbon ou la biomasse est décomposé.

Cette décomposition permet d'obtenir un produit gazeux combustible, le *syngas*, un gaz synthétique. Ce *syngas* est composé de deux gaz combustibles : le monoxyde de carbone et le dihydrogène, et des

impuretés. Ainsi ce gaz doit être purifié et séparé si l'on souhaite seulement conserver l'hydrogène. Le *syngas* peut être source de production de :

- la chaleur
- l'électricité par l'action du gaz sur des turbines
- l'hydrogène
- carburant liquide par le procédé de Fisher-Tropsch

### **I.2.2. L'utilisation passée de la gazéification**

La gazéification n'est pas un procédé récent. En effet, en 1861, le scientifique Charles Williams Siemens lance pour la première fois ce procédé dans l'industrie à Londres. Ainsi pendant les années qui ont suivi, les gazogènes sont utilisés en Europe pour la production d'énergie pour les transports et les chaudières. Les gazogènes sont disposés au dessus ou à l'arrière des voitures. Lors de la Seconde Guerre Mondiale, les gazogènes permettent de fournir du carburant aux véhicules car le pétrole est rare. En Allemagne, la gazéification est très exploitée car le charbon s'y trouve en abondance. De plus, par le procédé inventé en 1923 par Fischer-Tropsch, deux chimistes allemands, les gaz combustibles produits sont transformés en carburant liquides. Finalement, dans les années 1960, le procédé n'est plus utilisé car les prix du pétrole ont diminué. A la suite des deux chocs pétroliers de 1971 et 1973, la gazéification revient dans l'industrie américaine et européenne.



Illustration n°3- Voiture équipée d'un gazogène

### **I.2.3. Les différentes étapes de la gazéification**

- **Première étape: Séchage**

Elle consiste à sécher de la matière organique combustible afin de produire de la vapeur d'eau. La matière organique est introduite dans le gazéifieur à des températures comprises entre 100°C et 160°C. Il s'en suit une évaporation de l'eau contenue dans la matière organique sous l'effet de cette chaleur. Ensuite, la matière organique devient un combustible carboné sec comme le charbon ou la biomasse.

**Réaction : biomasse humide → biomasse sèche + H<sub>2</sub>O**

- **Deuxième étape : Pyrolyse**

Cette étape a pour but d'obtenir des gaz de pyrolyse et des résidus de carbone. Elle est effectuée à des températures comprises entre 120°C et 600°C et surtout sans oxygène afin d'éviter l'oxydation ou la combustion.

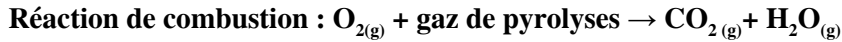
La matière combustible sèche se décompose au fur et à mesure que la température augmente pour que les atomes de carbones contenus dans la matière s'allient entre eux. À la fin de la réaction, il en résulte des résidus de carbone (coke), des gaz de pyrolyse et des vapeurs condensables appelées goudrons. Les résidus de carbone aussi appelés coke sont du carbone réducteur presque pur. De plus, le coke est un combustible. Les gaz de pyrolyse sont des gaz oxydants non-condensables composés en majorité de méthane (CH<sub>4</sub>) et monoxyde de carbone (CO), ainsi que de H<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>, C<sub>4</sub>H<sub>10</sub> en faible quantité.

**Réaction: biomasse sèche → coke<sub>(s)</sub> + gaz de pyrolyse + goudrons**

- **Troisième étape: Oxydation partielle (combustion)**

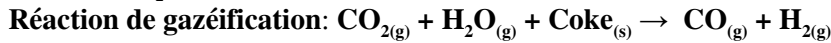
Lors de cette étape, les gaz de pyrolyse vont être oxydés par une grande quantité d'oxygène pur ajoutée pour obtenir du dioxyde de carbone et de la vapeur d'eau dans des conditions de température très élevées (de 1200°C à 1500°C). Parfois, il arrive que les gaz de pyrolyse soient oxydés

par d'autres gaz réactifs comme l'air, la vapeur d'eau ou l'hydrogène. Cette combustion est très importante car elle dégage une quantité de chaleur suffisante à la gazéification. De plus, cette chaleur va être utilisée pour les deux étapes décrites précédemment.



- **Quatrième étape: Gazéification (réduction)**

Lors de cette étape, il n'y a plus d'oxygène et les températures sont comprises entre 800°C et 1200°C. Sous l'effet de la chaleur, le dioxyde de carbone ( $CO_2$ ) et l'eau ( $H_2O$ ) vont subir une réduction par le coke obtenu lors de la pyrolyse. Le dioxyde de carbone est réduit en monoxyde de carbone ( $CO$ ) et la vapeur d'eau ( $H_2O$ ) en dihydrogène qui vont constituer le *syngas*.



Le *syngas* va être constitué de  $CO$ ,  $H_2$ ,  $CO_2$ ,  $H_2O$ ,  $CH_4$ ,  $H_2S$ ,  $NH_3$ ,  $N_2$ ,  $Ar$ . Il subit les mêmes étapes de réaction du gaz à l'eau et de purification que pour le procédé de reformage, vues dans la partie précédente.

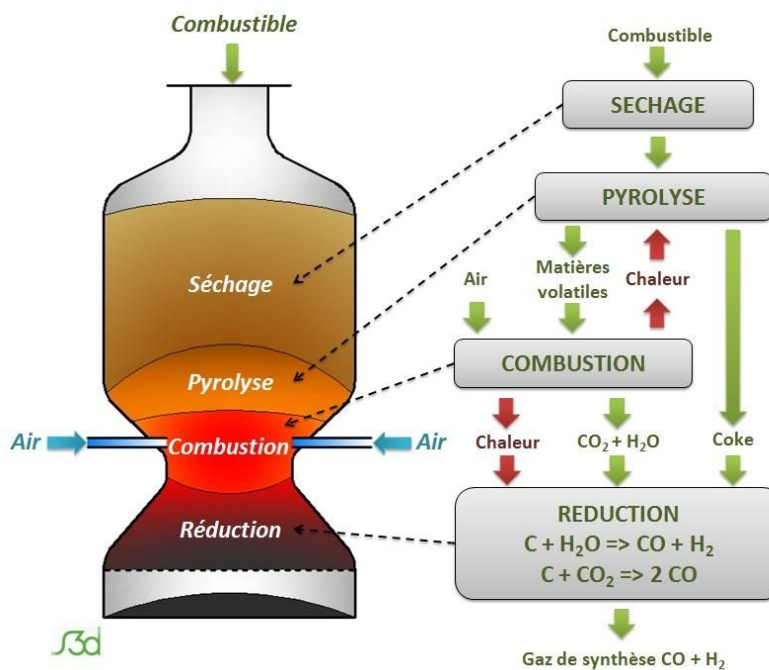


Illustration n°4- Schéma du principe de gazéification

Les quatre étapes décrites sont indispensables à la création du *syngas*. Cependant, il y a diverses manières chronologiques de les effectuer dans un réacteur. Il existe plusieurs technologies de réacteurs : les gazéificateurs à lit fixe, à lit fluidisé et à lit entraîné (voir annexe 2 pour le fonctionnement détaillé des différents types de gazéificateurs). Les conditions de température et de pression dans les gazéificateurs sont fixées selon le gazéificateur utilisé. La température choisie sera inférieure à la température de ramollissement des cendres pour les gazéificateurs à lit fixe et à lit fluidisé entraîné. Pour les gazéificateurs à flux entraîné, la température sera supérieure à celle de la fusion des cendres. La pression est déterminée de manière à ce que le gaz de synthèse en sortie du gazéificateur soit directement transmis aux corps qui vont l'utiliser sans recompression.

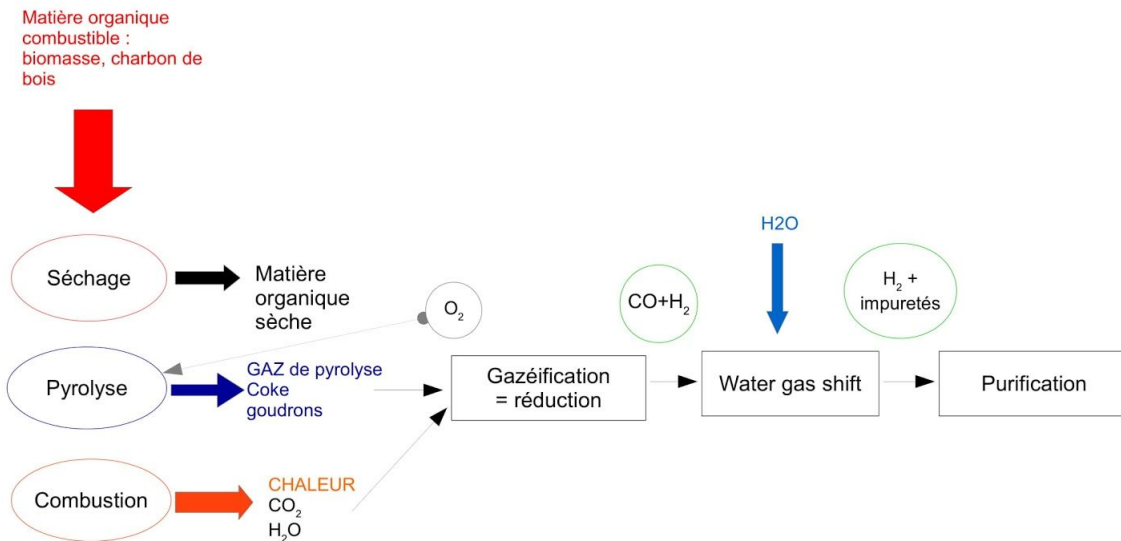


Illustration n°5 - Schéma de la production du dihydrogène par gazéification

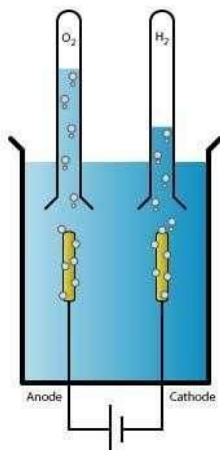
### **I.2.4. La biomasse : un avantage considérable**

La biomasse est de la matière organique végétale composée de carbone. C'est une source d'énergie très avantageuse car elle permet de diminuer la production de gaz à effet de serre tel que le CO<sub>2</sub>. En effet, la biomasse végétale effectue la photosynthèse à partir de CO<sub>2</sub>, d'eau H<sub>2</sub>O et de lumière solaire et produit ainsi de l'oxygène. Ainsi lorsque la biomasse est brûlée, le CO<sub>2</sub> évacué par cette réaction est absorbé de nouveau par les végétaux pour la photosynthèse. Cependant, il faut que cette utilisation soit en équilibre avec leur temps de croissance afin qu'il y ait assez de végétaux pour absorber le CO<sub>2</sub>. De plus cette source n'est pas fossile contrairement au charbon, qui produit énormément de CO<sub>2</sub> et n'a pas l'avantage de pouvoir être absorbé en conséquence. De ce fait la biomasse est un atout majeur pour la production d'hydrogène par gazéification.

## **I.3. L'Electrolyse**

### **I.3.1. Généralités et principe de l'électrolyse**

A l'heure actuelle, le prix de l'électricité rend l'électrolyse peu compétitive et seule une faible partie de l'hydrogène (environ 4%) est produite par cette méthode. L'électrolyse de l'eau, aussi appelée hydrolyse, est un procédé qui permet de produire du dihydrogène (H<sub>2</sub>) et du dioxygène (O<sub>2</sub>) à partir d'eau, grâce à un courant électrique. Sur le long terme, ce procédé de fabrication devrait s'imposer et ainsi prendre une place plus importante en raison de l'épuisement des matières fossiles, des contraintes écologiques et de l'avènement des énergies renouvelables.



On peut écrire la décomposition de l'eau par électrolyse de la façon globale suivante : 
$$\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2 + \frac{1}{2} \text{O}_2$$

Illustration n°6- Schéma d'une cellule d'électrolyse

L'électrolyse consiste à convertir l'énergie électrique fournie en énergie chimique. La réaction se déroule dans une solution d'eau salée: l'électrolyte. Les ions doivent pouvoir circuler librement dans l'eau pour passer d'une électrode à l'autre. Les deux électrodes sont reliées grâce à l'électrolyte et par un générateur de courant électrique.

Concernant les grandeurs physiques liées à cette réaction, l'énergie qui lui est nécessaire ainsi que d'autres informations, plus de détails sont disponibles en annexes (3.1).

### **I.3.2. Les différents types d'électrolyseurs et les différents sites de production d'hydrogène par électrolyse**

A l'heure actuelle, les électrolyseurs à technologies alcaline et PEM (Proton Exchange Membrane) sont les plus utilisés pour produire de l'hydrogène par électrolyse. Une partie historique expliquant plus en détails l'évolution temporelle de ces derniers ainsi qu'une partie détaillant les différents types d'électrolyseurs et leur fonctionnement sont disponibles en annexes (3.2 et 3.3).

Concernant les sites de production d'hydrogène par électrolyse, beaucoup d'entreprises ont décidé d'investir sur ce marché sachant que ce procédé est l'une des méthodes de production d'hydrogène la plus respectueuse de l'environnement. Actuellement l'électrolyse représente 4% de la production d'hydrogène mais ce processus est amené à se développer dans les années futures.

Aujourd'hui en France il n'existe aucun site de production d'hydrogène par électrolyse. Cependant la société H2V Product a pour projet d'en construire un à Port Jérôme (Normandie) d'ici fin 2020.

Par ailleurs, Areva H2Gen a inauguré le 24 juin 2016 son premier site de production d'électrolyseur en France situé à Ulis dans l'Essonne.

A l'heure actuelle, les électrolyseurs disponibles sur le marché sont prévus pour des pressions moyennes, ceux à haute pression sont encore à l'essai. Pour ce qui est des fabricants et développeurs d'électrolyseurs, un tableau disponible en annexes (3.4) précise pour chacune des technologies d'électrolyseurs quelles entreprises les produisent.

### **I.3.3. Le rôle de l'électrolyse de l'eau dans la fabrication d'hydrogène aujourd'hui**

*Entre le coût de l'électricité et la faible capacité de production de ce procédé, l'électrolyse de l'eau est-elle un procédé de fabrication "rentable" ?*

Afin de produire de l'hydrogène massivement et économiquement et d'en faire un vecteur énergétique propre, l'électrolyse apparaît comme l'une des solutions "écologiques" les plus prometteuses. Toutefois, son rendement reste aujourd'hui son plus gros point faible. En effet, en réalisant une analyse économique globale (coût capital, coûts opératoires et maintenance) on peut s'apercevoir que le coût de l'hydrogène produit par électrolyse est en grande partie lié à celui de l'électricité, donc à son mode de production. Lorsque cette électricité est « verte », ce sont les coûts en capitaux du système renouvelable (photovoltaïque, éolien...) qui sont à prendre en compte. Pour ce qui est des chiffres, ils sont variables en fonction des auteurs et des hypothèses retenues (taille et performances de l'unité, coût capital...) entre 20 et 70 \$/GJ, avec une majorité des valeurs se situant autour de 27-55 \$/GJ (100 -200 €/MWh) avec une durée de fonctionnement supérieure à 7 000 h/an.

Concernant le CGSP (Commissariat Général à la Stratégie et à la Prospective), il a publié les résultats d'une étude sur le sujet en septembre 2014 exposant les coûts de production de l'hydrogène selon divers scénarios. Ces données sont disponibles en annexes (3.5).

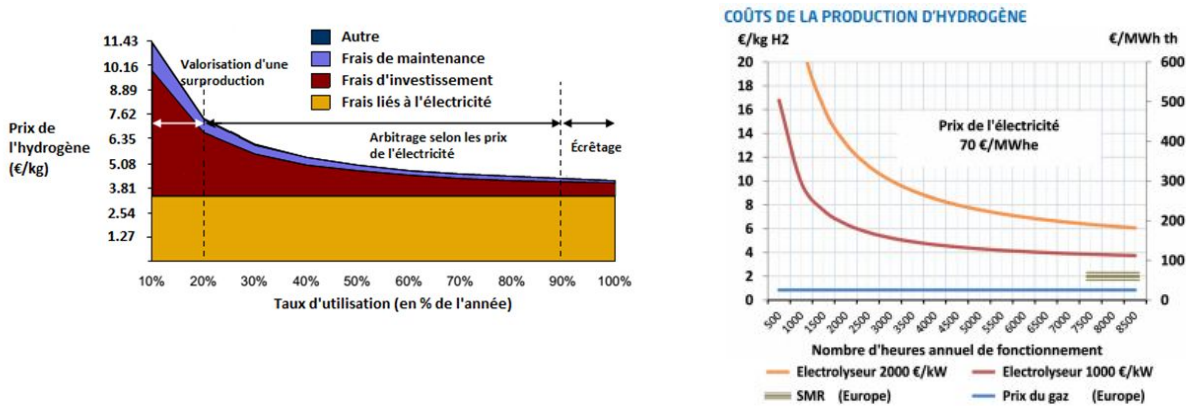
Par ailleurs, il faut prendre du recul quant à ces chiffres étant donné le faible retour d'expérience sur les performances réelles de ces systèmes et des coûts qui y sont liés. L'électrolyse de l'eau reste ainsi un procédé de fabrication d'hydrogène à développer et à performer.

D'autre part, nous pouvons comparer ces coûts avec les résultats des travaux du projet national HyFrance3. Dans l'hypothèse d'une production massive d'hydrogène grâce à un champ éolien par exemple, associée à un stockage en cavités profondes, dans les régions PACA ou Rhône-Alpes, le coût estimé en 2050 de l'hydrogène produit par électrolyse serait situé entre 0,6 et 0,9 \$/kg - soit entre 0,5 et 0,7 €/kg. Par ailleurs, d'autres données économiques ont été apportées par l'I-Tésé (voir figure en annexe 3.6), grâce auxquelles nous pouvons voir les évolutions possibles de coûts comparés des électrolyseurs entre les deux types de technologies alcalines et acides.

### I.3.4. Les perspectives pour faire de l'électrolyse de l'eau le procédé de fabrication d'hydrogène

*Optimisation du rendement de l'électrolyse :*

Tout d'abord, il faudrait arriver à un coût de l'électricité d'origine renouvelable concurrentiel avec le prix du gaz utilisé lors du reformage. Par ailleurs, l'amélioration des électrolyseurs (rendement, matériaux diminuant la maintenance, production en série des électrolyseurs) représente également un enjeu décisif. Pour finir, afin de réduire la part liée à l'investissement et ainsi, dans un même temps, de réduire le coût de l'hydrogène, une augmentation du nombre d'heures de fonctionnement est nécessaire. La figure ci-dessous représente l'évolution du coût du kilogramme d'hydrogène en fonction de ces différents facteurs. La seconde figure permet de visualiser le coût final de l'hydrogène en €/kg produit par électrolyse en fonction du mode de production de l'électricité qui lui est nécessaire.



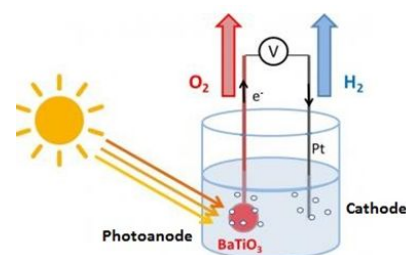
*Illustration n°7 - Evolution du prix de l'hydrogène*

Bien que la plupart des études estiment le prix du kilogramme d'hydrogène produit par électrolyse d'ici 2020 entre 2 et 4 €, les études américaines sont parvenues à des chiffres plus prometteurs. D'un autre côté, les prévisions de France Stratégie corroborées avec les données de l'U.S.DRIVE parlent de prix de l'ordre de 2,25 euros le kilogramme en 2020 pour une installation de petite taille.

*Produire l'électricité utilisée lors de l'électrolyse à partir d'énergies renouvelables*

- **La photoélectrolyse de l'eau**

*Illustration n°8 - Schéma de la photoélectrolyse de l'eau*



Grâce à ce procédé de conversion directe de l'énergie solaire en énergie chimique, une production d'hydrogène « vert » décentralisée est possible. Il est basé sur les technologies mises au point dans l'industrie des panneaux photovoltaïques.

Le principal intérêt de ce procédé est la conversion directe de l'énergie solaire, qui permet ainsi d'éviter tout coût d'installation électrique ou de raccordement au réseau. D'autre part, à l'inverse des procédés utilisant de l'énergie thermique, la photo-électrolyse se réalise à faible température (de 20 à 60°C), diminuant ainsi les contraintes sur les installations. Ainsi, ces points forts mais également sa forte parenté avec les technologies solaires, font de la photo-électrolyse une solution au problème de production d'hydrogène par voie "verte" possédant un fort potentiel de développement.

Le Département de l'Énergie des États-Unis prévoyait en 2013 des rendements de 12,4% à 18,3% ce que l'on peut comparer au rendement de 12% d'un assemblage photopile-électrolyseur. Cependant, des physiciens du Laboratoire Nano-Magnétisme et Oxydes du CNRS ont annoncé récemment avoir doublé l'efficacité du procédé d'électrolyse via la polarisation électrique. Toutefois, cette technique reste encore au stade de développement. De ce fait, la recherche se concentre sur l'amélioration des performances des matériaux semi-conducteurs utilisés.

A l'heure actuelle, le procédé de photoélectrolyse de l'eau n'atteint pas les performances nécessaires à sa viabilité économique, notamment en termes d'absorption lumineuse, de durée de vie et de coût. Par exemple, l'activité de l'un des photo-catalyseurs le plus fréquemment utilisé, le dioxyde de titane, se limite à 4% du spectre solaire. Par la suite, les semi-conducteurs doivent être protégés à cause de la corrosion induite par les électrolytes aqueux utilisés.

Ainsi, ces contraintes accentuent la part déjà importante du capital dans le coût total imputable aux semi-conducteurs. En effet, bien que la simplicité du procédé permette de réduire les coûts d'investissement et de maintenance, les matériaux utilisés à l'heure actuelle pour les électrodes ne permettent pas de parvenir à un prix de production de l'hydrogène concurrentiel.

- **Le principe du « Power to Gas »**

Toujours dans l'optique de produire de l'hydrogène par un procédé utilisant une source d'énergie renouvelable, certains projets ont mis en place un nouveau principe : celui du « power to gas ». Ce dernier consiste à stocker l'énergie produite lors des périodes de surproduction. L'énergie produite uniquement de manière renouvelable (éolienne, photovoltaïque), sert à produire de l'hydrogène par électrolyse de l'eau. L'hydrogène ainsi obtenu pourra dans un second temps soit être stocké, soit être directement injecté dans le réseau de transport du gaz naturel, soit être combiné avec du CO<sub>2</sub> afin d'obtenir du méthane.

Ce principe a pour objectif de valoriser l'électricité dite « verte », en évitant les pertes d'énergie que ce mode de production entraîne. Cela permettrait de compenser les aléas de la production d'énergie par des sources renouvelables en stockant sous forme de gaz l'excédent de la production.

Le « power to gas » pourrait ainsi répondre à de multiples enjeux notamment environnementaux en contribuant à la transition énergétique avec l'utilisation d'énergies renouvelables. Ses principaux objectifs seraient ainsi de valoriser l'énergie produite de manière renouvelable lors des périodes de faible consommation en la transformant en hydrogène tout en permettant la valorisation du CO<sub>2</sub>, en exploitant une nouvelle voie de recyclage du dioxyde de carbone libéré par les fumées industrielles

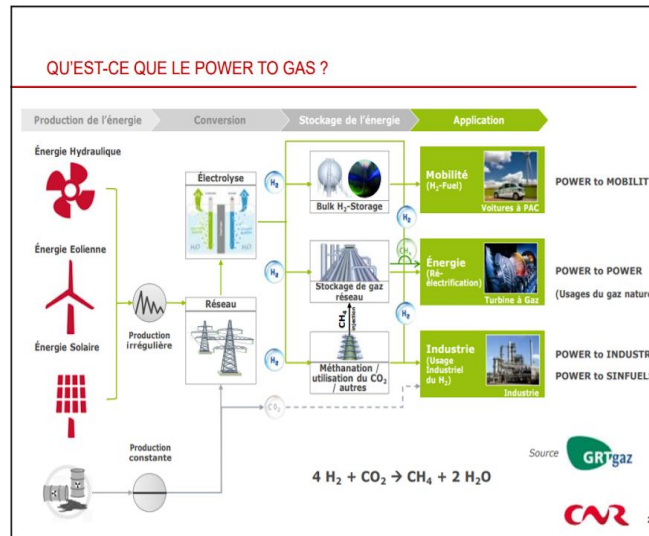


Illustration n°9 - Le power to gas

- **Le projet Hybalance**

Ce projet mené au Danemark rassemble Air Liquide, Hydrogenics, LBST, Neas Energy, Hydrogen Valley/CEMTEC ainsi que l'Initiative Technologique Conjointe Européenne (European Joint Technology Initiative) dans le but de construire la plus grande unité de production d'hydrogène « vert » en Europe. Il s'agit d'un projet de type « Power to gas ».

Retenu pour ce projet innovant, le Danemark est le pays qui possède l'une des plus ambitieuses stratégies en Europe concernant les énergies renouvelables, principalement par éoliennes. L'énergie renouvelable produite par les éoliennes sera stockée sous forme d'hydrogène et contribuera de cette façon à la stabilité du réseau, prouvant ainsi le potentiel de l'hydrogène dans le domaine énergétique.

Ce projet a pour principal contributeur Air Liquide (contribution qui s'élève à un montant de 15 millions d'euros) qui bénéficie d'un financement du Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking (FCHJU), partenariat public-privé européen. Par ailleurs, il est soutenu par le programme Horizon 2020 de recherche et d'innovation de l'Union européenne, mais également de la France, de l'Allemagne, du Danemark et de la Belgique ainsi que par le programme danois ForskEL.

Par ailleurs, il s'agit du premier projet européen à rassembler l'intégralité de la chaîne de valeur, en partant de la production d'hydrogène à partir d'énergies renouvelables en allant jusqu'à l'utilisateur final. Produit par électrolyse de l'eau, l'hydrogène servira pour les transports mais également pour alimenter les cinq stations de recharge d'hydrogène existantes et en exploitation par Air Liquide et plus de 60 véhicules électriques à hydrogène en circulation.

D'autre part, ce projet fait appel à des technologies récentes et clés au sein de la production d'hydrogène, avec un électrolyseur PEM d'1 MW ainsi qu'une chaîne d'approvisionnement en hydrogène à haute pression pour les stations de recharge.

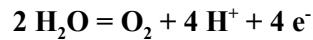
L'unité de production d'hydrogène exploitée par Air Liquide ainsi que le centre de remplissage ont été lancés en phase d'essai fin 2017. A l'heure actuelle, l'unité de production ne devrait plus tarder à produire officiellement de l'hydrogène. A l'avenir, l'hydrogène pourra ainsi être utilisé pour le transport dit "propre" et par des clients industriels.



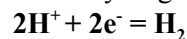
## I.4. Techniques en cours de développement

### I.4.1. Production d'hydrogène par voie biologique (voir annexe n°4 pour plus de détails)

La **bio photolyse de l'eau** est un processus de production d'hydrogène s'appuyant sur la photosynthèse des organismes végétaux: des microalgues ou des cyanobactéries. Les cyanobactéries sont des bactéries photosynthétiques, elles produisent du dioxygène comme les autres plantes. Ces organismes possèdent deux photosystèmes (abrégiés PSI et PSII) qui sont des complexes moléculaires permettant de convertir la lumière absorbée en énergie chimique lors de la photosynthèse. Les deux photosystèmes, grâce à leur énergie, vont agir successivement pour oxyder l'eau selon l'équation d'oxydation de l'eau suivante :



Dans l'organisme les électrons libérés par les PSI et PSII sont transférés par des molécules porteuses, appelés ferrédoxines, Fd vers une hydrogénase. Une hydrogénase est une enzyme qui convertit de façon réversible les protons  $\text{H}^+$  en dihydrogène  $\text{H}_2$  selon l'équation suivante :



Seules les microalgues et les cyanobactéries possèdent ces enzymes capables de catalyser cette réaction. Ainsi les hydrogénases permettent de réduire les électrons en hydrogène gazeux. Cependant, cette méthode présente des problèmes au niveau d'une production optimale d'hydrogène. En effet, la production parallèle d' $\text{O}_2$  inhibe l'activité de l'hydrogénase. Les hydrogénases dites à [NiFe] peuvent être amenées à mieux tolérer la présence d' $\text{O}_2$ , par une approche mutagenèse.

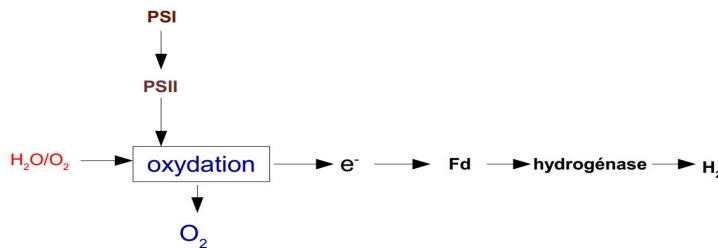
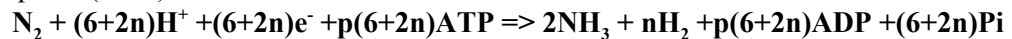


Illustration n°10- Schéma récapitulatif de la méthode de production par hydrogénase

Certaines cyanobactéries ont aussi l'avantage de produire l'hydrogène par une nitrogénase en plus d'une hydrogénase. Une nitrogénase est une enzyme qui est capable de catalyser la réduction des molécules  $\text{N}_2$  en  $\text{NH}_3$ . Elle fixe les molécules d'azote dans l'organisme et est aussi inhibé par l'oxygène. L'adénosine triphosphate (ATP) (synthétisée lors de la photosynthèse par les cellules végétatives), est une molécule riche en énergie et qui libère son énergie en se convertissant en adénosine diphosphate (ADP).



n: nombre de molécule d' $\text{H}_2$  par molécule de diazote réduit      Pi: phosphate inorganique

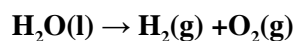
p: nombre de molécule d'ATP hydrolysée par électron transféré

On distingue deux cas de cyanobactéries faisant intervenir une nitrogénase. Les cyanobactéries filamenteuses possèdent des hétérocystes qui sont des cellules situés sur les filaments et sont protégés de toute interaction avec l'oxygène. Elle permettent donc de limiter les interactions entre les nitrogénases et l'oxygène en séparant ainsi la photosynthèse et la production de  $\text{H}_2$ .

### I.4.2. Décomposition thermochimique

- **Principe**

La décomposition thermochimique de l'eau est la dissociation de la molécule d'eau par apport d'énergie afin d'obtenir du dihydrogène. La réaction est la suivante :



Il faudrait un apport d'énergie uniquement thermique,  $\Delta H = T \times \Delta S = 286 \text{ kJ/mol}$  pour dissocier l'eau à l'état liquide. En théorie, cette décomposition directe est possible si l'on fournit une température assez forte, environ 3000K. Cependant, les moyens technologiques actuels ne permettent pas d'atteindre cette température. Les chercheurs ont donc trouvé un autre moyen de réaliser cette réaction : les cycles thermochimiques.

Il s'agit d'introduire des substances chimiques qui vont réagir avec l'eau par une succession de réactions, afin d'obtenir du dihydrogène et du dioxygène. Ces cycles nécessitent l'apport premier de chaleur et ces températures, très élevées, semblent difficiles à atteindre. Comme le montre l'illustration n°10, ces cycles vont décomposer l'eau à une température inférieure à celle de la décomposition directe.

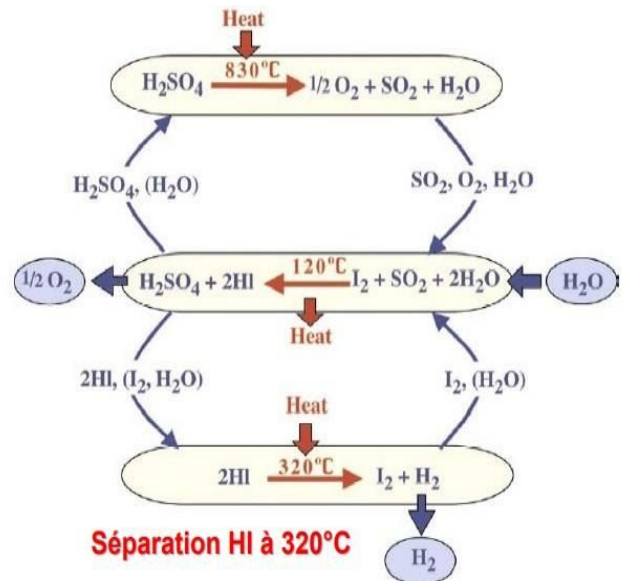


Illustration n° 11- Cycle de décomposition thermochimique de l'eau Iode-Soufre

- **Les modes de production de chaleur**

Comme nous venons de le voir, c'est la première réaction, ou premier cycle, qui nécessite une température importante. C'est pourquoi, pour atteindre les 830°C, deux techniques ont été retenues.

L'énergie nucléaire semble être un moyen efficace pour ce genre de réaction. En effet, même si les réacteurs les plus courants sont utilisés pour fabriquer de l'électricité et n'atteignent que des températures maximales de 300°C, les réacteurs HTR( High Temperature Reactor) peuvent atteindre des températures avoisinant les 1000°C. C'est au Japon qu'ont été menés les premiers tests de réacteur HTR de quatrième génération atteignant des températures de l'ordre de 800 à 900°C. En France, c'est le CEA, en collaboration avec Bouygues, qui est en train de mettre en place le projet ASTRID. Ce projet vise la création d'un réacteur HTR pour produire de l'hydrogène. Cependant, à cause de problèmes financiers l'avenir de ce réacteur n'est pas assuré.

Une autre technique retenue pour fournir la température nécessaire à la dissociation thermochimique de l'eau est l'utilisation de l'énergie solaire. Les centrales solaires à tour pourraient servir à créer du dihydrogène. En effet, ces centrales solaires concentrent les rayons lumineux sur une tour par l'intermédiaire de miroirs. L'énergie concentrée dans la tour permet d'atteindre une température de 900°C, rendant possible la production de H<sub>2</sub>. Pour l'instant, aucune application de cette technologie dans le but de créer de l'hydrogène n'a été mise en place. Cependant, les laboratoires Américains Sandia prévoient de coupler une de ces centrales à un système de production d'hydrogène en 2020. Cette technologie permettrait alors de produire un hydrogène moins cher et plus respectueux de l'environnement.

Ces techniques en cours de développement semblent donc présenter des avantages importants, en particulier la production d'hydrogène « vert » et à bas coût avec notamment les centrales solaires. Cependant, la mise en oeuvre difficile de centrales HTR ou solaire à tour ainsi que le développement très rapide de la concurrence (surtout au niveau de l'électrolyse), semblent mener à un abandon progressif de cette manière de produire l'hydrogène.

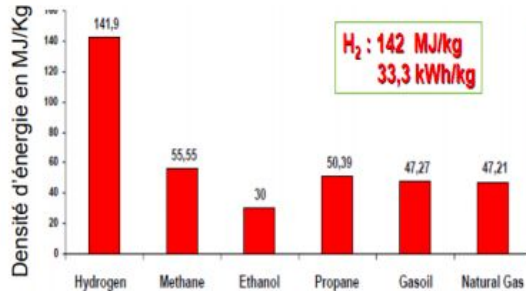


Illustration n° 12- Centrale à tour

## II. Stockage de l'hydrogène

### II.1. Stockage mobile

Comme nous le savons, l'hydrogène représente un enjeu majeur dans le domaine du transport et de l'utilisation en tant que combustible. Cependant, l'hydrogène est aussi le plus petit et le plus léger des atomes ce qui constitue un problème majeur pour son stockage. En effet, sous pression et température normales, l'hydrogène est à l'état gazeux et possède une densité volumique de  $0,09 \text{ kg.m}^{-3}$  ce qui représente un volume de près de  $11 \text{ m}^3$  -soit la taille d'un coffre de voiture pour stocker 1kg d'hydrogène. Il est donc nécessaire de réduire le volume de l'hydrogène pour le transporter facilement.



Au cours du temps, les chercheurs ont développé différents moyens de stockages de l'hydrogène présentant chacun des avantages et des inconvénients spécifiques.

Illustration n°13- Graphique comparatif de la densité énergétique de différents carburants

#### II.1.1. Stockage sous forme gazeuse

##### Pourquoi le stockage gazeux ?

Après avoir été produit, l'hydrogène est sous forme gazeuse car c'est son état le plus stable.

##### Stockage à basse pression :

- **Fonctionnement :**

C'est sous cette forme qu'il est le plus facile de stocker le dihydrogène et c'est d'ailleurs de cette manière que l'hydrogène est stocké depuis de nombreuses années. En effet, une manière simple de réduire le volume d'un gaz est de le mettre sous pression. Ainsi, en le comprimant à 200 bars et en le laissant à  $21^\circ\text{C}$  il est possible de le stocker dans des bouteilles hermétiques en acier renforcé. A 200 bars, l'hydrogène a une masse volumique de  $18,01 \text{ kg.m}^{-3}$ , ce qui permet de stocker 4 kg d' $\text{H}_2$  dans 222 L. L'hydrogène est donc stocké dans des bouteilles en acier renforcé qui empêchent le dihydrogène de s'échapper ou de fragiliser la structure de la bouteille.

- **Avantages et inconvénients :**

Cette technique présente l'avantage de pouvoir stocker facilement l'hydrogène à une pression relativement basse 200 bars et dans des bouteilles peut coûteuses mais résistantes. Cependant, elle ne permet pas de compresser beaucoup l'hydrogène, ainsi 1 kg de dihydrogène est stocké dans un volume de 55 L. Ce qui représente néanmoins un volume très voir trop important.

Pour faire face à cet inconvénient, les chercheurs ont décidé d'accentuer la pression pour ainsi augmenter la densité volumique du dihydrogène.

##### Stockage à haute pression :

- **Fonctionnement:**

Les chercheurs ont réussi à compresser l'hydrogène sous une pression de 700 bars obtenant ainsi une densité volumique d'environ  $42 \text{ kg.m}^{-3}$ . Ce qui correspond à un volume de 95 L pour une masse de 4 kg d'hydrogène. Le problème majeur pour réaliser cette technique est le contenant. En effet, l'hydrogène étant l'élément le plus petit, le mettre sous une pression aussi forte favorise les risques de fuite, de fissures et donc de dangers. Pour faire face à ce problème, les chercheurs ont créé des réservoirs spécifiques à l'hydrogène et résistant aux fortes pressions (voir annexe 5).

Grâce à la création de cette technologie il est désormais possible et facile de stocker le dihydrogène à cette pression.

- **Utilisation actuelle**

C'est pourquoi aujourd'hui la majeure partie des voitures à hydrogène est équipée de cette technologie, qui permet donc en quelques bouteilles de stocker les 4 kg d'hydrogène nécessaires pour faire entre 500 et 600 km.



*Illustration n°14- Voiture équipée de réservoirs*

- **Avantages et inconvénients**

Quand les quantités nécessaires ne dépassent pas l'ordre de la dizaine de kilogrammes, cette technique semble présenter les meilleurs rapports quantité-prix. Cependant, dès que l'on veut stocker et déplacer plus d'hydrogène, le problème de l'encombrement se pose.

### **II.1.2. Stockage sous forme liquide**

#### **Pourquoi le stockage liquide ?**

Comme nous l'avons vu précédemment le stockage sous forme gazeux est un bon moyen pour équiper des voiture ou des moyens de transport mobile. Cependant, dans une optique de transport de masse du dihydrogène, cette technique semble trop encombrante. C'est pourquoi les chercheurs ont étudié un moyen d'augmenter encore plus la densité volumique du dihydrogène.

#### **Stockage liquide :**

- **Fonctionnement:**

Ils ont ainsi découvert qu'en mettant l'hydrogène sous forme liquide celui-ci atteignait une densité volumique de  $70,8 \text{ kg.m}^{-3}$ , soit près de 800 fois la densité volumique de l'hydrogène sous sa forme gazeuse. Ce qui correspond à un volume de 56 L pour une masse de 4 kg de dihydrogène. Le problème majeur pour réaliser cette technique est encore le contenant. En effet, la température de liquéfaction de l'hydrogène étant de  $-258,5^\circ\text{C}$  -soit 20,5K- l'enjeu est ici de créer un réservoir capable de refroidir l'hydrogène jusqu'à cette température et de maintenir cette dernière constante. Les chercheurs ont ainsi réussi à créer des bouteilles en acier inoxydable appelées cryostat pouvant donc contenir l'hydrogène liquide conservé sous forme cryogénique. Cette technologie possède une double isolation thermique afin de minimiser les apports inévitables de chaleur extérieure.

La première couche permet de protéger l'hydrogène liquide des apports de chaleur par conduction directe, cette protection se fait grâce à une fine couche de vide entre les parois du cryostat. La deuxième couche protège l'hydrogène des apports de chaleur par rayonnement et est constituée d'une superposition de feuilles en métal réfléchissantes disposées entre les parois. Cependant, l'isolation de ces réservoirs ne pouvant être totale, ils ne peuvent être imperméables car ils doivent permettre à l'hydrogène qui n'est plus sous forme cryogénique, de s'échapper sans augmenter la pression dans le réservoir. Ainsi se pose le problème de l'utilisation dans un véhicule mobile comme la voiture. En effet, l'utilisateur ne peut donc pas laisser sa voiture dans un lieu confiné. C'est pourquoi le réservoir d'hydrogène liquide ne semble pas être le meilleur moyen de faire fonctionner des véhicules de particuliers. Cependant, il présente un grand avantage dans l'industrie aéronautique ou pour des applications de stockage stationnaire (hôpitaux, station service, etc.)

En effet, la contenance de ces réservoirs pouvant aller de quelques litres à de centaines de mètres cubes, de nombreux sites de lancements spatiaux, comme le site de Kourou, s'en sont équipés pour fournir l'hydrogène nécessaire à leurs fusées.

- **Avantages et inconvénients**

Quand il s'agit de grands volumes à déplacer, le stockage sous forme liquide est le plus pratique du fait de sa forte densité volumique. Cependant, l'énergie nécessaire au maintien de la

température de liquéfaction est tellement importante qu'elle engendre un surcoût considérable. C'est pourquoi cette technologie ne peut être appliquée qu'à des échelles vraiment rentables comme les stations de lancements spatiales ou de grandes structures comme des hôpitaux car ça ne serait pas rentable au niveau des transports de particuliers.

### **II.1.3. Stockage sous forme solide**

#### **Pourquoi le stockage solide ?**

Comme nous l'avons vu précédemment les moyens de stockages se basant sur la mise du gaz sous haute pression, ainsi que ceux se basant sur la liquéfaction ne permettent pas de transporter une très grande quantité de gaz et présentent certains risques. Ainsi, il a fallu faire face à des contraintes de conditionnement qui étant très technologiques sont très coûteuses et augmentent les risques de fuites.

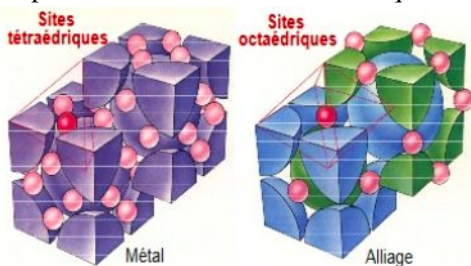
C'est pourquoi, les chercheurs se sont penchés sur une technique révolutionnaire : le stockage sous forme solide.

#### **Fonctionnement et évolution**

- **Principe**

Système hydrogène métallique : Le stockage sous forme solide ne permet pas de mettre l'hydrogène à l'état solide. C'est en passant par un intermédiaire solide que l'hydrogène gazeux  $H_2$ , être absorbé dans le composé solide. Ce principe se base donc sur la capacité d'un métal à absorber l'hydrogène de manière réversible. Les composés ainsi formés sont nommés les hydrures métalliques. Ils ont une densité volumique de stockage supérieure à celle de l'hydrogène liquide, ce qui rend le stockage de l'hydrogène sous forme d'hydrure un moyen viable pour le développement futur de l'hydrogène en tant que combustible.

Nous allons maintenant expliquer le fonctionnement du stockage du dihydrogène dans un métal. Dans un premier temps, sous une pression d'une dizaine de bars, l'hydrogène est absorbé par le métal. Les molécules de dihydrogène vont se dissocier et les atomes d'hydrogène vont se glisser dans les sites interstitiels du métal pour former un hydrure. En fonction du métal utilisé, les sites interstitiels sont plus ou moins denses, ainsi la quantité de  $H_2$  pouvant être contenue est différente.



*Illustration n°15 - Schéma de différents sites interstitiels*

Une fois l'hydrogène absorbé, il peut être, par l'intermédiaire des galettes d'hydrure, transporté en toute sécurité. Enfin, lorsque l'on désire récupérer ou utiliser l'hydrogène contenu dans les galettes, il suffit de baisser la pression en dessous de la pression d'équilibre pour que la déshydrogénation ait lieu. L'avantage de ce procédé est que la pression nécessaire pour que l'hydrogène soit résorbé est de 2 bars, soit la pression nécessaire pour faire fonctionner une PAC. Les galettes d'hydrure peuvent être directement couplées à une pile à combustible. Ainsi, l'hydrogène est récupéré dans sa totalité.

- **Quel métal choisir ?**

	Kg H <sub>2</sub> /m <sup>3</sup>	4kg de H <sub>2</sub> en litre
MgH <sub>2</sub>	105	38L
LaNi <sub>5</sub> H <sub>6</sub>	123	33L
Mg <sub>2</sub> NiH <sub>4</sub>	154	26L
Ti-V-Cr	205	19L

*Illustration n°16- Tableau comparatif pour un stockage de 4kg d'H2*

Après des années de recherches théoriques et expérimentales, c'est en 2012 que le stockage de l'hydrogène avec un métal tel que le magnésium a commencé à être mis en avant au niveau expérimental. Avant, cette technique avait été testée avec différents métaux. Ainsi, les chercheurs ont pu déterminer quel était le meilleur métal à utiliser pour obtenir un rendement maximal. Voici, ci-dessus, un tableau non-exhaustif des résultats obtenus avec différents types de métaux.

Les chercheurs ont donc choisi le magnésium pour ses propriétés absorbantes et son prix relativement bas. De plus, pour augmenter la capacité d'absorption de ces disques, les chercheurs ont ajouté des additifs tels que le vanadium, le nickel, des alliages comme le Ti-V-Cr, et du graphite pour diminuer sa température de réaction [voir annexe 6].

Ainsi, un disque de 30 cm de diamètre et de 1 cm d'épaisseur contient l'équivalent de 500 litres d'hydrogène à pression atmosphérique et à température ambiante.



*Illustration n°17- Galette de Magnésium*

Nous voyons bien ici que la recherche autour de ce moyen de stockage fait l'objet de nombreuses études depuis des années et continue encore à se développer. De plus, l'INERIS a certifié la faible réactivité du matériau composite, ainsi les risques liés au comportement pyrophorique sont grandement réduits.

#### **Utilisation actuelle et future :**

- **Actuellement**

De nombreux réservoirs contenant des galettes de magnésium, ont été installés dans des laboratoires de recherches. Ils ont dans un premier temps été installés au stade de prototypes. Ils sont maintenant devenus permanents depuis que la société française McPhy a commencé le développement et l'industrialisation de ces réservoirs.

En effet, la société McPhy est une des seules du marché à proposer des moyens de stockage d'hydrogène sous forme « solide ».

Proposant au départ une solution pour stocker de l'hydrogène dans des réservoirs de galettes de magnésium, la société s'est développée et propose désormais un large panel de produits liés à l'hydrogène, allant des systèmes couplant un électrolyseur avec un réservoir stockant l'hydrogène à des stations de stockages d'hydrogène.



*Illustration n°18- Exemple de réservoir au CNRS*

Cette technologie, permet donc de remplacer le réseau logistique complexe (camion citerne, pipeline, etc.) par une production de l'hydrogène sur place, associée à des réservoirs de stockage d'hydrogène.

- **Dans le futur**

La société McPhy propose la création d'un réseau diminuant le gaspillage en énergie électrique. En effet, dans un futur prônant le non gaspillage de l'énergie, cette technologie pourrait

permettre de faire face à la perte d'électricité ou faire office d'intermédiaire à la perte de l'électricité. Le surplus d'électricité serait dévié vers des usines créant de l'hydrogène. Ce dernier, serait ainsi stocké dans de grand conteneur de magnésium solide. Et lorsque, la demande en électricité serait très forte – par exemple, pendant les grandes vagues de froid - l'hydrogène serait utilisé pour fabriquer de l'électricité grâce à des piles à combustibles. Ainsi, cette méthode permettrait de faire face à l'impossibilité de stocker l'électricité.

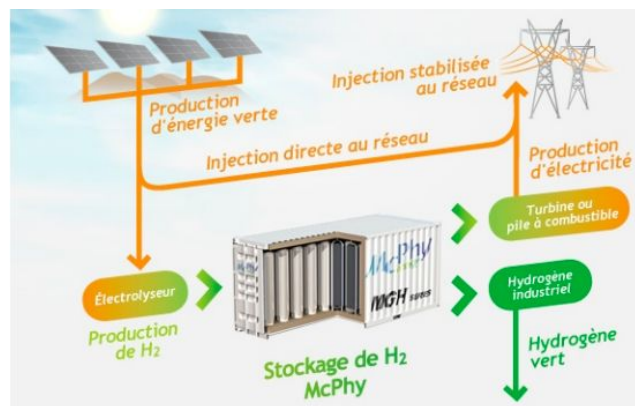


Illustration n°19- Le stockage McPhy

### Rentabilité de cette technologie :

- **Au niveau du transport**

Cette technologie, bien que révolutionnaire par rapport à celles vues précédemment, ne semble cependant pas convenir pour équiper des moyens de transports. En effet, l'intermédiaire métallique est très lourd, et poserait des problèmes de poids conséquents. Par exemple, pour faire fonctionner une voiture il faudrait embarquer un réservoir contenant 250 kg d'hydrure métallique sous forme de galettes, une masse qui n'est évidemment pas négligeable.

Cependant, pour un stockage sur site, cette technologie semble convenir parfaitement. En effet, sa capacité de stockage supérieure à celle sous forme comprimée ou liquide permet d'équiper de petits espaces comme des laboratoires. De plus, son caractère inoffensif permet, a contrario des autres moyens de stockage, d'assurer une sécurité totale à tout utilisateur et dans toute structure. Pour finir, les rendements actuels sont d'environ 97 %, ce qui constitue un atout majeur pour une utilisation dans un contexte d'économie d'électricité. Même si pour l'instant le stockage de l'hydrogène solide ne semble pas être un moyen parfait pour équiper des véhicules de transport dû à sa masse trop importante, il pourrait être et est déjà un moyen viable pour stocker de l'hydrogène dans un lieu stationnaire.

Pour l'instant le stockage sous forme gazeuse à haute pression semble être un moyen rentable pour équiper des voitures car les réservoirs peuvent fournir la quantité suffisante. Cependant, pour des quantités plus importantes, le stockage sous forme liquide est pour l'instant le plus utilisé autant pour un stockage mobile que pour un stockage stationnaire. Néanmoins, l'arrivée sur le marché du stockage de l'hydrogène sous forme solide, peut révolutionner le stockage stationnaire car il n'est pas dangereux et a un très bon rendement.

On remarque ainsi que chaque avantages et inconvénients de ces techniques s'adaptent à une utilisation particulière.

Ainsi, pour l'instant on voit qu'il n'existe pas de solution miracle pour transporter l'hydrogène en toute sécurité sans avoir à faire face à un poids trop important ou un coût trop onéreux.

Forme H <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> (gazeux)	H <sub>2</sub> (200bars)	H <sub>2</sub> (700bars)	H <sub>2</sub> (20K=-253°C)	Mg <sub>2</sub> NiH <sub>4</sub>
kg.m <sup>-3</sup>	0,09	18,01 ou 14	42,1	70,8	154
4kg en L	45000L	0,9kg- → 50L 4kg → 222L	95L	56L	26L


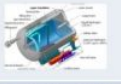

Etat	Pression bar	Température °C	Capacité kg/m <sup>3</sup> matériau	Capacité % masse H <sub>2</sub> /système	Sécurité
Gaz comprimé 	350-700	25°C	45	6	Haute P
Liquide cryogénique 	1	-253 °C	70	6	Cryogénique Evaporation
Solide (hydrures métalliques) 	1-10	25°C	100	2	Basse P

Illustration n°20- Tableaux comparatifs des différents stockages mobiles de H<sub>2</sub>

## II.2. Sites intégrés

### II.2.1. Qu'est ce qu'un site industriel intégré ?

Les sites intégrés se développent de plus en plus depuis quelques années. Il s'agit de sites souvent industriels qui produisent leur énergie et qui la consomment dans la même usine. En effet, les enjeux environnementaux actuels poussent de plus en plus d'entreprises à devenir leur propre producteur d'énergie. Ceci leur permet de réduire le transport énergétique, de s'assurer de la provenance de leur énergie (souvent plus respectueuse de l'environnement que celle d'un fournisseur externe) et de gérer leur consommation en fonction de leur production. Cette production d'énergie peut être sous forme calorifique, solaire, éolienne ou gazeuse...

Cependant, aucun site intégré utilisant l'hydrogène n'existe à ce jour. Les usines produisant l'hydrogène ne l'utilisent pas, elles préfèrent revendre l'énergie qu'elles produisent. Les sites intégrés seraient pourtant une bonne solution car l'hydrogène est assez difficile à stocker. Il serait donc plus simple de l'utiliser directement après sa production. L'utiliser sur place permettrait aussi de réduire les risques liés au transport (fuites principalement). Les coûts de transport diminueraient également car le stockage de l'hydrogène est très volumineux et donc coûteux.

### II.2.2. Etude de cas n°1 : Système ATAWAY

Le système ATAWAY propose une solution aux problèmes de l'approvisionnement énergétique des sites isolés (ou trop éloignés des centrales de production).

Ce système utilise des énergies respectueuses de l'environnement tout en résolvant le problème de la production par intermittence de celles-ci. Il propose une solution de stockage et un approvisionnement continu. Cela permet à certains sites d'atteindre une autonomie d'énergie totale sans gaspillage énergétique. Ce système se divise en deux parties : stockage court terme (jour-nuit) avec des batteries et stockage long terme (plusieurs mois) avec une chaîne hydrogène.

Celui-ci fonctionne en deux temps. Pendant les périodes de forte production, le système stocke l'énergie sur les batteries jusqu'à ce qu'elles soient pleines et le surplus est transformé en hydrogène grâce à une électrolyse de l'eau. Cet hydrogène est ensuite stocké à basse pression. Et durant les périodes de faible production, les piles à combustible prennent le relais et utilisent l'hydrogène qui avait été stocké en prévision.



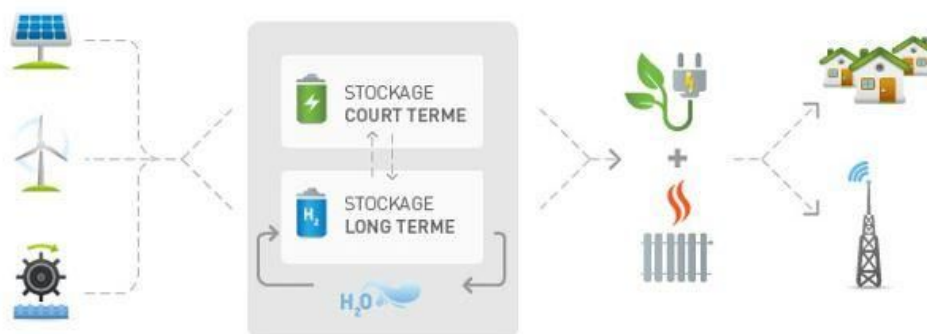


Illustration n°21- Système ATAWAY, ATAWAY

### **II.2.3. Etude de cas n°2 : Liverpool-Manchester Hydrogen Cluster Project**

Ce projet cherche à réduire la quantité de carbone dans les usines grâce à l'hydrogène. L'objectif de ces recherches est d'utiliser de plus en plus l'hydrogène sous forme moléculaire (H<sub>2</sub>) afin de réduire la consommation de gaz naturel. Cette utilisation pourrait permettre aux réseaux de gaz de se décarboniser.

Les acteurs du projet veulent introduire l'hydrogène dans le réseau gazier de la région de Liverpool-Manchester (Royaume Uni) afin de remplacer le gaz naturel, essentiellement composé de méthane (CH<sub>4</sub>) par de l'hydrogène gazeux. Pour cela, ils souhaitent grâce à un processus de reformage du méthane, convertir le gaz naturel en hydrogène gazeux. Le CO<sub>2</sub> produit par cette réaction chimique pourrait ensuite être capturé et stocké dans des réservoirs offshore épuisés. L'hydrogène gazeux produit pourrait ensuite être injecté en mélange avec le gaz naturel dans le réseau de distribution.

Ce projet est prévu pour les années 2020 et pourrait ouvrir la voie pour d'autres projets similaires au Royaume-Uni.

### **II.3. L'Hydrogène dans le réseau de gaz naturel**

L'une des solutions pour assurer le stockage et le transport de l'hydrogène serait d'utiliser le réseau de gaz naturel pour transporter un mélange constitué d'hydrogène et de gaz naturel. Cette solution aurait comme avantage d'utiliser le réseau de distribution du gaz naturel qui existe déjà, alors que la mise en place de réseaux de transport d'hydrogène en Europe coûterait 50 milliards d'euros.

Cette solution n'est à l'heure actuelle qu'à l'état de projet puisque de nombreuses interrogations concernant la sécurité et la rentabilité du projet doivent encore être levées. L'un des principaux verrous à l'utilisation de l'hydrogène dans le réseau de gaz naturel est l'augmentation de la pression que l'ajout de l'hydrogène engendrerait. Le réseau de distribution de gaz fonctionne actuellement sous faible pression, la présence d'hydrogène impliquerait de potentiels risques d'explosions ou de fuite de l'hydrogène.

De nombreuses études ont déjà été menées à ce sujet et ont permis de répondre à cette interrogation. C'est le cas notamment des projets Althytude et Naturalhy qui ont permis d'estimer le pourcentage d'hydrogène maximal pouvant être injecté dans les canalisations de gaz naturel sans risque en terme de sécurité.

De plus, les projets ALTHYTUDE (Alternative Hydrogène dans les Transports Urbains à Dunkerque) et Naturalhy ont permis de mettre en avant que les bénéfices environnementaux n'étaient pas seulement liés à la baisse des gaz à effet de serre émis et à la décroissance des émissions de

polluants. La présence d'hydrogène dans le gaz naturel améliore sa combustion ce qui permet un meilleur rendement notamment lors de l'utilisation du mélange gaz-hydrogène en tant que carburant pour le transport autoroutier.

Suite aux conclusions apportées par les études, plusieurs projets visant à démontrer que l'utilisation de l'hydrogène couplé au gaz naturel est une solution économiquement, environnementalement et techniquement viable et ce à une échelle plus importante, ont vu le jour. Ces projets doivent répondre aux nombreuses interrogations qui subsistent : Quelle quantité d'énergie pourra être fournie par le mélange hydrogène-gaz naturel ? Quel sera le rendement de ce mélange ? Quelles seront les conséquences pour les installations gazières (domestiques ou industrielles) sur le court et le long terme ? Autant de questions auxquelles les nouveaux projets démonstrateurs GRHYD et Jupiter 1000 tentent, aujourd'hui, d'apporter des réponses.

### **II.3.1. Le Projet GRHYD**

Le projet GRHYD est un projet démonstrateur mené par le groupe Engie à Dunkerque. Ce projet repose sur le principe du « power to gas ». Le principe du « power-to-gas » consiste à stocker l'énergie produite de manière renouvelable lors des périodes de surproduction en la transformant en hydrogène. L'hydrogène, produit par électrolyse de l'eau, sera ensuite injecter dans le réseau de gaz naturel afin de pouvoir l'utiliser dans l'ensemble des installations utilisant le gaz naturel (chauffage, carburant pour bus...)

Le projet GRHYD est composé de deux projets de démonstrations :

- Le premier projet est un projet de carburant afin de tester l'utilisation de l'Hythane (carburant composé de 80% de gaz naturel et de 20% d'hydrogène) dans le réseau de transport en commun de Dunkerque. Engie met ainsi en place une station de bus alimentée par un mélange d'hydrogène et de gaz naturel. Le taux d'hydrogène dans le carburant variera entre 6% et 20% et permettra de déterminer la composition du mélange hydrogène-gaz ayant le meilleur rendement.
- Le second projet est un projet d'injection d'hydrogène dans le réseau de distribution de gaz naturel. Un quartier, entièrement construit pour l'occasion, de 200 habitations sera alimenté par un mélange d'hydrogène et de gaz naturel dans des proportions d'hydrogène inférieures à 20%. Ce projet permettra de mesurer les impacts de la distribution du mélange gaz-hydrogène sur les appareils à gaz domestiques (chaudières, cuisinières, chauffage...) mais aussi sur le réseau de distribution (vannes, tuyaux, connections...). L'expérimentation d'un mélange hydrogène-gaz à une échelle aussi importante permettra de déterminer si l'utilisation de l'hydrogène est une solution viable à l'échelle d'une ville.



Illustration n°22- Schéma du principe du projet GRHYD

**b) Le projet Jupiter 1000**

Le projet Jupiter 1000 s’inscrit dans la continuité du projet GRHYD, celui-ci reposant aussi sur le principe du « power to gas ». Ce projet démonstrateur mené par le groupe GRTgaz sur le site de Marseille vise à transformer l’électricité produite par des éoliennes en hydrogène afin de pouvoir le transporter.

L’hydrogène ainsi produit pourra soit être injecté directement dans le réseau de distribution de gaz, à l’instar du projet GRHYD, soit être transformé en méthane par le biais d’un réacteur de méthanation et d’un appareil de capture de CO<sub>2</sub>.

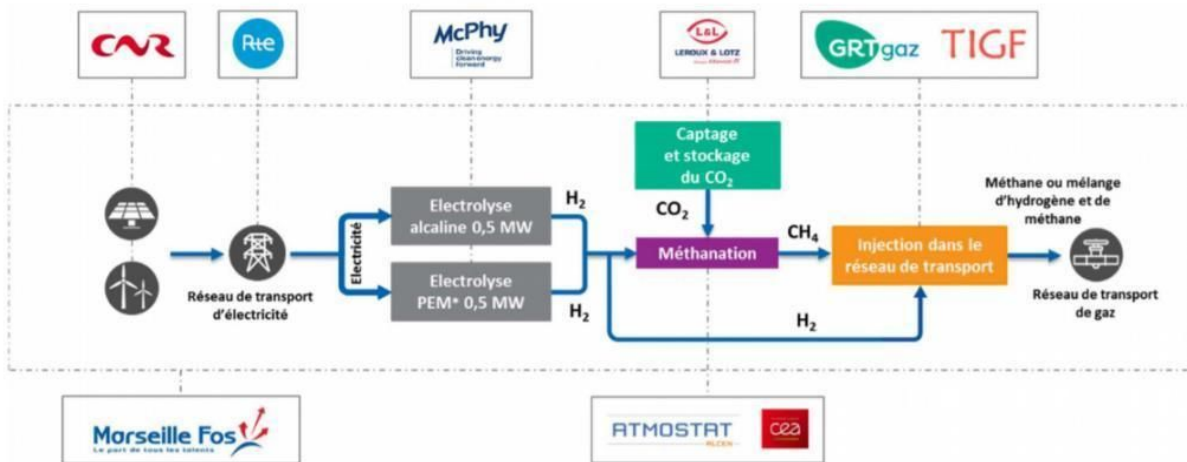


Illustration n°23- Schéma du principe du projet « JUPITER 1000 »

La structure de captage du dioxyde de carbone capture le CO<sub>2</sub> émis par les fumées industrielles voisines. Le dioxyde de carbone est ensuite séparé et pourra être mélangé à l’hydrogène afin d’obtenir du méthane et du dioxygène. Le méthane, qui est le principal composant du gaz naturel, pourra ainsi être utilisée directement comme source d’énergie ou être associé à de l’hydrogène. Cette opération permet de réduire l’émission de dioxyde de carbone dans l’atmosphère en le séparant des fumées des chaudières industrielles voisines. La capture du CO<sub>2</sub> par l’unité de captage, est un moyen de valoriser

ce gaz, qui est l'un des principaux polluants atmosphériques. Cela permettrait aussi de diminuer la pollution de l'air dans les zones fortement industrialisées.

Ces projets de valorisation de l'hydrogène, vise à favoriser l'utilisation d'énergie renouvelable dans la consommation d'énergie. Les projets de démonstration GRHYD et JUPITER 1000 sont à l'heure actuelle toujours en cours d'exécution, ils ont néanmoins pu mettre en avant de nombreux avantages concernant l'utilisation de l'hydrogène dans le réseau de gaz naturel.

- L'un des principaux avantages de l'utilisation du réseau de gaz naturel est l'utilisation d'infrastructures énergétiques (éoliennes, panneaux solaires...) et gazières (valve, tuyaux...) déjà existantes, évitant de lourds investissements.
- Le second avantage est que l'utilisation du mélange gaz-hydrogène permet d'augmenter le rendement des applications gazières. Les premières données montrent un rendement supérieur de 60% à celui du gaz naturel seul.

### III. Les différentes utilisations de l'Hydrogène

#### III.1. La pile à combustible

*Histoire de la pile à combustible : cette partie du rapport est disponible en Annexe n°6.*

La pile à combustible est un générateur d'électricité et de chaleur. Son fonctionnement est inverse à celui de l'électrolyse: on transforme de l'énergie chimique en énergie électrique.

Toute pile à combustible comporte une membrane électrolyte, milieu conducteur ionique acide ou basique, séparant deux électrodes. D'un côté, au niveau de l'anode, une réaction électrochimique d'oxydation a lieu : on consomme l'oxydant et on produit des électrons. De l'autre, à la cathode, une réaction électrochimique de réduction se réalise: on consomme le réducteur et les électrons. Au niveau de l'électrolyte, une membrane particulière est présente, parfaitement étanche à l'oxygène et l'hydrogène pour éviter leur mélange.

Pour notre projet, c'est la pile à combustible à hydrogène qui nous intéresse. Ainsi, le dihydrogène sera notre combustible et le dioxygène sera notre comburant. A présent, étudions la réaction chimique qui se réalise.

Dans un premier temps, c'est l'hydrogène qui réagit, au niveau de l'anode. Les ions  $H^+$  sont attirés par le dioxygène et se déplacent vers la cathode. En raison de ses propriétés chimiques, la membrane électrolyte ne laisse passer que les protons. Les électrons composant le dihydrogène sont donc contraints à circuler dans un circuit extérieur, préalablement préparé, pour accéder à la cathode. C'est ce passage des électrons dans le circuit extérieur qui crée un courant électrique.

Cette réaction d'oxydation a pour équation :  $H_2 (g) = 2 H^+ (aq) + 2 e^-$ .

Ensuite, à la cathode, les électrons vont se recombiner avec les protons et le dihydrogène formé va réagir avec le dioxygène pour former de l'eau. Nous pouvons modéliser cette deuxième réaction par l'équation suivante :  $4 H^+ (aq) + 4 e^- + O_2 (g) = 2 H_2O (l)$ .

Finalement, nous pouvons modéliser le phénomène chimique de la pile à combustible à hydrogène par une réaction globale simple :  $2 H_2 (g) + O_2 (g) = 2 H_2O (l)$ .

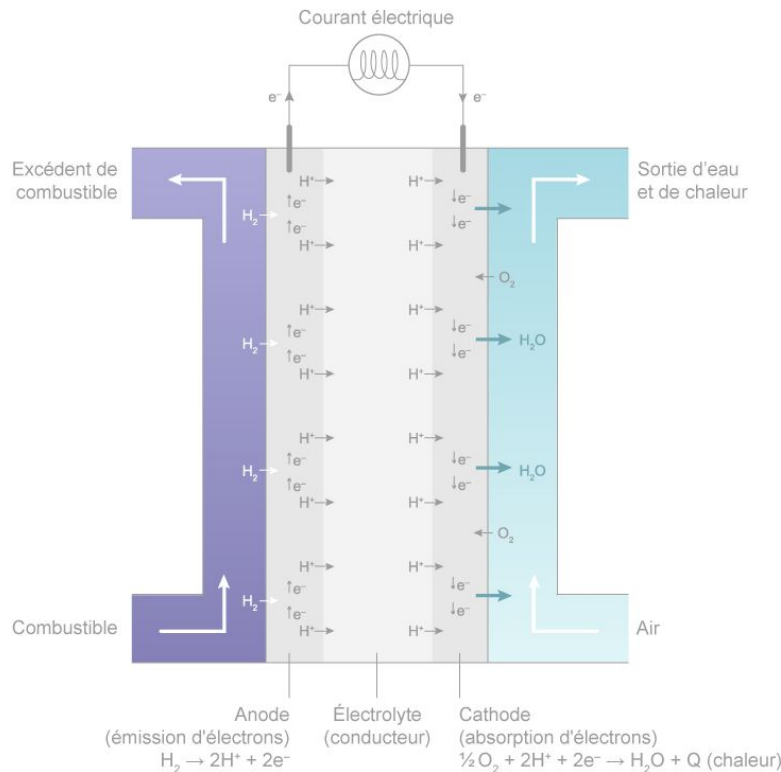


Illustration n°24- Schéma du fonctionnement de la pile à combustion à hydrogène

*Les types de piles à combustible à hydrogène :*

Différents types de piles à combustible à hydrogène existent. Ces piles se différencient par la composition de l'électrolyte, la température de réaction et la puissance délivrée. Suivant cette puissance, les piles ne sont pas utilisées dans les mêmes domaines ni pour les mêmes besoins.

Voici un tableau qui récapitule les caractéristiques des principales piles sur le marché.

Type	Électrolyte	Température	Puissance	Utilisation
PEMFC	membrane polymère	80 °C	100 mW à 10 MW	portable, transport, stationnaire
SOFC	mélange d'oxydes	900 °C	1 à 1000 kW	stationnaire, transport
DMFC	membrane polymère	120 °C	1 à 100 W	portable (téléphonie, informatique)
AFC	hydroxyde de potassium	90 °C	1 kW à 10 kW	stationnaire, transport
PAFC	acide phosphorique	200 °C	10 kW à 10 MW	stationnaire
MCFC	mélange de carbonates	650 °C	1 à 10 MW	stationnaire

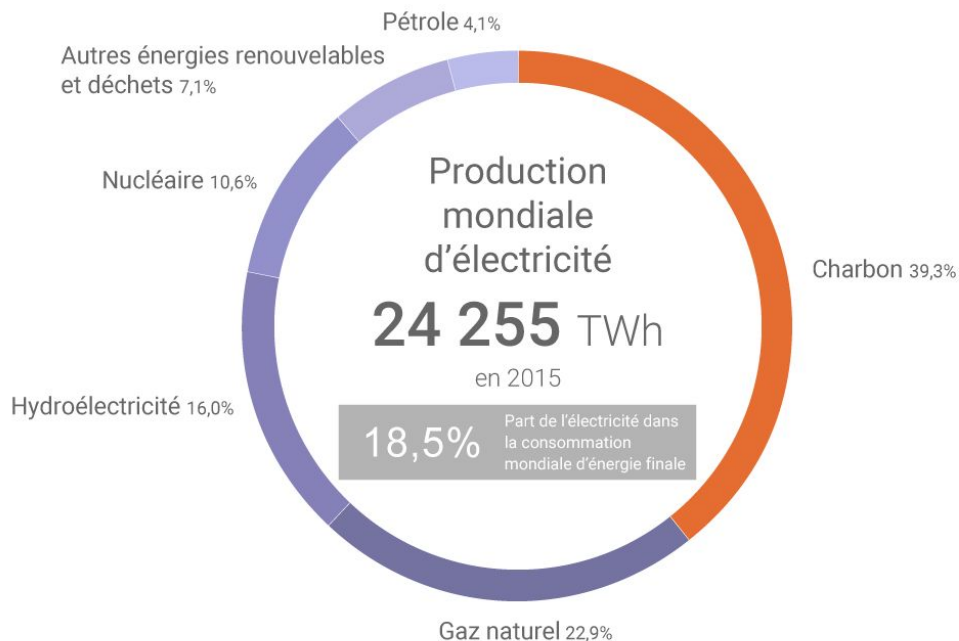
*Illustration n°25- Tableau récapitulatif des principales PAC*

Nous avons choisi de vous présenter en détails deux d'entre elles, qui représentent bien les avancées actuelles en terme de technologie. Ces deux types de pile sont détaillés en Annexe n°7.

*L'intérêt des piles à combustible :*

Faire fonctionner une pile à combustible est assez onéreux, notamment en raison de la quantité importante de catalyseur nécessaire (le catalyseur peut être du platine, un métal rare), et du coût des membranes échangeuses de protons. Néanmoins, l'intérêt montré pour la pile à combustible ne va qu'en grandissant et il est donc logique de se demander pourquoi cette pile devient si prisée.

Lors du passage dans le circuit extérieur, l'énergie électromotrice des électrons est exploitée. En plaçant au préalable un générateur dans ce circuit, le passage des électrons va permettre la création d'un courant électrique. C'est donc une nouvelle source de production d'électricité !



*Illustration n°26- Répartition de la production électrique mondiale par source d'énergie en 2015*

Actuellement, la pile à combustible ne représente qu'une infime partie de la production mondiale d'électricité. L'énergie thermique représentant 72 % de la production mondiale en 2015, et l'énergie hydroélectrique 16 %. Face au problème de la pollution et de l'utilisation massive de ressources non renouvelables pour produire l'électricité, la PAC présente des qualités intéressantes. Ainsi, nous allons voir si la PAC peut, à court ou à long terme, concurrencer ces autres moyens de production d'électricité.

Le principal avantage de produire de l'électricité avec une PAC et non avec de l'énergie fossile est qu'il n'y a aucun rejet polluant. En effet, la réaction chimique intervenant ne produit que de l'eau et de la chaleur. Cet atout est très important car la population est constamment contrainte à économiser les ressources non renouvelables, qui s'épuisent. Une réduction de la production d'électricité avec de l'énergie thermique est donc espérée.

Par ailleurs, le rendement de la réaction est très important et ne se résout pas uniquement au rendement électrique. La chaleur dégagée par la réaction peut être exploitée. Pour utiliser cette chaleur, on applique le principe de cogénération qui consiste à produire de l'énergie mécanique et de l'énergie thermique à partir d'une seule source primaire. Dans notre cas, la PAC peut servir à alimenter un moteur à gaz, générant de l'électricité, pendant que la chaleur de la réaction est récupérée au niveau des gaz d'échappement et de l'huile de refroidissement du moteur. Ainsi, les rendements globaux peuvent dépasser 80 % avec 30 à 40 % de rendements électriques et 40 à 50 % de rendements thermiques. En comparaison, le rendement total n'est que de 30-35 % dans une centrale nucléaire et de 40 % pour les centrales à charbon.

L'utilisation de l'hydrogène à travers les piles à combustible est donc très intéressante, la perte d'énergie étant moindre. Il faudra néanmoins parvenir à réduire les coûts liés à cette expérience pour que l'importance de ce procédé dans le monde soit meilleure.

## **III.2. Les Transports**

Les transports sont responsables d'une part non négligeable des émissions de gaz à effet de serre (GES), dont le CO<sub>2</sub>. En 2014, le pourcentage mondial d'émissions de CO<sub>2</sub> attribuables au transport s'élevait à 24 %, d'après l'International Energy Agency, une organisation mondiale créée en 1974 qui étudie tous les secteurs énergétiques. En France, en 2013, la part des transports dans l'émission globale des GES est de 38 % dont 95% proviennent des transports routiers, d'après l'INSEE.

En plus de la problématique environnementale, se pose la question du coût des carburants fossiles et de la transition énergétique. Dans cette optique, l'utilisation de l'hydrogène présente de nombreux avantages ce qui fait de cette molécule un sujet de recherche et d'expérimentation crucial dans les secteurs routier, ferroviaire, aéronautique mais aussi aérospatial. Dans cette partie, nous aborderons divers cas de l'utilisation de l'hydrogène dans les domaines cités au-dessus.

### **III.2.1. Automobile**

Nous avons vu précédemment que le développement de l'hydrogène en tant que vecteur énergétique pourrait révolutionner notre manière de produire l'énergie. Nous allons nous intéresser ici à son utilisation dans la logistique des entreprises et les transports routiers.

L'hydrogène est déjà répandu dans le secteur de la logistique où des chariots de manutention sont alimentés par une PAC à hydrogène.

Présents au Canada et aux Etats-Unis depuis 2006, ils arrivent plus récemment en Europe. En juillet 2015, la plate-forme logistique de Prélcentre (Loiret), est la première du continent à s'équiper d'une flotte constituée à 100% de chariots à PAC. Élaborés par le spécialiste en engin de manutention Jungheinrich et HyPulsion, ces chariots permettent à Prélcentre de répondre de manière innovante à un besoin de gain de productivité tout en respectant l'environnement.

En effet, ces chariots présentent de nombreux avantages, notamment par rapport aux problématiques Qualité, Sécurité et Environnement des entreprises. Dans un premier temps, la recharge de l'appareil est moins contraignante qu'avec un chariot classique. La recharge du réservoir à hydrogène ne prend que 1 à 3 minutes et assure une autonomie de 8 heures, ce qui est adapté aux horaires types 3x8. Ainsi, le cariste gagne en temps et en sécurité : il n'est plus nécessaire de manipuler les lourdes batteries des chariots classiques. Jungheinrich continue de travailler sur le chariot à hydrogène. L'entreprise a créé une équipe de projet « afin d'apporter les modifications nécessaires au remplacement des batteries classiques par des piles à hydrogène Gendrive d'HYpulsion », sur leurs différents modèles de véhicules de manutention. Ils sont disponibles au titre de démonstrateur client.

Aujourd'hui, de plus en plus de plates-formes logistiques et sites industriels en France et dans le monde font le choix de l'hydrogène pour leur flotte de véhicules de manutention. L'entreprise Toyota sur son site de Toyota City au Japon est un exemple avec l'acquisition en mars 2018 de 22 chariots à PAC hydrogène.

Dans le but de réduire la pollution dans les milieux urbains de nombreux projets et innovations sont réalisés. Dans ces zones, c'est notamment au niveau des transports en commun que ces projets se développent avec ,par exemple, le bus à hydrogène.

Si l'hydrogène est souvent synonyme de technologie récente, ce n'est pas nécessairement le cas pour les bus. En effet, le développement des bus à hydrogène a commencé dans les années 90. Dès 1992, l'entreprise Ballard met en service son premier bus à hydrogène. Ce bus est le premier à fonctionner grâce à une pile à hydrogène. Il s'en suivra de nombreux autres modèles de différentes marques comme MAN ou plus récemment Solaris. Cette expérience de plus de 25 ans dans l'élaboration de ce genre de piles à combustible a permis aux bus à hydrogène d'atteindre des niveaux de performance élevés et comparables à ceux des bus standards.



Illustration n°27- Bus  
à hydrogène

Un groupement d'autorités organisatrices de transport (AOT) connu sous le nom de H2 bus France travaille au déploiement de ce type de bus alternatifs à ceux déjà existants. Les projets portés par H2 bus France ont plusieurs objectifs : le premier est de diversifier les énergies dans les transports en utilisant des bus à hydrogène dans de grandes villes européennes comme Londres, Milan ou encore Berlin. Le second est de tester et surtout d'améliorer la technologie utilisée. Il s'agit d'un test grandeur nature. Finalement, ce genre de projet a également un but, moins technique mais tout aussi important, celui de faire découvrir aux utilisateurs cette technologie tout en les rassurant sur l'utilisation d'un combustible mal connu et souvent jugé dangereux. Actuellement de nombreuses métropoles s'intéressent à cette technologie comme Bordeaux, Montélimar et même Rouen.

Le reste des transports routiers est aussi concerné par les problématiques écologiques. Ainsi camions (voir annexe 8) et voitures sont touchés par les technologies à hydrogène. Actuellement les constructeurs automobiles développent de nouvelles technologies plus écologiques pour leurs modèles. Ce choix fait suite à de plus en plus de normes et réglementations en termes de pollution de la part de nombreux États, on peut citer par exemple la mise en place des vignettes écologiques à Paris. De ce fait, les constructeurs automobiles se tournent vers les moteurs électriques et les technologies à l'hydrogène. En ce qui concerne l'utilisation de l'hydrogène dans l'automobile, c'est l'entreprise japonaise Toyota qui se démarque. En effet, elle a été la première à commercialiser une voiture fonctionnant grâce à une PAC : la Toyota Mirai. Cette voiture est hybride et combine deux technologies pour restituer de l'énergie au moteur. Tout d'abord elle est équipée d'une pile à combustible qui transforme l'hydrogène stocké dans un réservoir pouvant contenir jusqu'à 5 kg d'hydrogène. Ensuite, des batteries sont présentes. Elles servent à économiser un maximum d'énergie car elles se rechargent lorsque le véhicule freine ou décélère. L'aérodynamisme de la voiture a



également été très travaillé, toujours dans le but d'économiser le plus d'énergie possible. Finalement la Toyota Mirai atteint une puissance de 155 chevaux, sa vitesse maximale est de 178 km/h et elle passe de 0 à 100 km/h en 9.6 secondes. En somme, les performances de cette voiture sont tout à fait comparables à celles des voitures thermiques de puissance équivalente. La pile à combustible a d'ailleurs été utilisée avec succès dans la compétition automobile (voir annexe 9). Cependant, cette nouvelle technologie implique des coûts de production plus importants, en effet elle est disponible à partir de 66 000 euros.



Illustration n°28- Toyota Mirai, voiture hybride

Les voitures roulant à l'hydrogène grâce à une PAC ont l'avantage d'être non polluantes, silencieuses et sont plus autonomes que des voitures électriques avec batteries car faire le plein d'hydrogène ne prend que quelques minutes. Ces nombreux avantages ont permis l'émergence de nouveaux taxis : les taxis Hype. Tous les modèles qui composent la flotte sont des Toyota Mirai. Ils ont été créés fin 2015 à l'occasion de la COP21 à Paris. Au début du projet, cette flotte comptait 5 véhicules. En 2017, elle était composée de 75 véhicules et l'objectif de 2020 serait de 200 automobiles. Paris a été la première capitale à profiter d'une telle flotte puis, suite au succès de cette initiative, d'autres villes européennes se sont dotées du même système. Les taxis Hype démontrent qu'une transition vers plus de véhicules ne rejetant ni gaz ni particules fines est possible. Cependant, le manque de stations de ravitaillement reste un problème majeur pour le développement des véhicules à hydrogène. La Toyota Mirai n'est d'ailleurs pas en vente en France en raison du réseau sous développé de pompes à hydrogène.

Conscientes de l'enjeu que pourrait avoir l'hydrogène dans le futur, les autorités publiques s'engagent pour le développement de l'hydrogène.

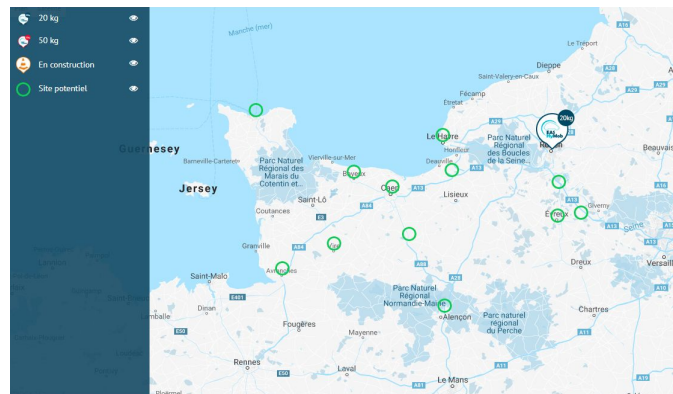


Illustration n°29- Régions investissant dans des transports moins polluants

En effet, en 2016, la région Normandie s'est engagée dans le programme EAS-MyMob, ce dernier visant à améliorer la « mobilité hydrogène ». Pour cela, la région va financer la création de 15 stations à hydrogène de type 350 bars. Parmi elles, 12 délivreront 20 kg par jour et 3 autres 50 kg par jour. Le but est de créer un maillage d'infrastructure de recharges situées à proximité des grands axes routiers et reliant les principales agglomérations. De plus, ces investissements permettront également la mise en place d'un nouveau parc automobile constitué de 250 véhicules hydrogène. Grâce à ce

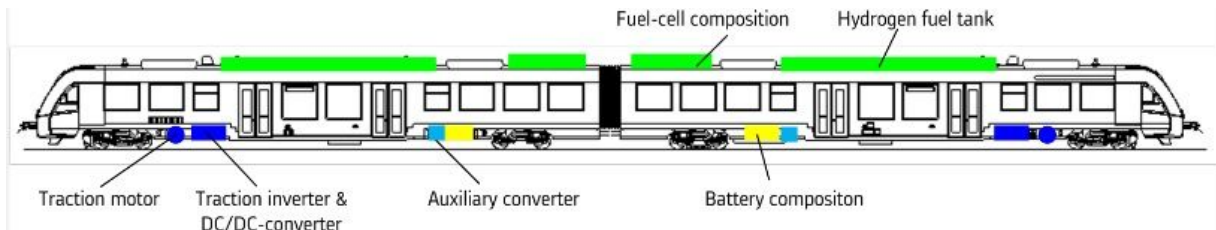
nouveau maillage et à la mise en circulation de nouveaux véhicules, le grand public se familiarisera avec les technologies hydrogène.

L'hydrogène est un combustible qui brûle au contact du dioxygène pour former de l'eau. Cette propriété permet d'utiliser l'hydrogène comme de l'essence dans les moteurs thermiques. Dès lors, en 1996, MAN proposait des moteurs thermiques à l'hydrogène dans ses bus. Chez les constructeurs automobiles, BMW a développé un véhicule pouvant rouler à l'essence ou à l'hydrogène liquide. Ce véhicule a été nommé BMW Hydrogen 7 et a été rendu public en 2006. Il utilise un moteur thermique classique qui a été modifié pour permettre la combustion de l'hydrogène. Cependant, cette voiture souffrait de nombreux défauts et la commercialisation fut stoppée en 2009. En effet, la consommation de la BMW Hydrogen 7 était le principal de ses défauts, il fallait 50 litres d'hydrogène liquide pour parcourir cent kilomètres contre environ 14 litres pour les véhicules utilisant une pile à hydrogène. Utiliser l'hydrogène dans un moteur à combustion pourrait devenir une solution dans le futur mais cette technologie n'est pas encore adaptée en 2018 car l'hydrogène est majoritairement produit grâce à des techniques rejetant des gaz à effet de serre. Ainsi la consommation excessive d'hydrogène de ces moteurs n'est pas adaptée aux objectifs écologiques voulus pour les nouveaux véhicules (voir annexe 10).

### **III.2.2. Vélo à hydrogène et secteur ferroviaire**

Des vélos à hydrogène ont déjà été développés au Japon et aux États-Unis. En France, l'entreprise pionnière est une PME basque, Pragma Industrie, avec le modèle "Alpha". Il s'agit d'un vélo à assistance électrique doté d'une PAC à hydrogène. L'hydrogène utilisé est stocké dans un réservoir inclu dans la structure du véhicule. Par rapport au vélo électrique muni d'une batterie classique, le temps de recharge en hydrogène est de 1 à 3 minutes contre 6 heures en moyenne pour la batterie électrique. De plus, le vélo Alpha possède une autonomie de 100 km contre 50 km pour un vélo électrique classique si le maximum de l'assistance est utilisé. L'enjeu, comme dans chaque domaine de la mobilité hydrogène, est de développer un moyen de transport sans émissions de CO<sub>2</sub>. Si le prix reste important (7500 euros), le vélo à hydrogène est plus abordable que la voiture et convient pour des usages urbains et professionnels. Plusieurs villes françaises et entreprises se sont déjà dotées de ces vélos. En Aquitaine, à Bayonne notamment, dans le cadre du projet européen MobyPost, la Poste utilise depuis juin 2015 une trentaine de ces vélos à hydrogène. A Saint-Lô (Manche), depuis décembre 2017, des vélos à hydrogène sont mis à la disposition des employés de l'hôpital. Ils ont aussi été adoptés par l'entreprise Lecapitaine, entreprise de Saint-Lô fabriquant du matériel frigorifique. La ville prévoit même d'ouvrir l'utilisation de ces vélos aux touristes.

De nos jours, les trains fonctionnent généralement à l'électricité mais certains trains roulent encore au gazole. Les locomotives actuelles sont équipées de moteurs électriques alimentés grâce à au caténaire et au pantographe. Le ferroviaire est le secteur le plus adapté à la mobilité hydrogène. En effet les moteurs électriques déjà existants peuvent être alimentés par des PAC à hydrogène. L'hydrogène peut être facilement stocké sur le train. Par exemple, le train Coradia iLint de Alstom stocke l'hydrogène dans des réservoirs sur son toit. Premier modèle de train à hydrogène en circulation en Allemagne, il possède une autonomie de 1000 km et peut atteindre une vitesse de 140 km/h. L'énergie libérée lors du freinage est aussi récupérée et stockée.



*Illustration n°30 : schéma du Cordia iLint*

Les tramways à hydrogène fonctionnent de façon similaire. En 2011, en Espagne, l'entreprise ferroviaire espagnole FEVE dévoile le premier prototype européen de tramway hybride. Ce tramway est alimenté grâce à deux PAC à hydrogène et une batterie lithium-ion. Il devait être mis en service en 2017 sur les lignes de León, capitale de Castilla-y-León, mais la mise en circulation a été retardée par les autorités administratives de la province en raison d'un manque de normes et de lois concernant la sécurité. Parallèlement, la Tangshan Railway Vehicle Corporation, entreprise ferroviaire chinoise, a développé le premier tramway à hydrogène à usage commercial. Il a été mis en service en octobre 2017 dans la ville de Tangshan (Hebei). Pour la Chine, l'enjeu de la mobilité hydrogène est de réduire les émissions de CO<sub>2</sub> dans les villes déjà très polluées. Le ferroviaire à hydrogène offre un moyen de transport qui émet seulement de l'eau et a aussi l'avantage de ne plus avoir besoin de caténaires.



*Illustration n°31- Tramway à hydrogène espagnol*



*Illustration n°32- Tramway à hydrogène chinois*

### **III.2.3. Aéronautique**

Nous avons pu constater que la pollution était un enjeu majeur du secteur automobile ; c'est également le cas des secteurs aéronautiques et navals. En effet, les avions sont responsables de 13 % des émissions en gaz carbonique, toutes activités de transport confondues. En ce qui concerne le secteur naval, 60 000 morts prématurées en Europe sont dues aux émissions des navires, d'après le journal *Le Monde*.

Utiliser l'hydrogène dans le transport aéronautique n'est pas une idée nouvelle. En 1936, une entreprise allemande innove en proposant un immense dirigeable gonflé au dihydrogène (voir partie IV). La propulsion de ce dirigeable était assurée par quatre moteurs diesel.

Malgré la défiance de l'opinion publique envers l'hydrogène, les acteurs du secteur aéronautique n'abandonnent pas l'idée d'utiliser les technologies liées à l'hydrogène dans leurs futurs appareils. Ainsi, différents projets se développent. C'est le cas du projet HYCARUS. Ce projet européen est porté par différentes grandes entreprises : Zodiac Aerospace, Dassault Aviation ou encore Air Liquide Advanced Technologies. Ce projet a été lancé afin d'anticiper les futures réglementations qui seront, à n'en pas douter, plus contraignantes sur les émissions de gaz à effet de serre. Le projet a pour but d'aboutir à l'élaboration d'une nouvelle PAC à membrane échangeuse d'hydrogène (PEM), qui permettrait d'alimenter les systèmes indépendants de la propulsion comme par exemple les cuisines de l'avion. Équiper les appareils de nouveaux générateurs électriques est indispensable pour

plusieurs raisons. La première est due aux améliorations technologiques de ces derniers. En effet, le nombre toujours plus important de systèmes électriques (que ce soit pour remplacer d'anciens composants hydrauliques ou pour améliorer le confort et la sûreté dans les appareils), demande un plus grand apport en énergie. D'autre part, les moteurs d'avions fonctionnent au kérosène. L'utilisation de ce carburant fossile entraîne une forte pollution atmosphérique. De plus, il est voué à disparaître à plus ou moins long terme. En se regroupant dans le projet HYCARUS, les industriels du secteur prennent une avance technologique dans l'utilisation de l'hydrogène.

Les technologies de l'hydrogène produisant de l'électricité n'avaient jamais été utilisées dans l'aéronautique jusqu'à présent. Elle y est introduite pour la première fois grâce au projet HYCARUS. Le but de ce projet n'est pas seulement de faire fonctionner les appareils secondaires des avions à l'hydrogène. En effet, selon Aline Hoffmann, ingénieure chez Air Liquide, « Les résultats obtenus pourraient ensuite dériver vers d'autres fonctions. Par exemple, remplacer le RAT (Ram Air Turbine) » ou encore « alimenter l'APU (Auxiliary Power Unit), à savoir le groupe qui dessert les différents systèmes de bord quand l'avion est au sol, moteurs à l'arrêt. » Elle conclut en ajoutant « Après, rien ne nous empêche d'imaginer un futur où l'avion fonctionnerait intégralement avec de l'électricité produite par l'hydrogène ! ». On comprend, par le biais de cette ingénieure travaillant pour le projet HYCARUS, qu'introduire une PAC dans les avions pour alimenter les systèmes secondaires est la première étape nécessaire à la transition énergétique du secteur aéronautique.

L'hydrogène est un vecteur d'énergie puissant dont les avantages sont nombreux, cependant la volatilité et l'inflammabilité de ce gaz le rendent difficile à utiliser. Les acteurs d'HYCARUS doivent jongler avec les propriétés de l'hydrogène et les contraintes importantes imposées par le vol d'un avion. Le stockage et le ravitaillement sont, comme souvent avec l'hydrogène, la principale difficulté à son exploitation. Pour cela, Air Liquide développe des stockages haute pression d'hydrogène liquide et gazeux. Cette entreprise met également au point des systèmes de remplissages mobiles afin de faire directement le plein d'hydrogène de l'avion sans avoir besoin de le déplacer. Actuellement, le projet a dépassé le stade de développement sur la pile à combustion et a atteint celui de démonstration. En effet, sur l'échelle de préparation TRL, la pile à combustion est à 6. Dans le futur, le secteur aéronautique utilisera l'hydrogène. Ce projet ainsi que la renommée des entreprises qui y participent montrent le potentiel de l'hydrogène comme carburant pour l'aéronautique dans un futur assez proche.

Le transport aérien n'est pas le seul concerné par les nouvelles technologies de l'hydrogène. En effet, 90% des échanges commerciaux s'effectuent par voies maritimes. L'impact des navires n'est donc pas négligeable en ce qui concerne la santé, comme vu précédemment, et les rejets de gaz à effet de serre dans l'atmosphère. Pourtant, ce type de transport dispose de nombreux atouts en faveur de l'écologie. A partir de ce constat, Victorien Erussard, un navigateur renommé, a décidé de développer le projet Energy Observer. Ce projet avait pour but de créer un bateau capable de produire et utiliser son énergie lui-même.



*Illustration n°33- Bateau du projet  
Energy Observer*

Afin de réaliser leur objectif, les équipes du projet ont dû travailler sur l'optimisation maximum de leur embarcation. Pour ce faire, ils ont pris possession d'un ancien bateau de compétition. Les ingénieurs et techniciens ont ensuite étudié les différentes possibilités d'équiper le bateau afin qu'il soit indépendant en énergie. Finalement il embarque à son bord deux éoliennes, de

nombreux panneaux solaires et une pile à combustible. Ce bateau est donc propulsé, en partie, par une pile à hydrogène.

Le secteur maritime représente une part importante des transports et notamment dans le domaine commercial. Dans ce secteur, l'hydrogène et les énergies renouvelables pourraient être une excellente alternative aux énergies fossiles condamnées à disparaître. Le bateau Energy Observer est un exemple significatif de ce que pourrait devenir le transport maritime dans le futur. Les technologies de l'hydrogène sont à leur avantage lorsqu'il s'agit d'équiper un bateau. Comme nous l'avons vu précédemment, de nombreuses techniques existent pour produire de l'hydrogène, notamment celle de l'électrolyse qui permet de créer de l'hydrogène à partir de l'eau. Ainsi, Energy Observer utilise l'hydrogène directement présent dans l'eau de mer. Lorsque les panneaux solaires et les éoliennes du bateau fournissent un surplus d'énergie, l'électrolyseur permet de produire de l'hydrogène. Cet hydrogène est ensuite compressé et stocké à haute pression dans des réservoirs à 350 bars. Le navire est équipé de 8 bonbonnes pour une capacité totale de 62 kg.

Energy Observer a déjà fait le tour de la France et fiabilisé sa technologie. L'objectif de cette équipe est d'effectuer un tour du monde en réalisant plus d'une centaine d'étapes. Ce projet est intéressant car il démontre qu'un bateau peut fonctionner grâce à une pile à combustible de manière sûre et fiable. Même si cette technologie n'est pas encore prête à être adaptée sur un navire de très grande envergure, l'utilisation de la pile à combustible devrait se développer dans le secteur maritime. Les acteurs de ce projet espèrent inspirer les industriels et permettre le développement de petits bateaux de pêche ou de plaisance respectueux de l'environnement à l'image de l'Energy Observer.

Finalement, les secteurs aéronautiques et navals sont confrontés à des enjeux écologiques et économiques qui les obligent à se moderniser. Dans ces deux secteurs, la mise en place de nouvelles solutions est très différente en raison des contraintes liées à chacun des appareils. Néanmoins, dans les deux situations, l'hydrogène est une alternative sérieuse et écologique, notamment par l'intermédiaire des piles à combustible. Le principal frein au développement de cette technologie réside dans le manque de production d'hydrogène car ce carburant n'est pas encore économiquement intéressant.

#### **III.2.4. Aérospatiale**

Dans le domaine de l'aérospatiale, l'hydrogène est utilisé depuis de nombreuses années comme carburant de fusées. La quantité d'énergie d'une masse donnée d'hydrogène étant 3 fois supérieure à celle de la même masse d'essence, ceci constitue un avantage important pour le secteur spatial, permettant de doter les fusées de lanceurs les plus légers possible. L'hydrogène est utilisé comme combustible directement ou via des PAC.

Dans les années soixante, la NASA utilise des PAC pour les générateurs des missions habitées Gemini et Apollo. La réaction au sein de la PAC produit de l'eau, de l'électricité et dégage de l'énergie sous forme de chaleur. La production d'eau et d'électricité constitue un avantage pour les vols spatiaux habités, l'eau pouvant être utilisé pour l'usage des astronautes.

Une autre application aérospatiale de l'hydrogène est le moteur Vulcain de la fusée Ariane 5, développé dans les années 90. Le moteur Vulcain utilise de l'hydrogène  $H_2$ , sous forme liquide, comme combustible, qui va brûler au contact de l'oxygène  $O_2$ . Le fonctionnement du moteur Vulcain est détaillé dans l'annexe 11. Le moteur Vinci, élaboré pour la fusée Ariane 6 prévue à l'horizon de 2020, est aussi un moteur cryotechnique basé sur la combustion de l'hydrogène liquide et de l'oxygène liquide. Auparavant, dans les années soixante, la NASA avait développé le moteur F-2 au fonctionnement similaire.

Que ce soit dans le domaine de l'automobile, du ferroviaire ou de l'aéronautique, l'enjeu majeur de la mobilité hydrogène est la réduction des émissions de  $CO_2$ , dans l'optique du développement durable : les énergies fossiles se raréfient et sont très polluantes. Si l'hydrogène utilisé

pour faire fonctionner une PAC ou un moteur à combustion interne est produit à partir d'une source d'énergie renouvelable alors une transition énergétique peut se faire vers des moyens de transports vraiment propres.

Cependant, le coût élevé des véhicules et des bornes ou stations de recharge, sans oublier le système de distribution de l'hydrogène encore peu développé dans la plupart des pays, constituent les principaux freins au développement et à la démocratisation de la mobilité hydrogène.

### **III.3. L'hydrogène pour les besoins énergétiques des bâtiments**

De plus en plus, l'hydrogène est utilisé pour l'alimentation en énergie des bâtiments, aussi bien individuels que collectifs, privés ou publics. L'hydrogène est ainsi utilisé pour le chauffage des pièces et de l'eau, l'éclairage, le fonctionnement des appareils électroménagers.

L'intérêt d'utiliser l'hydrogène pour des applications domestiques est tout d'abord que, contrairement à l'électricité qui est le vecteur énergétique le plus commun aujourd'hui, l'hydrogène peut être stocké et utilisé en fonction de la demande et des besoins. L'enjeu est aussi de limiter les émissions de gaz à effet de serre en remplaçant les combustibles fossiles par de l'hydrogène. Les procédés utilisent tous une pile à combustible ou un moteur à combustion interne à hydrogène, soit directement soit dans des chaudières à hydrogène. L'hydrogène nécessaire au fonctionnement provient soit du gaz naturel, soit d'énergies renouvelables. Cette seconde possibilité est plus respectueuse de l'environnement. Nous allons présenter ci-dessous des applications de ces procédés.

#### **III.3.1. Chaudières à hydrogène provenant de gaz naturel**

En France, les premières chaudières à hydrogène sont testées depuis 2014 par GRDF (Gaz Réseau Distribution France) à Forbach (57) en Lorraine. Des chaudières à pile à combustible Viessmann permettent de fournir en électricité une crèche, deux logements collectifs dans un groupe scolaire, et la maison du gardien du gymnase et du Conservatoire. Ces sites sont des démonstrateurs.

Ces chaudières fournissent une puissance de 750 W électriques et 20 kW thermiques. Les résultats du projet, présentés en 2016, indiquent qu'au total, sur les trois emplacements, les chaudières à piles à combustible ont permis de diminuer la production d'émissions de CO<sub>2</sub> de 0,6 tonne par an par rapport à une chaudière à condensation, et de réaliser près de 40% d'économies d'énergie.

Les chaudières à hydrogène possèdent de nombreux avantages :

- comparée à la chaudière classique, celle à hydrogène permet un gain de place.
- la chaudière à hydrogène ne génère pas de bruits ou de vibrations.
- la durée de vie d'une chaudière à pile à combustible est de dix ans environ.
- cela permet de produire localement l'électricité qui est autoconsommée.
- une telle chaudière ne génère quasiment pas de polluants.

Un inconvénient des chaudières à pile à combustible est le prix qui s'élève à environ 20 000€, mais celui-ci serait amené à baisser dans le futur, si ce type de chaudière se démocratise.

La plupart des chaudières à hydrogène produisent de l'hydrogène à partir de gaz naturel. Elles se composent d'une pile à combustible qui peut être associée à une chaudière à condensation gaz, à un ballon d'eau chaude, et à un ballon de stockage d'énergie.

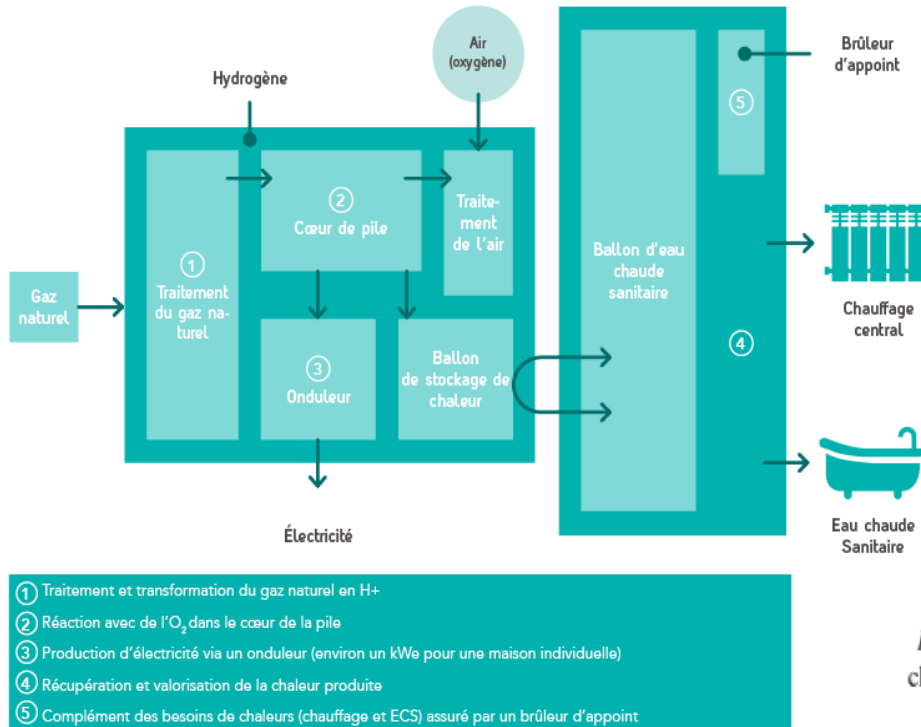


Illustration n°34- Fonctionnement d'une chaudière à pile à combustible Viessmann

Le gaz naturel est d'abord transformé en hydrogène. Ensuite, l'hydrogène H<sub>2</sub> réagit avec l'oxygène O<sub>2</sub> de l'air dans le cœur de la pile à combustible, ce qui génère de l'électricité, de l'eau et de la chaleur. La chaleur produite peut alors être récupérée par un échangeur et utilisée pour le chauffage. Selon les besoins de consommation, un brûleur peut servir à faire l'appoint du système de chauffage. L'électricité peut être utilisée directement dans le bâtiment, ou bien réinjectée dans le réseau électrique ou stockée sur place. La chaudière à hydrogène fonctionne sur le principe de la cogénération: de la chaleur et de l'électricité sont produites en même temps par la même installation, à partir du même combustible : l'hydrogène.

### III.3.2. Couplage hydrogène et énergies renouvelables

Il est possible d'utiliser de l'H<sub>2</sub> issu d'énergies renouvelables pour alimenter les infrastructures en électricité. On peut notamment citer l'exemple d'un projet pionnier alliant énergie éolienne et hydrogène. Ce projet a été lancé en été 2004 par Statoil, une compagnie pétrolière norvégienne, et Enercon, un fabricant allemand d'éoliennes. En Norvège, sur l'île d'Utsira, située à une vingtaine de kilomètres de la côte et comptant 240 habitants, une unité de génération électrique hydrogène, alimentée par deux éoliennes, a été mise en service en hiver 2005. Ce système autonome paraît plus bénéfique que le câble sous-marin relié au continent qui alimente l'île. De plus, cette méthode de production d'électricité combinant l'éolien et l'hydrogène ne génère pas d'émissions polluantes. L'installation, d'une autonomie de 2 à 3 jours sans vent, permet de couvrir la consommation en énergie de 10 ménages, qui représente environ 200 MWh pour une puissance maximale de 50 kW par an.

L'unité de production électrique d'Utsira se compose de différents éléments :

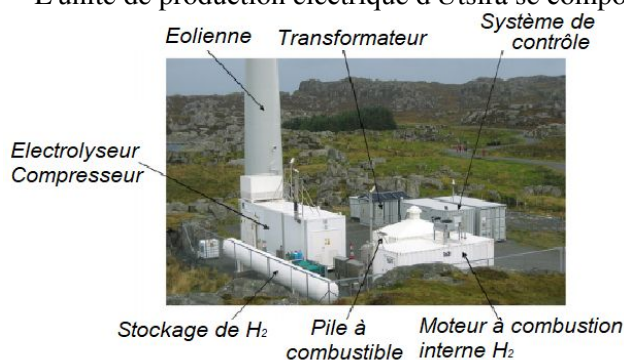
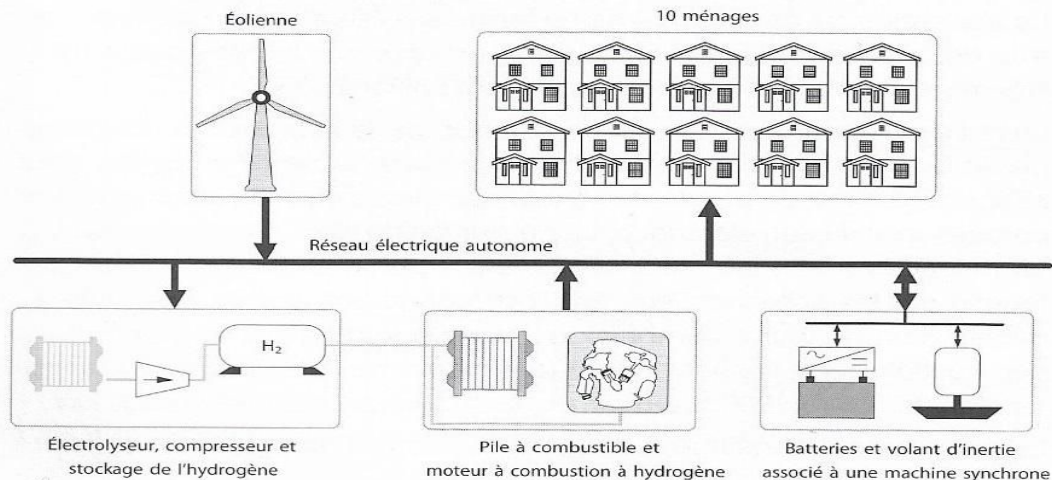


Illustration n°35- Les composantes de l'installation éolienne-hydrogène d'Utsira

Le principe de fonctionnement de l'installation est le suivant:



*Illustration n°36- Mode de fonctionnement de l'installation d'Utsira*

Les ménages sont alimentés directement par les éoliennes. Les surplus de puissance sont utilisés dans l'électrolyseur pour transformer des molécules d'eau en  $H_2$  et  $O_2$ . L'hydrogène est ensuite comprimé et stocké à 200 bars dans un réservoir de  $12\text{ m}^3$ . Ainsi, les jours où les éoliennes ne peuvent satisfaire la demande des habitations, l'hydrogène stocké sert à produire de l'électricité: soit grâce à une pile à combustible (d'une puissance de 10 kW), soit en le brûlant dans un moteur à combustion à hydrogène (d'une puissance de 55 kW). Dans les deux cas, le seul sous-produit est l'eau. L'unité de production électrique comprend aussi des batteries pour stocker l'électricité et servir de groupe de secours, ainsi qu'un volant d'inertie et une machine synchrone qui fournissent les pics de puissance quand la demande dépasse momentanément la puissance générée par les éoliennes.

L'objectif de cette expérience est de montrer que la combinaison de l'énergie éolienne et du stockage de l'énergie grâce à l'hydrogène offre une production fiable et une qualité du courant comparable à celle de l'électricité fournie par la connexion par câble au continent. Ce système possède tout de même des limites : l'hydrogène ne peut pas être stocké plus de trois jours, si le vent est trop faible pendant cette période, il faut à nouveau recourir au réseau électrique national.

Ce type d'installation est surtout intéressant pour les zones isolées, décentralisées, qui ne sont pas connectées à un réseau électrique. Pour les pays qui utilisent déjà l'énergie éolienne de façon conséquente, comme le Danemark, une telle installation permettrait, via le stockage d'hydrogène, de pouvoir mieux réguler la production d'électricité.

Des projets similaires sont menés partout dans le monde. Des énergies renouvelables autres que l'éolien sont utilisées, comme l'énergie solaire et l'énergie hydrolienne, c'est-à-dire l'énergie cinétique des courants fluviaux ou marins. En Ecosse, l'EMEC (European Marine Energy Centre), depuis 2017, a installé des hydroliennes dans l'archipel Orkney : ces turbines hydrauliques flottantes produisent de l'énergie grâce aux mouvements des vagues. Cette énergie est envoyée à un électrolyseur produisant 220 kg d' $H_2$  par jour. Le dispositif comprend aussi un conteneur pour stocker 500 kg d' $H_2$ . Ensuite, des PAC convertissent l' $H_2$  en électricité pour les besoins énergétiques de l'archipel. Ce système permet de pallier les raccordements limités des îles au réseau électrique écossais.

Enfin, l'hydrogène et les PAC peuvent être utilisés comme groupe électrogène pour une alimentation de secours en énergie en cas de coupure d'électricité dans les hôpitaux et autres sites sensibles...



### **III.4. L'Hydrogène dans l'industrie**

Aujourd'hui l'hydrogène est majoritairement utilisé dans l'industrie chimique où il sert à plus de 80 % pour la fabrication d'ammoniac. L'hydrogène est employé comme réactif dans les réactions industrielles comme la fabrication du nylon et de diverses matières plastiques. Il est également utilisé dans le processus de raffinage des produits pétroliers et la désulfuration des carburants. Dans l'industrie du verre, l'hydrogène est utilisé dans le processus de fabrication des verres plats, permettant de produire des écrans plats.

Depuis plusieurs années déjà, un gaz composé d'environ 60% d'hydrogène, le gaz de cokerie, est réutilisé dans l'industrie afin de faire des économies de combustible. Ce gaz est un sous-produit du processus de fabrication de la coke à partir du charbon. Il est réutilisé à 50% sur son site de production.

Aujourd'hui de plus en plus d'industries veulent utiliser l'hydrogène dans le but d'améliorer leur bilan carbone. Par exemple, l'entreprise Saint-Gobain spécialisée dans les matériaux (comme le verre) se projette vers une "économie décarbonée". La R&D vise une amélioration de l'empreinte CO<sub>2</sub> de l'entreprise, c'est à dire une réduction de la production de CO<sub>2</sub>. Saint-Gobain souhaite favoriser l'utilisation d'énergies renouvelables et de l'hydrogène. L'hydrogène pourrait être utilisé aussi bien dans les procédés de fabrication que pour l'alimentation énergétique et le chauffage des sites.

## **IV. Risques et acceptabilité de l'hydrogène**

### **IV.1. Les risques industriels**

En milieu industriel, l'hydrogène est produit en grande quantité. Mais l'hydrogène est un gaz qui présente de nombreux risques liés à sa manipulation et à son stockage. Plusieurs accidents graves impliquant de l'hydrogène ont eu lieu sur des sites industriels. De plus, les risques liés à l'hydrogène sont variés à cause de ses nombreuses propriétés. Les industriels doivent donc mettre en place des mesures de sécurité et de prévention afin d'éviter tout accident.

#### **IV.1.1. Les différents types de risques**

Les secteurs d'activités principalement touchés par des accidents liés à l'hydrogène sont la chimie et le raffinage du pétrole. D'après la synthèse rédigée par Aria, sur 215 accidents liés à l'hydrogène répertoriés avant 2007, 84 accidents ont eu lieu dans des sites industriels chimiques et 47 ont eu lieu dans des raffineries.

Les trois principaux facteurs de dangers sont les suivants :

##### *- Les risques de fuite :*

L'hydrogène est un atome de très petite taille (son rayon atomique est de 0,12 nm) et qui est perméable à de nombreux matériaux. Il présente donc une forte propension à fuir, bien plus importante que les autres combustibles. De plus, l'hydrogène étant très léger, il se diffuse très rapidement dans l'air à une vitesse de 0,61 cm<sup>2</sup>/s. Il s'accumule donc très vite dans une pièce.

##### *- Les risques d'incendie :*

L'hydrogène est un élément qui s'enflamme très facilement. En effet, il nécessite 10 fois moins d'énergie que les gaz naturels pour s'enflammer. Son énergie d'inflammation est faible : 20 mJ contre 250 mJ pour le propane et 290 mJ pour le méthane. De plus sa vitesse de combustion est élevée variant de 265 à 325 cm/s. Les incendies se propagent donc rapidement. Les incendies sont l'un des principaux risques liés à l'utilisation de l'hydrogène puisque 84% des accidents liés à l'hydrogène impliquent des incendies ou des explosions. Les incendies liés à ce gaz deviennent probables lorsque l'air ambiant contient entre 4 et 8% d'hydrogène. Celui-ci a alors de grandes chances de prendre feu

s'il est mis au contact d'une source d'inflammation. De plus, la flamme d'hydrogène est dangereuse car elle est peu visible.

*- Les risques d'explosion :*

La molécule de H<sub>2</sub> possède une faculté à détoner importante. L'hydrogène présente un très large domaine d'explosivité. Ce domaine est délimité par la limite inférieure d'explosivité (LIE) et par la limite supérieure d'explosivité (LSE). Ce domaine contient l'ensemble des concentrations d'hydrogène dans l'air pour lesquelles ce gaz est susceptible de s'enflammer ou d'exploser. Pour l'hydrogène, la LIE est de 4% et sa LSE est de 75%. Ainsi, l'hydrogène est susceptible d'exploser si son pourcentage volumique dans l'air est compris entre 4% et 75%.

La particularité des accidents impliquant l'hydrogène est qu'ils ont souvent des conséquences graves. Les dégâts peuvent être matériels mais parfois ils sont également humains avec de nombreux blessés et même des morts. Dans le rapport d'Aria, sur 213 accidents aux causes connues, il y a eu 25 décès et 70 blessés. Les victimes sont quasiment tout le temps des employés du site touché.

Tous les risques énoncés ci-dessus sont aussi à prendre en compte lors de la manipulation et du stockage de l'hydrogène dans les nouveaux domaines qui l'utilisent. Par exemple, pour les voitures à hydrogène l'enjeu est que les bonbonnes d'hydrogène soient suffisamment étanches pour éviter les fuites mais qu'en cas de choc violent, elles libèrent rapidement l'hydrogène pour éviter un incendie ou une explosion.

#### **IV.1.2. Les causes des risques**

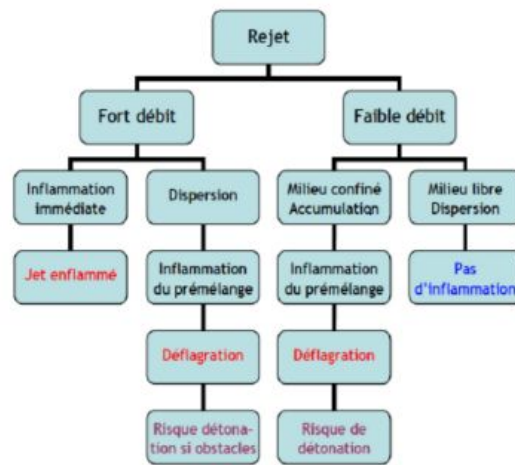
Selon le rapport d'Aria, 70% des accidents sont liés à un problème organisationnel ou humain éventuellement couplé à un problème matériel. Cela est souvent dû au fait que le personnel n'est pas toujours suffisamment formé et que lorsqu'il y a un accident les employés ne savent pas toujours bien réagir.

Pour ce qui concerne les fuites, celles-ci peuvent avoir des causes diverses. Le principal problème de ces incidents est qu'ils sont très durs à identifier car l'hydrogène est un gaz incolore et inodore.

Comme nous l'avons dit précédemment, l'hydrogène étant un petit atome, il a tendance à être perméable aux matériaux. Cela engendre des fuites de faible débit. Mais les fuites d'hydrogène peuvent également être dues à un dysfonctionnement des équipements, à l'usure des tuyaux ou à la manipulation du gaz.

De plus, les incidents liés à des fuites d'hydrogène n'ont pas uniquement lieu lors de sa production ou de son utilisation. Ils peuvent également avoir lieu lors de son stockage. Le mode de stockage le plus répandu dans l'industrie, notamment dans le secteur de l'automobile consiste à entreposer l'hydrogène sous forme gazeuse à pression élevée dans des réservoirs. Au risque de fuite due à l'étanchéité du récipient, s'ajoute alors le risque que le réservoir contenant le gaz subisse un choc et répande ainsi l'hydrogène qu'il contient.

Les risques d'explosions et d'incendies dans le domaine industriel sont tous deux liés à un taux trop important d'hydrogène dans l'air. Ce sont donc les fuites qui sont en général à l'origine de ces incidents. Le schéma ci-dessous nous montre le lien entre les fuites d'hydrogène et les risques d'incendies et d'explosions.



*Illustration n°37- Risques que peut entraîner un rejet d'hydrogène*

Ces risques peuvent également être liés à un choc sur une bonbonne contenant de l'hydrogène sous pression par exemple. Dans ce cas le choc pourrait engendrer une explosion.

Il est à noter que tous ces risques dépendent de la façon dont est utilisé l'hydrogène. En effet, ces risques sont beaucoup plus importants lorsque les espaces sont confinés car l'hydrogène s'accumule et c'est ainsi qu'il peut s'enflammer ou exploser. Lorsque les espaces sont ouverts ou bien aérés, ces risques deviennent faibles car l'hydrogène se diffuse dans l'air et son taux dans l'air est alors faible.

#### **IV.1.3. Mesures de sécurité pour minimiser les risques**

Pour éviter tout incident, il est nécessaire de prendre des mesures de sécurité. Ces mesures passent à la fois par la mise en place d'un système de surveillance du taux d'hydrogène dans l'air et par la formation du personnel et des secours.

Tout d'abord il est à noter que les risques liés à la fuite d'hydrogène lorsque celui-ci traverse un matériau sont relativement faibles car le débit n'est pas très élevé, et qu'en général les récipients sont faits de sorte à être étanches. Il faut donc juste que l'hydrogène soit stocké dans des réservoirs très étanches.

C'est pour les autres types de fuites, qui présentent un débit plus important et donc des risques plus élevés, que des mesures de sécurité importantes doivent être prises.

La première chose à faire pour éviter tout accident dû à l'hydrogène est d'avoir un matériel approprié et de vérifier régulièrement son état voire même d'effectuer des maintenances préventives. Il est par exemple recommandé d'éviter d'utiliser des matériaux polymères, peu résistants, pour les canalisations contenant de l'hydrogène. Les tuyaux avec des vis ne sont pas non plus recommandés lors de l'utilisation d'hydrogène car il y a plus de chances de fuites. Enfin, il n'est pas non plus recommandé d'avoir des tuyauteries qui présentent des coudes à 90° car l'hydrogène qui passe à cet endroit a tendance à éroder le matériau et donc à augmenter les risques de fuites.

Ensuite, il faut mettre en place un système de détection d'hydrogène. Les fuites de faible débit peuvent être repérées grâce à un réseau de capteurs installés à plusieurs endroits stratégiques. Ils sont souvent placés vers le haut des salles car l'hydrogène, étant très léger, a tendance à monter.

Ces détecteurs sont en général reliés à un système de ventilation forcé qui enclenche une ventilation supérieure à la normale si un taux d'hydrogène important est détecté dans l'air. Parfois il y a également des fenêtres en haut de la pièce qui peuvent être ouvertes s'il y a trop d'hydrogène.

Pour les fuites à hauts débits, celles-ci doivent être détectées très rapidement afin d'éviter qu'une quantité d'hydrogène trop importante ne se répande dans l'air. Pour cela, des détecteurs de pression peuvent être installés à l'intérieur des appareils utilisant de l'hydrogène. Si une fuite à haut débit se produit, la pression chute à l'intérieur de l'appareil et ce changement de pression est détecté par le capteur. Une fois la fuite détectée, le système de ventilation forcée est déclenché. D'autre part, le système d'où provient la fuite doit subir une dépressurisation afin que celle-ci s'arrête.

Pour empêcher la fuite de continuer, des systèmes liés aux capteurs permettent de bloquer l'alimentation en hydrogène dans les réseaux.



*Illustration n° 38- Logo ATEX*



*Illustration n° 39- Exemple de détecteur d'hydrogène*

De plus, les fabricants et utilisateurs d'hydrogène doivent respecter les réglementations et normes ATEX (ATmosphères EXplosives). Ils doivent définir les zones ATEX sur le site où est utilisé de l'hydrogène. Ces zones sont des zones où des atmosphères explosives sont susceptibles de se former à cause de la présence d'un combustible. Ces zones sont repérées par un triangle EX, comme illustré ci-dessus. Les zones ATEX sont classifiées en fonction de la fréquence d'apparition d'atmosphères explosives.

Dans les lieux concernés par les normes ATEX, le matériel est adapté et le personnel est formé de tel sorte à empêcher une éventuelle explosion.

Pour ce qui concerne le stockage, les réservoirs utilisés sont testés spécialement afin de vérifier qu'ils présentent une résistance aux chocs, à la pression et aux incendies suffisamment importante pour pouvoir contenir de l'hydrogène. De plus, ils sont généralement stockés à l'extérieur des bâtiments afin d'éviter des dégâts matériels et humains trop importants en cas d'explosion. Cela permet également, en cas de fuite ou de choc, à l'hydrogène de se répandre dans l'air et éviter de créer une zone contenant trop d'hydrogène. Il est donc bien stocké à l'extérieur et est séparé des autres composants pour éviter qu'il réagisse avec en cas de fuite.

Toutes les précautions citées ci-dessus sont prises par les industriels. La réglementation est assez complète. Le problème principal qui ne permet pas toujours de bien prévoir une fuite d'hydrogène est que certaines entreprises qui en produisent ne le font pas de manière volontaire ! En effet dans certains cas, l'hydrogène peut se former accidentellement par exemple lors de la corrosion de l'acier ou lorsque l'eau réagit avec un métal ou un acide. Si ces réactions pouvaient mieux être repérées, on pourrait limiter les risques dans les secteurs concernés.

La réglementation pour les nouvelles applications de l'hydrogène, quant à elle, n'est pas encore très bien définie et il faudra qu'elle le soit rapidement si son utilisation se répand.

Enfin, il est important de former les employés qui travaillent sur les sites industriels pour leur expliquer les risques liés à l'utilisation d'hydrogène et les précautions à prendre lors de sa manipulation. Il faut notamment former les personnes qui effectuent les maintenances car c'est souvent lors de ces événements que les accidents se produisent. Il faut également former les secours pour qu'ils puissent intervenir efficacement en cas d'accidents mais aussi afin qu'ils ne se mettent pas en danger.

Enfin, lorsque l'utilisation d'hydrogène se sera répandue dans les villes notamment pour les voitures à hydrogène, il faudra sensibiliser le public toujours dans le but de limiter les accidents.

## **IV.2. Les risques sur la santé**

Les risques liés à l'hydrogène sur la santé sont relativement faibles tant qu'on ne rentre pas en contact avec une trop grande quantité d'H<sub>2</sub>.

De plus, on ne rencontre que rarement de l'hydrogène pur, on rencontre plutôt certains de ces dérivés tels que le peroxyde d'hydrogène (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) et le sulfure d'hydrogène (H<sub>2</sub>S).

Nous avons listé ci-dessous les différents risques sur la santé liés à l'hydrogène en fonction du type de contact :

- **L'inhalation**

L'hydrogène peut être dangereux pour l'Homme en cas d'inhalation. En effet, en présence d'hydrogène, l'environnement devient déficient en oxygène (utile à notre survie) ce qui peut causer plusieurs symptômes en fonction de la quantité inhalée. Lorsque la quantité inhalée est faible (environ 100 ppm), l'hydrogène provoque des maux de têtes, des sifflements d'oreilles, des vertiges ou des somnolences. Lorsque la quantité inhalée devient plus importante (au delà de 500 ppm), les risques sont plus graves : la personne peut perdre connaissance et, dans des cas extrêmes, mourir. Les personnes principalement touchées par les accidents liés à l'inhalation sont celles travaillant dans les usines manipulant de l'hydrogène car elles travaillent dans un environnement où les fuites d'hydrogène sont fréquentes et ce gaz étant incolore, le temps que la fuite soit identifiée l'air est déjà riche en hydrogène. De plus, l'hydrogène a un taux de diffusion de 0,61 cm<sup>2</sup>/s ce qui est 3,8 fois plus élevé que celui de l'air.

Pour ce qui concerne les dérivés de l'hydrogène comme le sulfure d'hydrogène, les symptômes en cas d'inhalation sont semblables mais les risques sont plus importants. Si une personne en inhale trop (plus de 900 ppm), elle peut mourir d'asphyxie en seulement 30 minutes. C'est le cas par exemple d'un joggeur décédé sur les plages bretonnes en 2016 à cause des algues vertes. En effet, lorsque ces algues meurent, elles se décomposent et dégagent de grandes quantités de sulfure d'hydrogène. La personne a été victime d'un épanchement de liquide dans ses poumons engendrant un oedème pulmonaire. Heureusement, ces accidents restent rares.

- **Contact cutané**

L'hydrogène seul n'est pas nocif en cas de contact. Cependant certains de ses composés tels que le sulfure d'hydrogène et le peroxyde d'hydrogène peuvent provoquer des irritations cutanées. Plus spécifiquement, le sulfure d'hydrogène sous forme de gaz liquéfié entraîne des brûlures ou des gelures s'il est très concentré, voire des infections dans les cas graves. Le peroxyde d'hydrogène quant à lui cause un blanchiment de la peau.

Pour ces deux dérivés le contact avec les yeux est dangereux et provoque des irritations et des brûlures.

- **Ingestion**

L'ingestion n'est pas considérée comme un mode d'exposition possible à l'hydrogène bien qu'il puisse exister sous forme solide. Il ne présente donc pas de risque de ce point de vue là.

Le sulfure d'hydrogène étant présent uniquement sous forme de gaz, il ne présente pas non plus de risques liés à l'ingestion.

En revanche, le peroxyde d'hydrogène, utilisé dans le domaine pharmaceutique pour le blanchiment des dents, peut être à l'origine d'irritations des muqueuses et d'altération de l'émail.

### **IV.3. L'acceptabilité sociale**

L'hydrogène est utilisé depuis très longtemps dans l'industrie et comme énoncé précédemment, les autres secteurs qui l'utilisent sont nombreux.

Nous avons également vu que dans le but de limiter leurs émissions de gaz à effets de serre, beaucoup de villes ou régions veulent l'utiliser pour ses propriétés non polluantes. Ainsi, beaucoup d'entre elles lancent différents projets tels que la mise en place de transports fonctionnant à l'hydrogène (bus ou bateaux) pour réduire leur consommation.

Mais devant cette utilisation croissante de l'hydrogène dans la vie quotidienne, beaucoup de personnes expriment leur réticence. En effet, lorsqu'il était utilisé uniquement dans l'industrie, les citoyens ne s'en méfiaient pas mais maintenant qu'il est utilisé dans les villes, la population commence à s'inquiéter.

Pourquoi l'hydrogène inspire-t-il une telle méfiance ?

Si aujourd'hui l'hydrogène a une mauvaise image au sein de l'opinion publique, cela n'a pas toujours été le cas.

En effet, si l'on remonte dans les années 1800, l'hydrogène était utilisé en grande quantité dans le gaz manufacturé, produit à partir du charbon grâce à la méthode de la gazéification (voir partie I.2). Ce gaz contenait également du méthane, de l'oxyde de carbone et du sulfure d'hydrogène. Appelé plus souvent "gaz de ville", il servait principalement à éclairer les rues et à chauffer les habitations. À cette époque, la population et les autorités avaient des doutes sur le fait que l'utilisation de ce gaz ne présentait pas de risques car un grand nombre de personnes avaient été asphyxiées à cause du sulfure d'hydrogène présent dans les gaz de ville. Cependant, certains scientifiques ont réussi à le faire accepter, ce qui a permis un essor industriel du gaz. Les citoyens ont ainsi arrêté de se méfier de ce gaz qui contenait beaucoup d'hydrogène. En fait, la population ne savait pas vraiment ce que contenait le gaz de ville, les gens utilisaient donc de l'hydrogène sans le savoir et sans s'en méfier. Il ne sera remplacé dans les habitations qu'à partir des années 1960 avec l'apparition du gaz naturel moins toxique et ayant un pouvoir calorifique plus élevé.

La peur de l'hydrogène est donc plus récente. Cela est sans doute dû au fait que les gens sont mieux informés qu'à l'époque. Ils savent notamment que l'hydrogène a une grande capacité à s'enflammer et qu'il présente des risques d'explosion. Toutefois, ces informations ne sont pas assez

précises, la population a donc une connaissance approximative de l'hydrogène, ce qui contribue à augmenter la méfiance vis à vis de ce gaz, puisque l'on a généralement tendance à se méfier de ce qu'on ne connaît pas bien.

Il est à noter également qu'on entend régulièrement souvent parler de l'hydrogène dans l'actualité dans des circonstances négatives. Cela n'aide pas les gens à avoir une meilleure image de l'hydrogène. Par exemple en 1937, un dirigeable allemand, le LZ 129 Hindenburg rempli d'hydrogène s'est embrasé en atterrissant, tuant 35 personnes. Cette incident créa une peur importante vis à vis de l'hydrogène et le "syndrome du Hindenburg" apparut alors. L'impact de cet incident a été très important, à tel point que le gaz de ville de l'époque, qui en contenait de l'hydrogène, a dû être renommé "gaz à l'eau" pour ne pas gêner son utilisation.

D'autres événements encore plus récents ont aussi contribué à dégrader l'image de l'hydrogène. L'accident nucléaire de Fukushima au Japon en 2011 est un exemple. En effet, en mars un séisme et un tsunami ont endommagé de manière importante la centrale nucléaire de Fukushima ce qui a provoqué un défaut de refroidissement des réacteurs.

Des fusions de coeur dans plusieurs réacteurs et des ruptures de confinement ont entraîné d'importants rejets radioactifs. Une fusion du coeur correspond à la surchauffe des crayons de combustibles qui fondent à partir d'une certaine température. Cela a entraîné un important dégagement d'hydrogène. Malgré les mesures prises par l'exploitant pour diminuer la pression dans le réacteur, l'hydrogène a continué de s'accumuler. Plusieurs explosions ont alors eu lieu dans les réacteurs à cause de la présence en trop grande quantité de ce gaz.

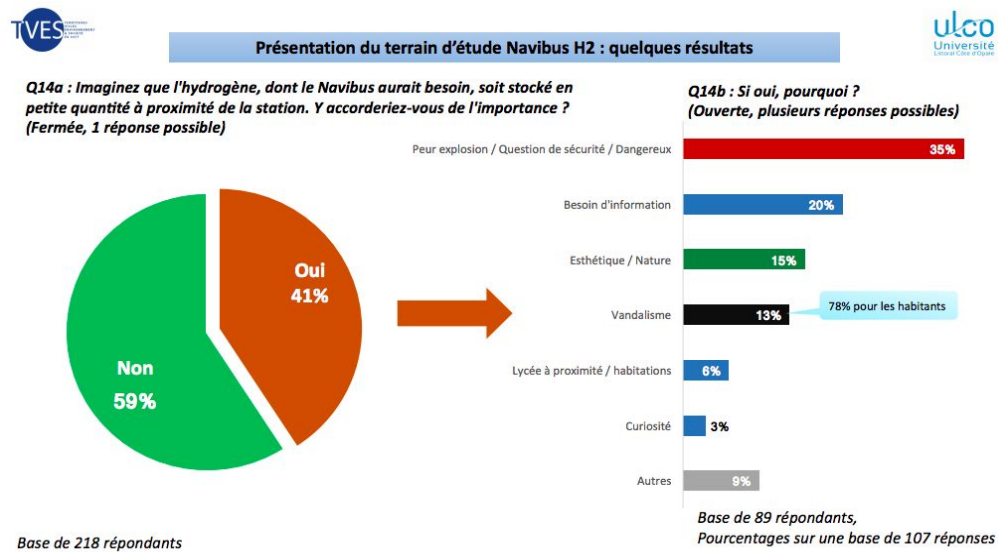
Étant relativement récent, l'accident de Fukushima est encore très présent dans les esprits et les gens ont du mal à croire que l'utilisation d'hydrogène dans les villes, pour les voitures par exemple, ne présente pas de risques.

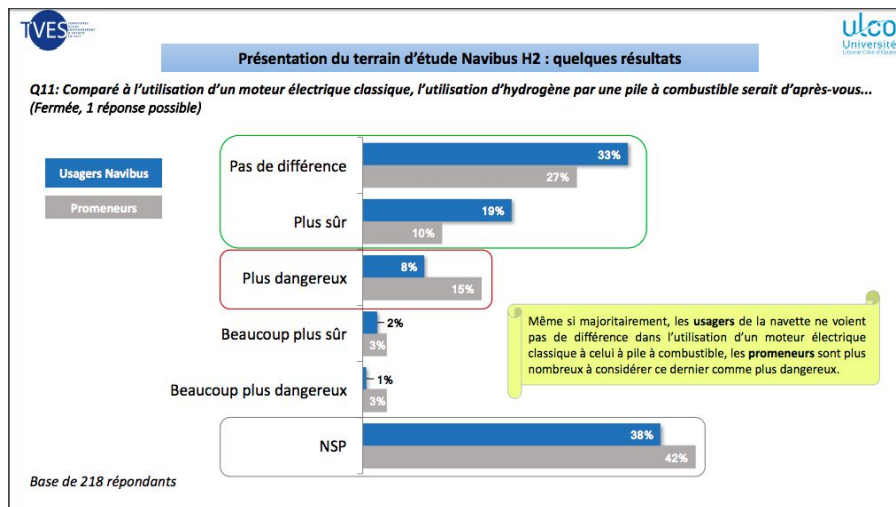
De plus, on entend actuellement beaucoup parler des essais nucléaires effectués par la Corée du Nord qui essaye de développer une bombe à hydrogène, aussi appelée bombe H. Cette arme est très puissante, en effet l'énergie dégagée par une telle bombe équivaut à celle fournie par 14 kilotonnes de TNT (trinitrotoluène), et pourrait donc causer des dommages matériels et humains considérables.

La liste des incidents impliquant l'hydrogène est donc longue ce qui se traduit par une peur de l'utilisation de l'hydrogène auprès des populations. Cette crainte freine de manière importante le développement de son utilisation.

Les industriels et les villes doivent donc oeuvrer pour redonner une bonne image de l'hydrogène qui a quand même de nombreuses qualités puisqu'il est utilisé dans de nombreux domaines.

Pour mieux se rendre compte de l'opinion de la population concernant l'utilisation d'hydrogène dans les villes, des enquêtes ont été réalisées. Par exemple, une enquête par questionnaire a été menée entre octobre 2016 et février 2017 auprès de passagers du Navibus (navette fluviale) et de promeneurs aux alentours de Nantes. Parmi les réponses, certaines illustrent ce que nous avons dit précédemment concernant la crainte de l'hydrogène de la part des populations et leur manque d'information. Voici ci-dessous deux exemples issus du rapport :





La première image nous montre que les citoyens ont peur d'un stockage d'hydrogène se trouvant près de chez eux. Ce stockage dans des stations serait nécessaire si des voitures à hydrogène circulent dans la ville ou bien si des navettes fluviales comme le Navibus doivent être rechargées. Il faudra donc rassurer les populations en leur expliquant que ces stations ne présentent pas de risque. Les industriels pourront s'appuyer sur le fait qu'à l'époque lorsque le gaz manufacturé était encore utilisé, il était stocké dans de grands gazomètres au milieu des villes et cela n'a pas posé de problème. De plus, les risques étant mieux maîtrisés aujourd'hui, ces réservoirs à hydrogène sont fiables.

Des associations régionales comme Mission Hydrogène dans les pays de la Loire ou nationales comme l'Association Française pour l'Hydrogène et les Piles à Combustible (AFHYPAC) soutiennent et participent à des projets impliquant l'utilisation d'hydrogène.

C'est le cas de l'université de Caen qui a récemment débuté un projet visant à développer l'utilisation de l'hydrogène à Caen, en cherchant le meilleur moyen de connecter les citoyens et les entreprises locales avec l'hydrogène. Ces associations informent également les populations sur l'hydrogène et ses avantages mais également sur le fait que si les risques liés à l'utilisation d'hydrogène sont évalués et maîtrisés alors son utilisation est fiable et sûre. Leur objectif est de convaincre que l'hydrogène est la future source d'énergie qui répondra à tous nos besoins.

Les opérations de communication se multiplient notamment au Japon par exemple où il a fallu rassurer la population après l'incident de Fukushima. L'argument principal étant que depuis que les premières stations à hydrogène ont été installées là-bas en 2002, il n'y a pas eu d'accident.

En France, des Journées Hydrogène dans les Territoires sont organisées par l'AFHYPAC depuis plusieurs années. Ces journées réunissent des entreprises, des représentants des collectivités locales et des membres de l'association AFHYPAC. Ces journées permettent à ces acteurs de se rencontrer mais également de tester les démonstrateurs en conditions réelles. Des conférences et des tables rondes sont organisées pour répondre aux questionnements des participants.

Parallèlement, les industriels et les collectivités lancent des campagnes pour mieux former le personnel, les pompistes et les agents de sécurité aux précautions à prendre lors de l'utilisation d'hydrogène et les mesures de sécurité à mettre en place en cas de fuite. Comme l'hydrogène est utilisé depuis longtemps dans les industries, la réglementation est bien adaptée et si elle est correctement appliquée, les risques sont faibles. En revanche, l'utilisation de l'hydrogène dans les



pires à combustible par exemple est moins réglementée il faudra donc que les États normalisent et réglementent son utilisation.

Enfin, les industriels font également face au problème du prix car les véhicules à hydrogène par exemple coûtent beaucoup plus cher que les véhicules à essence. Il faudrait que la production soit beaucoup plus importante pour que les coûts diminuent mais cela ne suffit pas il faudrait également essayer de remplacer certains matériaux trop coûteux tel que le platine contenu dans les piles à combustible.

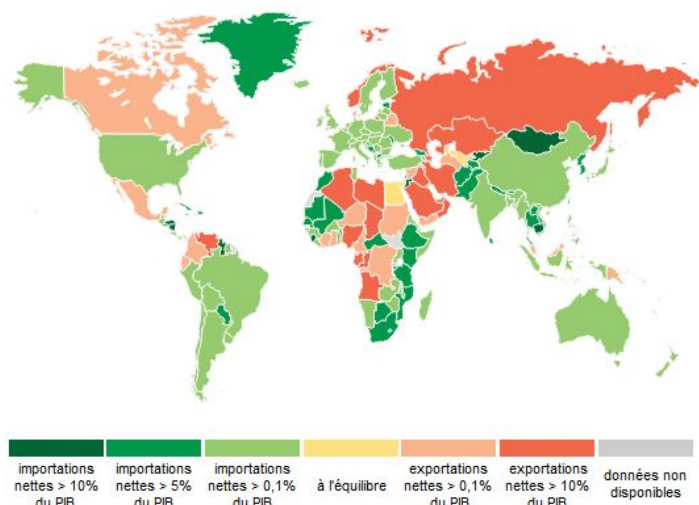
En conclusion, on peut voir que l'acceptabilité sociale de l'hydrogène a évolué au cours du temps. Dans les années 1800 il était utilisé dans le gaz de ville sans que les gens ne s'en soucient car ils n'avaient pas forcément les connaissances concernant la composition du gaz et les risques associés. Aujourd'hui, la population étant mieux informée sur l'hydrogène craint qu'il soit utilisé dans les villes. L'engagement des entreprises, des collectivités et des associations joue donc un rôle crucial dans l'acceptation de l'hydrogène. Grâce à des campagnes de communication les populations comprennent mieux les risques et la façon dont ils sont pris en compte par les différents projets.

#### **IV.4. L'acceptabilité politique**

De nos jours, l'utilisation d'hydrogène tend à se généraliser à de plus en plus de domaines. Les recherches sur le sujet se multiplient, en effet l'hydrogène est présenté comme pouvant être le combustible du futur. Il présente de nombreux avantages dont le fait d'être un gaz non polluant et pourrait ainsi participer à la transition énergétique de nombreux pays qui voudraient émettre moins de CO<sub>2</sub>. C'est pour ces raisons que ce gaz est aujourd'hui pressenti pour prendre la place des énergies fossiles, dont le pétrole.

Si la généralisation de son utilisation permettrait d'avancer vers une transition énergétique pour les années à venir, celle-ci est susceptible de soulever des enjeux économiques et politiques importants.

En effet, de nombreux pays, d'Afrique ou d'Asie notamment, ont une part importante de leur économie qui repose sur l'exploitation du pétrole et son exportation l'étranger. Sur la carte ci-dessous on peut voir en rouge les pays dont le pétrole représente plus de 10% du PIB (Produit Intérieur Brut), comme la Russie ou l'Iran par exemple. Ces pays sont très dépendants du pétrole et si une autre énergie venait à être utilisée, ils connaîtraient de graves problèmes économiques. Effectivement, à l'inverse de l'hydrogène, le pétrole ne peut être produit que dans certaines régions du monde, ce qui donne aux pays précédemment évoqué le monopole de son exploitation. La situation sera différente pour l'hydrogène puisque n'importe quel pays suffisamment développé peut en produire.



*Illustration n°41 - Carte du monde représentant les pays importateurs et exportateurs de pétrole*

Pour l'instant, le pétrole reste la principale source d'énergie dans le monde. En Europe en 2008 par exemple, le pétrole représentait 40,6% de l'énergie consommée.

Cette part étant très importante, si l'utilisation de l'hydrogène à la place du pétrole, notamment comme carburant, se généralisait dans les pays occidentaux, ceux-ci importeraient nettement moins de pétrole, ce qui risquerait de nuire à l'économie des principaux pays exportateurs.

Cependant, si le développement de l'hydrogène peut nuire aux pays dont l'économie est basée sur l'exportation de pétrole, il est à noter que leur situation est déjà menacée par l'épuisement prochain des ressources de pétrole. En effet, avec l'augmentation de la consommation, les puits de pétrole se vident très rapidement. Ainsi, d'après une étude de 2010 réalisée par les chercheurs de l'université de Californie à Davis, les ressources de la planète en pétrole devraient être épuisées d'ici 2040 à 2050.

Ainsi, le développement de l'hydrogène comme carburant dans les années à venir ne ferait qu'avancer dans le temps un problème économique qui est de toute manière certain d'arriver prochainement étant donné que le pétrole n'est pas une ressource inépuisable.

De plus, pour que les énergies renouvelables (ainsi que l'hydrogène) puissent remplacer le pétrole, il faudrait que celles-ci soient suffisamment développées. Or, aujourd'hui, ces énergies le sont encore très peu et sont loin de pouvoir remplacer totalement l'utilisation des hydrocarbures. D'après les chercheurs de l'université de Californie, ce développement ne sera suffisant qu'aux alentours de l'année 2140. Les puits de pétrole seront donc sans doute vides bien avant que l'hydrogène ne devienne la principale source d'énergie dans le monde !

Il est donc finalement raisonnable de penser que l'utilisation d'hydrogène n'aura pas d'impact politique et économique considérable pour les pays exportateurs de pétrole. Ces pays n'ont donc pas de raison de craindre l'utilisation de gaz par les autres pays. Ils ne se sentent donc pas forcément concernés par l'hydrogène pour l'instant.

C'est plutôt du côté des pays importateurs de pétrole qu'on entend parler de l'hydrogène comme une alternative au pétrole. En effet, en utilisant de l'hydrogène ces pays pourraient diminuer leur dépendance énergétique aux pays exportateurs de pétrole car l'hydrogène peut être produit dans des usines. Cela répondrait également aux enjeux environnementaux auxquels nous faisons face actuellement avec notamment l'objectif de réduire de manière considérable nos émissions de gaz à effet de serre responsables du réchauffement climatique. Les grandes puissances se posent donc la question de l'utilisation de l'hydrogène, qui est non-polluant, notamment dans les transports en commun dans un premier temps. Comme il a été vu dans la partie III, les utilisations de l'hydrogène sont nombreuses et des recherches sont en cours pour rendre sa production la moins polluante possible. Les pays semblent donc comprendre que l'hydrogène est peut être une bonne alternative au pétrole. Le seul problème sera peut être la question du financement car pour l'instant les technologies en lien avec l'hydrogène sont coûteuses et il faudra également du temps tout d'abord pour que les technologies se perfectionnent mais aussi pour que les pays se lancent réellement dans une transition énergétique.

## 4. Conclusions et perspectives

Pendant ce projet, nous avons pu acquérir des connaissances sur l'Hydrogène en tant que vecteur énergétique du futur. En raison du changement climatique et de la pollution générée par la production et l'utilisation d'énergies fossiles, il est nécessaire de chercher des moyens efficaces et plus propres de produire de l'énergie.

Le principal avantage de l'hydrogène est qu'il permet de stocker l'énergie produite, ce qui n'est pas le cas de l'électricité (vecteur énergétique le plus répandu actuellement). Ainsi, s'il est couplé avec un mode de production d'énergie renouvelable, un électrolyseur, un réservoir de stockage et une pile à combustible, l'hydrogène compense les fluctuations de production d'énergies. Un inconvénient est son stockage difficile. Cependant, des recherches sont effectuées pour trouver des modes de stockage sûrs et efficaces.

L'hydrogène trouve des applications dans de nombreux domaines qui, pour l'instant, utilisent en majorité des hydrocarbures. L'hydrogène se développe de plus en plus dans le domaine du transport, en particulier dans le secteur automobile. Il est aussi une alternative possible en ce qui concerne les besoins en énergie (chauffage et électricité) des bâtiments publics ou privés, collectifs ou individuels.

Aujourd'hui, l'hydrogène est principalement produit à partir de sources d'énergie carbonées. Cependant, s'il est produit grâce à des énergies renouvelables fournissant l'électricité à une réaction d'électrolyse, ou grâce à d'autres techniques encore au stade de recherche, on obtient alors un hydrogène "vert". Celui-ci est reconverti en électricité par des procédés qui ne génèrent que de l'eau comme sous-produit. Ainsi, il est possible d'utiliser, pour nos différents besoins, de l'énergie complètement non-polluante, ce qui aiderait à résoudre les problématiques environnementales liées à l'énergie...

L'utilisation d'énergies fossiles reste largement répandue car elle demeure actuellement moins chère et plus rentable que les énergies renouvelables, ou que l'hydrogène. Néanmoins, des changements politiques, économiques et sociaux pourraient changer cette situation. De nos jours, de plus en plus de projets et de recherches sur l'hydrogène, sur sa production, son stockage, ou encore ses applications, sont menés par de nombreux acteurs: laboratoires de recherches, entreprises et industries, collectivités,... L'hydrogène est donc un vecteur énergétique prometteur en plein essor qui est amené à prendre une place de plus en plus importante dans nos sociétés. A suivre !

D'un point de vue personnel, ce projet nous a aidé à nous familiariser avec le travail de groupe. En effet, nous avons dû faire preuve de rigueur et nous montrer à l'écoute des autres, étant donné que la répartition et la coordination du travail au sein d'une équipe de douze personnes sont essentielles à l'accomplissement et au bon déroulement d'un projet. De même, la planification et l'adaptation au rythme de travail des autres nous ont également permis de réaliser de façon concrète comment, en tant que futurs ingénieurs, nous devons nous organiser et nous comporter au sein d'une équipe afin de parvenir à un objectif commun.

## 5. Annexes

### Annexe 1: Les techniques de purification de l'H<sub>2</sub> après reformage ou gazéification

- Le **PSA** (*Pressure Swing Adsorption*) ou **adsorption modulée en pression**

Le procédé de PSA est utilisé pour purifier l'hydrogène produit par reformage et gazéification. Ce procédé est cyclique. Ce cycle diffère légèrement selon les fournisseurs et selon la pureté recherchée, et le nombre d'adsorbeur peut varier. Mais on retrouve dans un PSA cinq étapes de bases qui sont:

1. **adsorption** : le gaz à purifier entre sous pression dans un adsorbeur par un écoulement montant. Les impureté sont adsorbées, et l'hydrogène pur est produit. Si l'adsorbeur a atteint sa limite d'adsorption (on dit qu'il est saturé d'impuretés), le gaz en entrée est basculé vers second adsorbeur, et le premier doit être régénéré.

2. **dépressurisation à cocourant** de l'adsorbeur (dans le même sens d'écoulement que l'étape 1) afin de récupérer l'H<sub>2</sub> restant dans l'adsorbeur. De l'H<sub>2</sub> pur est récupéré et sert à purger et à recomprimer d'autres adsorbeurs.

3. **dépressurisation à contre-courant**: suite de la régénération de l'adsorbeur amorcée à l'étape 2.

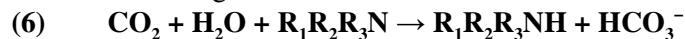
4. **purge à contre-courant**: cette étape termine la régénération de l'adsorbeur par un balayage à contre-courant (sens d'écoulement opposé à celui de l'étape 1). On utilise de l'H<sub>2</sub> pur provenant d'un autre adsorbeur en étape 1 ou 2.

5. **repressurisation** : se fait généralement à contre-courant. L'H<sub>2</sub> pur est concentré à l'extrémité de l'adsorbeur. Une fois que l'adsorbeur a atteint la pression d'adsorption, le cycle est terminé et l'adsorbeur est régénéré, et une nouvelle étape d'adsorption commence.

- La **méthanation** ou **méthanisation**

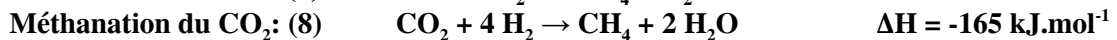
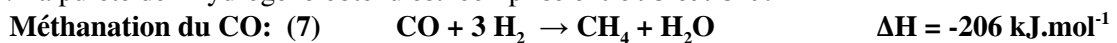
La méthanation comprend d'abord une étape de **décarbonatation**.

Cette étape consiste à extraire le CO<sub>2</sub>, le plus souvent par un procédé chimique de lavage aux amines, selon la réaction globale suivante:



La réaction de décarbonatation mène à un taux résiduel de dioxyde de carbone de 0,005 à 0,1 % en volume.

Ensuite a lieu la réaction de méthanation à proprement parler. Elle sert à éliminer les traces restantes de CO et de CO<sub>2</sub>, permettant d'atteindre une teneur finale en volume d'impuretés inférieure à 0,001%. La pureté de l'hydrogène obtenu est comprise entre **95 et 98%**.



## Annexe 2 : Différents types de gazéifieurs

### 1. Les gazéifieurs à lit fixe

- **Co-courant**

Les différentes étapes s'effectuent du haut vers le bas. La matière organique combustible est insérée au lieu le plus haut du réacteur. L'oxygène est introduit au milieu du réacteur pour la combustion qui va dégager de la chaleur à tout le système. Finalement, le *syngas* est récupéré au bas du réacteur. La zone de pyrolyse étant au dessus de la zone d'oxydation, les gaz traversent une zone extrêmement chaude. En conséquence, les goudrons formés dans ces gaz se craquent puis le *syngas* se retrouve appauvri en goudron. Des cendres sont évacuées au dessous du réacteur.

- **Contre-courant**

L'oxygène est inséré au bas du réacteur. Ainsi la combustion se fait en bas du réacteur. Ce système permet d'empêcher l'évacuation des goudrons. En effet, le *syngas* est récupéré au sommet du réacteur et il ne traverse pas la zone chaude. Ainsi les goudrons de pyrolyse ne peuvent pas se craquer. De plus, le gaz se refroidit en traversant la zone de séchage.

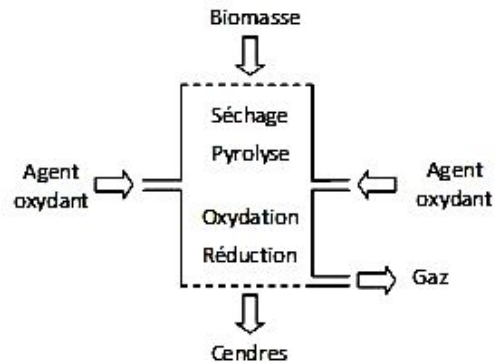
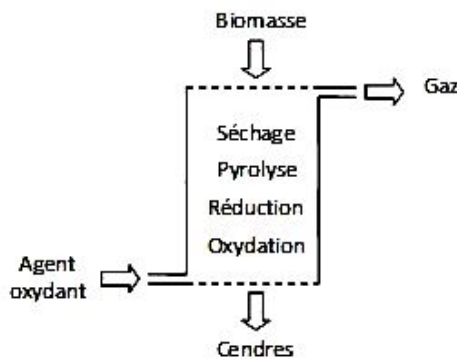
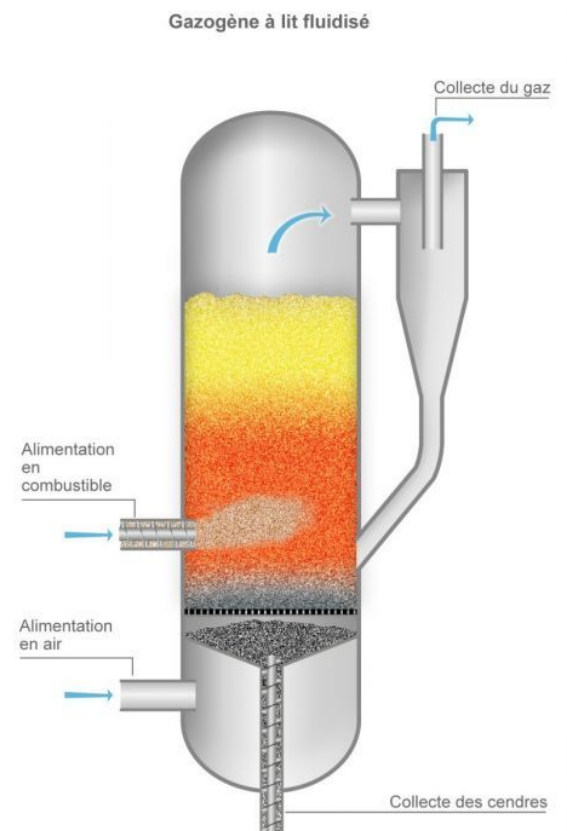


Illustration I- Schéma d'un gazéifieur contre-courant Illustration II- Schéma d'un gazéifieur co-courant

### 2. Les gazéifieurs à lit fluidisé

Dans les réacteurs à lit fluidisé, les étapes se passent toutes au même lieu. La matière organique combustible est introduite sous forme égrainée au bas du réacteur. Ensuite, un courant gazeux de  $O_2$  ou de vapeur d'eau à grande vitesse traverse les grains afin de provoquer la fluidisation. Ce processus consiste à un effet de friction entre le gaz et les grains de matière organique qui maintient les grains en suspension sans être entraînés par le courant. Les grains et les molécules gazeuses sont homogénéisés par le mouvement rapide et désordonné des grains, ce qui crée ainsi un fluide. Il faut alors que la matière organique soit broyée. De ce fait, cette méthode a l'avantage de pouvoir utiliser plusieurs variétés de combustible.

Illustration III- Schéma d'un réacteur à lit fluidisé



### 3. Les gazéificateurs à lit entraîné

Des grains de matière organique combustible sont pulvérisés dans un jet de réactif gazeux. Ensuite, une flamme apparaît, rendant alors les gaz chauds. Ainsi la gazéification s'effectue dans des conditions de température et de pression très élevées. Selon les documents des techniques de l'ingénieur, ce type de gazéificateur présente trois zones contrairement aux autres :

- **Allumage :** Les grains de matière organique sont chauffés notamment par la flamme produite. Ensuite, il y a production de l'étape de pyrolyse.
- **Combustion**
- **Réduction**  
Il n'y a pas de formation de goudrons et de méthane.

## Annexe 3: Electrolyse

### 1. Principe détaillé de l'électrolyse de l'eau

Pour réaliser la décomposition de l'eau par électrolyse, un apport d'énergie électrique est nécessaire. Avec une enthalpie de dissociation de l'eau :  $\Delta H = 285 \text{ kJ/mol}$ . Pour réaliser cette décomposition, un apport d'énergie électrique est nécessaire, dépendant en grande partie de l'enthalpie et de l'entropie de réaction. Le potentiel théorique de la décomposition vaut 1,481V à 298 K. Sachant que les valeurs classiques des potentiels de cellules industrielles se situent entre 1,7 et 2,1 V, les rendements d'électrolyse sont de l'ordre de 70 à 85 %. Concernant la consommation électrique des électrolyseurs industriels (auxiliaires compris), elle vaut entre 4 et 6 kWh/Nm<sup>3</sup>, la chaleur dégagée liée aux irréversibilités devant être éliminée en permanence. Pour ce qui est de l'alimentation minimale en eau d'un électrolyseur, elle est de 0,8 L/Nm<sup>3</sup> d'hydrogène. En pratique, la valeur réelle se situe aux alentours de 1 L/Nm<sup>3</sup>. D'autre part, il est indispensable que l'eau introduite soit la plus pure possible puisque les impuretés restent dans l'équipement et s'accumulent au fur et à mesure de l'électrolyse, perturbant ainsi les réactions électrolytiques par la formation de boues et l'action des chlorures sur les électrodes. Par ailleurs, la conductivité ionique de l'eau constitue un élément important : elle est inférieure à quelques  $\mu\text{S/cm}$ .

Concernant l'électrolyseur, il peut être décrit de la façon suivante. Une cellule d'électrolyse est composée de deux électrodes : une anode et une cathode, reliées à un générateur de courant continu, ainsi que d'un électrolyte, soit un milieu conducteur ionique. Le plus souvent, l'électrolyte est soit une solution aqueuse acide ou basique, soit une membrane polymère échangeuse de protons ou bien une membrane céramique conductrice d'ions O<sup>2-</sup>. Généralement, l'électrolyse industrielle est faite avec une solution aqueuse d'hydroxyde de potassium possédant une concentration qui varie en fonction de la température (de 25 % en masse à 80 °C jusqu'à 40 % à 160 °C). On préfère utiliser de la potasse plutôt que de la soude en raison de sa conductivité supérieure à niveau de température équivalent et d'un meilleur contrôle des impuretés chlorures et sulfates.

### 2. Point historique : l'électrolyse de l'eau jusqu'au XXe siècle

- 1789 : deux chercheurs Hollandais Paets van Troostwijk et Jan Rudolph Deiman décomposent l'eau dans une décharge électrique créée à partir d'une machine électrostatique.

- 1800 : Mise au point de la première pile par Alessandro Volta
- En 1800 également, deux anglais Anthony Carlisle et William Nicholson mettent au point un dispositif semblable à celui de Volta et l'utilisent pour décomposer l'eau
- En Allemagne, Johann Wilhelm Ritter met au point la même année un appareil permettant de recueillir l'hydrogène et l'oxygène séparément et démontre que le volume d'hydrogène obtenu est le double de celui d'oxygène.
- 1870 : Invention de la dynamo par Zénobe Gramme qui rend alors possible la mise en œuvre industrielle de l'électrolyse. Cependant, le développement de ce procédé est lent étant donné qu'à cette époque l'hydrogène et l'oxygène avaient peu d'applications et étaient générés par des méthodes reconnues.
- Entre 1885 et 1890 : utilisation d'un premier type d'électrolyseur par Arsène d'Arsonval (Collège de France) et Charles Renard (station aérostatique de Chalais-Meudon) : ce dispositif est constitué d'une enceinte cylindrique en fer faisant office de cathode au sein de laquelle on suspend une anode en tôle de fer perforée, l'enceinte étant entourée d'une enveloppe en toile ou en amiante servant de diaphragme. Ces savants, afin d'éviter de recourir à des électrodes en platine, remplacent par un hydroxyde alcalin l'acide utilisé auparavant comme électrolyte dans les essais de laboratoire. Toutefois, il est à noter que la forme de ces appareils limite leur capacité de production.
- 1888 : dépôt du brevet du professeur A. Latchinoff concernant la production d'hydrogène et d'oxygène par électrolyse. Il préconise de réaliser l'électrolyse sous pression imagine un appareil à électrodes bipolaires qui comprend plusieurs cellules, les électrodes terminales étant reliées à la source de courant. Ces idées seront toutes mises en pratique.
- 1890-1900 : construction des premiers électrolyseurs industriels à électrodes monopolaires et bipolaires.

### 3. Les différents types d'électrolyseurs

#### Les électrolyseurs à électrodes monopolaires

- Fin XIXe siècle : les aérostiers militaires se mettent à s'intéresser au procédés de fabrication de l'hydrogène
- 1893 – 1899 : mise au point d'un électrolyseur dont les diaphragmes sont des plaques de fer partiellement perforées, les électrodes des lames métalliques fixées latéralement. Ces électrodes sont constituées aux extrémités d'une cloche solidaire des diaphragmes visant à recueillir les gaz. Une grande installation similaire fut construite pour l'armée italienne.
- Utilisation de l'hydrogène par ce procédé au début du XXe siècle pour l'hydrogénation des huiles. Après la Première Guerre mondiale, l'industrie chimique s'intéresse à ce procédé pour la synthèse d'ammoniac, qui nécessite un apport important d'hydrogène. A ce jour, les électrolyseurs à électrodes monopolaires ne sont plus utilisées que pour des activités semi-industrielles telles que la production d'ammoniac par exemple, et pour des applications en laboratoire.

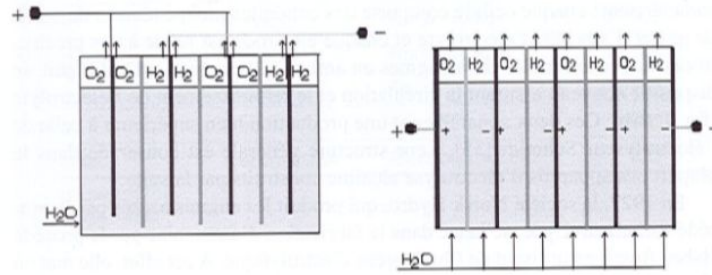


Fig. 1.15 Principe des appareils à électrodes monopolaires et à électrodes et bipolaires.

#### Illustration IV

Les dispositifs industriels à électrodes monopolaires furent progressivement remplacés par ceux à électrodes bipolaires.

#### Les électrolyseurs à électrodes bipolaires

Ces derniers sont tous de type « filtre-pressé ». Autrement dit, ils sont constitués d'une suite de cellules dont les cadres forment la paroi externe du dispositif. Ils sont de deux types. Dans le premier, les fluides quittant les cellules circulent via des canaux communs percés dans la paroi externe. Dans le second type, chaque cellule a un conduit d'évacuation de gaz spécifique.

##### 1) 1899 : le premier électrolyseur du type « filtre-pressé »

Mis au point par O. Schmidt, ce dernier est constitué d'une série d'électrodes bipolaires entre lesquelles sont pressées des toiles d'amiante afin de les isoler les unes des autres et servant ainsi de diaphragme. Ces électrodes ont des bords de forme rectangulaire qui constituent l'enceinte d'électrolyse. Ces derniers sont percés de quatre canaux qui forment respectivement les conduites de sortie des gaz et de circulation de l'électrolyte. Peu encombrant, seules deux électrodes terminales sont connectées au réseau. Son système de tuyauterie simple lui valut un succès instantané.

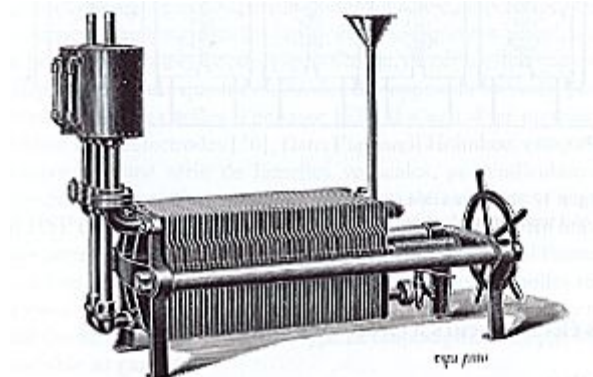


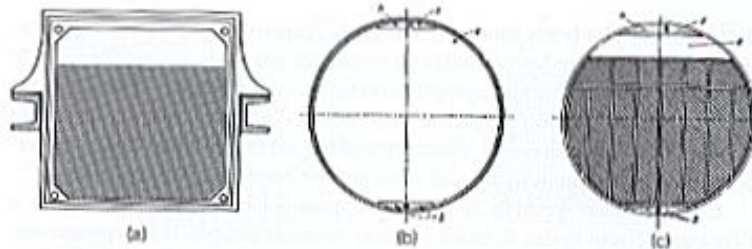
Fig. 6.14 Electrolyseur Schmidt [18].

#### Illustration V

##### 2) 20 ans plus tard : mise au point de l'électrolyseur Pechkranz

Cet électrolyseur a pour électrodes des plaques de fer minces et pour diaphragmes des feuilles de nickel percées d'un grand nombre de petits trous, sa géométrie est similaire à celle du dispositif de Schmidt.





**Fig. 6.15** Eléments de l'électrolyseur Pechkranz: a) diaphragme carré [40], b) électrode ronde et c) diaphragme rond (tiré de [33]).

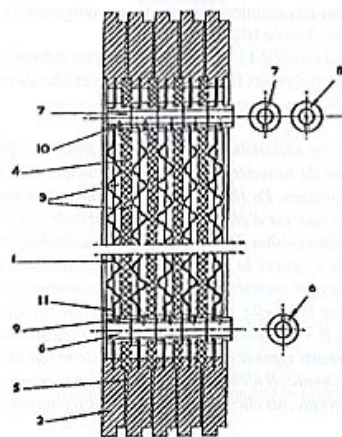
*Illustration VI*

3) 1927 : mise en place d'électrolyseurs de Pechkranz d'une puissance de 120 MW par la société Norsk Hydro (Norvège)

Cette société a mis en place ces électrolyseurs en raison de son lancement dans la production d'ammoniac par un procédé utilisant de l'hydrogène électrolytique.

4) En 1940: mise au point de l'électrolyseur de Arnold Ewald Zdansky

Arnold Ewald Zdansky fut chargé par la firme Lonza de développer un électrolyseur sous pression. Ce dispositif se distingue du précédent par deux caractéristiques. Tout d'abord, chaque cellule a des conduites indépendantes de sortie de gaz et chacune des électrodes est reliée à des préélectrodes qui entourent et serrent les diaphragmes en amiante. De plus, il se caractérise par un dispositif nouveau assurant la circulation et le refroidissement de l'électrolyte. Ce dispositif permet d'éviter la compression du gaz, indispensable lors de certaines opérations chimiques. Du fait de leur taille plus petite qu'à pression normale, les bulles gazeuses voient leur dégagement favorisé, de même que l'épaisseur des cellules est diminué et que l'encombrement de l'électrolyseur est moins important pour une production donnée.



**Fig. 6.18** Structure des cellules de l'électrolyseur Zdansky-Lonza. La paroi de l'électrolyseur est formée de pièces annulaires (2) isolées les unes des autres par des anneaux recouverts de polytétrafluoréthylène (5). Les électrodes en tôle gaufrée (1) sont fixées à ces pièces. Elles sont reliées aux préélectrodes en treillis métallique (3) qui touchent le diaphragme en amiante (4). L'électrolyte amené par le conduit (6) pénètre dans les compartiments cathodiques et anodiques par les orifices (9) et (11). Les gaz entrent par les conduits (10) dans les collecteurs de gaz (7) et (8).

*Illustration VII*

5) *Construction et commercialisation d'appareils d'électrolyse par Brown Boveri & Co après sa fusion avec la Maschinenfabrik Oerlikon en 1967*

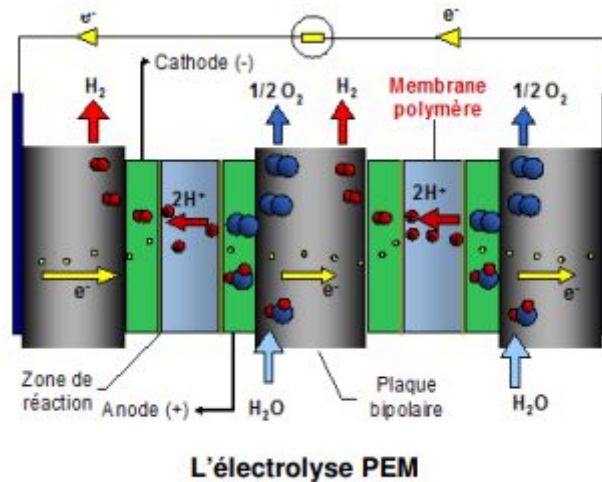
Installées au barrage d'Assouan, ces installations servent à produire de l'hydrogène destiné à synthétiser l'ammoniac servant aux engrais. Au total, leur production atteint 33 000m<sup>3</sup>/h

Electrolyse en milieu acide et en phase vapeur : l'électrolyseur PEM (Proton Exchange Membrane)

Le concept de cet électrolyseur est tiré de celui de la pile à combustible. Cet appareil est très différent d'un électrolyseur alcalin. Chacune de ses cellules est dotée d'un électrolyte qui est une membrane en matériau polymère, les ions hydronium (H<sub>3</sub>O<sup>+</sup>) étant les seuls à pouvoir la traverser. Sur chacune de ses faces sont plaqués des électrocatalyseurs et chacune des membranes est entourée par des distributeurs de courant, les plus souvent en titane, et par des plaques bipolaires. Ces plaques ont des rainures visant à introduire l'eau et à récupérer les gaz.

Avantages : Il s'agit d'un dispositif plus compact que l'électrolyseur alcalin et qui possède un meilleur rendement que ce dernier.

Inconvénients : Dispositif coûteux en raison du prix élevé de la membrane et des électrocatalyseurs qui sont en métaux nobles.



*Illustration VIII*

#### 4. Fabricants et développeurs d'électrolyseurs

Aujourd'hui de nombreuses entreprises développent et/ou fabriquent différents électrolyseurs. Pour vous les présenter de manière concise nous allons les énoncer dans le tableau ci-après. Elles seront classées par technologie (alcaline, PEM, SOEC).

Technologie	Fabricant et/ou développeur
Alcaline	<ul style="list-style-type: none"> <li>• IHT : Industrie Haute Technologie (Suisse)</li> <li>• ELT : Elektrolyse Technik GmbH (Allemagne)</li> <li>• Hydrogenics (Canada)</li> <li>• Angstrom Advanced Inc. (Etats-Unis)</li> <li>• NEL Hydrogen AS</li> <li>• McPhy Energy (France)</li> <li>• Toshiba Corp.</li> </ul>
PEM	<p>Basse Pression (&lt; 100 bars)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Proton Onsite (Etats-Unis)</li> <li>• Hydrogenics (Canada)</li> <li>• AREVA Smart Energies (AREVA H2-Gen) (France)</li> <li>• GINER Inc. (Etats-Unis)</li> <li>• ITM Power (Grande Bretagne)</li> <li>• Siemens</li> </ul> <p>Haute Pression (&gt; 100 bars)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Proton Energy Systems Inc. (Etats-Unis)</li> <li>• Mitsubishi Corp. (Japon)</li> </ul>
SOEC	<ul style="list-style-type: none"> <li>• FuelCell Energy Inc.</li> <li>• CEA Liten (Sylfen)</li> </ul>

Illustration IX- Tableau des fabricants d'électrolyseurs selon la technologie

## 5. Résultats de l'étude du CGSP (Commissariat Général à la Stratégie et à la Prospective) publié en septembre 2014

COÛTS DE PRODUCTION DE L'HYDROGÈNE PAR ÉLECTROLYSE SUIVANT DIVERS SCÉNARIOS							
Scénario		1	2	3	4	5	6
Coût de l'électrolyseur	€/kW	2 000	2 500	800	800	800	800
Rendement électrolyse		60 %	50 %	80 %	80 %	80 %	80 %
Production annuelle	kWh	7 000	2 000	2 000	1 000	500	7 000
Coût de l'électricité stockée	€/MWh	70	70	70	140	0	60
Coût de l'H2 produit	€/kg	7,0	18,3	6,1	12,2	10,5	3,7
	soit \$/MBtu	68	177	59	118	102	36
	soit €/MWh	178	463	154	309	267	94

Source : CGSP

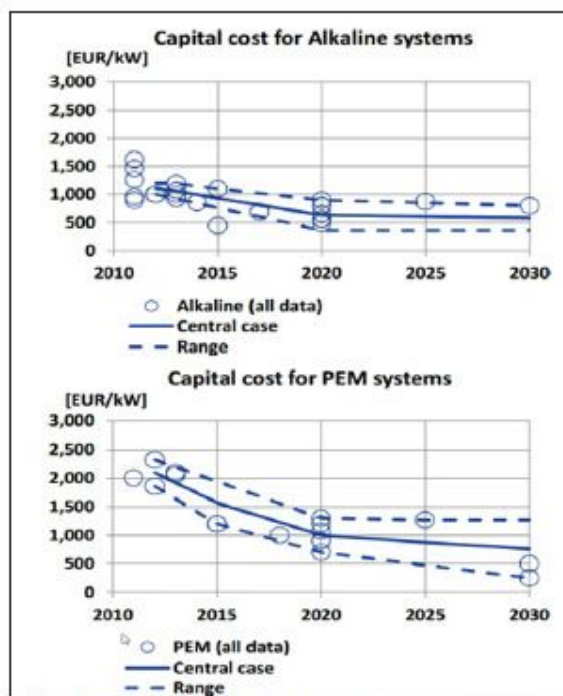
Coûts de production selon divers scénarios détaillés ci-dessous

Illustration X

## 6. Données économiques de l'I Técé concernant les perspectives d'évolution de coût d'électrolyseurs d'ici 2030

1. Électrolyse alcaline aux conditions actuelles pour une utilisation en base (7 000 heures/an), avec un prix de l'électricité de 70 €/MWh et un rendement de l'électrolyseur de 60 %.
2. Électrolyse PEM aux conditions actuelles pour stocker de l'énergie éolienne (70 €/MWh, 2 000 heures/an).

3. Idem à 2 mais avec un coût d'électrolyseur de 800 €/kW et un rendement de 80 %, soit aux conditions qu'on peut espérer à l'horizon 2025-2030.
4. Idem à 3, mais avec stockage d'énergie solaire photovoltaïque (140 €/MWh, 1 000 heures/an).
5. Idem à 3, mais avec un prix de l'électricité stockée nul et des durées d'utilisation réduites (500 h/an), correspondant à de l'énergie renouvelable excédentaire. En effet, certaines études attribuent une valeur nulle aux kWh électriques à stocker, en général produits par des ENR, ce qui reflèterait le caractère fatal de cette énergie quand elle ne peut être ni consommée ni transportée sur le réseau. Bien que cette hypothèse soit hautement contestable, elle a l'intérêt de mettre en évidence la part due aux coûts fixes de l'installation.
6. Un dernier scénario évalue la production d'hydrogène en base aux conditions futures espérées.



Perspectives d'évolution de coût d'électrolyseurs à l'horizon 2030  
Source : étude E4Tech pour le Fuel cells and Hydrogen Joint Undertaking, février 2014<sup>5</sup>

Illustration XI

#### Annexe 4 : D'autres méthodes de production d'H<sub>2</sub> par voie biologique

- **Photo décomposition des matières organiques par les bactéries photosynthétiques anoxygéniques**

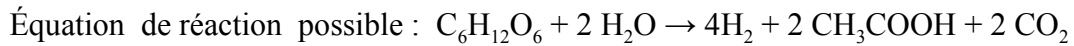
La photo décomposition des matières organiques est un processus biologique permettant une production considérable d'hydrogène. En effet, ce processus consiste à oxyder des substrats organiques, comme les acides organiques ou les sucres, dans le but d'obtenir de la biomasse, du H<sub>2</sub> et du CO<sub>2</sub>. Les électrons issus de l'oxydation des substrats organiques participent à la réduction de composés électronégatifs tels que la Ferrédoxine grâce à la

présence d'ATP. Les bactéries photosynthétiques synthétisent l'ATP en absorbant la lumière. Ensuite, cette réduction et la synthèse d'ATP participent à la réaction de production d'H<sub>2</sub> par une nitrogénase. Le rendement d'hydrogène est plus important avec cette méthode car il n'y a pas de production d'oxygène qui pourrait inhiber la nitrogénase.

- **La fermentation à l'obscurité de composés organiques**

Des bactéries fermentatives dégradent des composés organiques riches en glucose dans l'obscurité. Ces composés organiques proviennent de l'hydrolyse des déchets de la biomasse.

De ce fait, cette méthode est un atout pour la production d'hydrogène, car la biomasse est abondante et facilement disponible.



**Annexe 5 : Stockage gazeux haute pression: Composition des réservoirs**

Structure des réservoir haute pression :

- Une enveloppe étanche : soit métallique (acier inoxydable) soit composé de polymère.
- Une structure composite travaillante : composée de torons de fibres de carbone qui permettent à la structure de résister aux pressions importantes.
- Une couche de protection : composée de fibre de verre et d'une résine pour que la bouteille résiste aux chocs et aux intempéries.

De plus, une soupape de sécurité, se trouve à une des extrémités et permet en cas de surpression de décharger le réservoir. Bien-sûr, il y a aussi une embase pour permettre le raccordement avec le circuit d'utilisation.



*Illustration XII- Bonbonnes d'H<sub>2</sub>*

**Annexe 6 : Stockage solide + Création et composition des galettes de magnésium**

**Magnésium :**

Magnésium	Forme cristallisée
Conformation	Cubique face centrée
Sites interstitiels	Octaédrique ou tétraédriques
Coût	Faible
Présence	7 <sup>ème</sup> élément le plus abondant sur terre.
Absorption H2	7,6 % de H2

*Illustration XIII- Tableau des caractéristiques du magnésium (forme cristallisée)*

Pour former des galettes de magnésium, le magnésium est d'abord broyé pour réduire la taille des cristallites à l'échelle du nanomètre, ce qui favorise la diffusion rapide de l'hydrogène. Cependant, le magnésium possède certains inconvénients non négligeables, à savoir : une température et pression de réaction (absorption et désorption du H<sub>2</sub>) trop élevée et une cinétique de la réaction trop faible. C'est pourquoi les scientifiques ont décidé d'utiliser des catalyseurs pour améliorer ces propriétés.

Ainsi, pour améliorer la cinétique d'absorption et de désorption de l'hydrogène, la poudre de magnésium a été mélangée avec des métaux de transitions tels que le Vanadium et le Nickel par

exemple. Les poudres composites ainsi formées possèdent des propriétés d'absorption supérieures aux poudres composées simplement de magnésium.

En effet, d'après les données du tableau, on remarque que le magnésium sous forme simple -l'hydruure de forme  $MgH_2$ - peut sous forme solide absorber 4 kg d' $H_2$  dans 38L alors que le magnésium mélangé a du Nickel - l'hydruure de forme  $Mg_2NiH_4$ - absorbe la même quantité dans 26L.

Pour finir, après avoir découvert que le Vanadium et le Nickel permettaient d'augmenter l'absorption de l'hydrogène, les chercheurs ont décidé de s'intéresser aux alliages présentant une forte affinité avec l'hydrogène. Ils ont alors découvert que l'alliage Ti-V-Cr -composé de Titane, Vanadium et Chrome- présente une forte affinité avec l'hydrogène et possède des propriétés d'absorption et de désorption de l'hydrogène meilleures que le magnésium seul. En effet, comme nous pouvons le remarquer sur la figure 1, cet alliages absorbe bien plus d'hydrogène que les poudres composites  $Mg_2NiH_4$  ou et même deux fois plus que la poudre simple  $MgH_2$ . De plus, cet alliage permet de diminuer la température de la réaction du magnésium simple. Cependant, le prix des métaux étant très élevé, le chercheurs ont mélangé cet alliage avec les poudres de magnésium pour obtenir des galettes – 5 % d'alliage et 95 % de  $MgH_2$  - présentant une cinétique de réaction rapide.

Dans un second temps pour diminuer la température de réaction et augmenter la conductivité thermique, les chercheurs ont ajouté du Graphite à la poudre de magnésium et ses additifs. Ainsi, un disque de 30 cm de diamètre et de 1 cm d'épaisseur contient l'équivalent de 500 litres d'hydrogène à pression atmosphérique et à température ambiante.

## Annexe 7 : Histoire de la pile à combustible

La découverte du principe de la pile à combustible remonte à 1839, par le scientifique suisse Christian Friedrich Schönbein. Réalisant initialement une électrolyse de l'eau, il remarqua l'apparition d'un courant électrique de sens inverse à celui appliqué pour cette expérience lorsqu'il coupait le courant. Il y avait une réaction entre les produits de l'électrolyse, donc entre l'oxygène et l'hydrogène. En 1845, le chimiste anglais Sir William Robert Grove, ayant travaillé avec Schönbein, réalisa la première expérience aboutissant à la génération d'un courant en utilisant le principe de la pile à combustible.

Par la suite, la pile à combustible resta plus ou moins en latence durant près d'un siècle. Son utilisation n'était pas encore une nécessité et l'intérêt auprès de ce type de pile était moindre. Ainsi, ce n'est qu'en 1935 qu'un progrès significatif apparut réellement lorsque Francis Thomas Bacon réalisa un prototype de pile à combustible, en remplaçant l'électrolyte acide initial par un électrolyte alcalin. L'avantage de ce dernier est d'être moins corrosif pour les électrodes. Cette pile à combustible aboutira en 1953 sur la création d'un premier générateur électrique de 1kW.

Néanmoins les coûts restant très élevés, l'expansion des piles à combustible était limitée et seule la NASA pouvait se permettre de tels investissements. Elle l'utilisa, avec succès, comme générateur électrique pour les missions Gemini et Apollo en 1963 et 1968.

Ce n'est qu'avec le premier choc pétrolier en 1973 que le monde se rendit compte du besoin de varier les productions énergétiques pour palier aux futures pénuries de pétrole. Les États-Unis et le Japon poursuivirent de manière très active leurs recherches dans les années 1980.

Depuis sa découverte, la pile à combustible a ainsi connu de nombreuses améliorations (perfectionnement des électrodes par Monde et Langer en 1899, optimisation de la température de fonctionnement ...), mais le principe, lui, n'a pas changé.

### **Annexe 8: Les types de pile à combustible PEMFC et SOFC.**

La pile de type PEM est une pile à membrane polymère échangeuse de protons. Pour une pile à combustible, le choix de l'électrolyte est déterminant car il requiert des propriétés particulières. Les membranes composées de macromolécules perfluorées s'adaptent bien à ces piles car cette membrane possède une conductivité protonique élevée, assure l'étanchéité à l'hydrogène et à l'oxygène, ainsi qu'une bonne tenue chimique et thermique de quelques milliers d'heures pour une utilisation durable. Le prix de ces membranes est assez élevé, estimé entre 400 et 500 € par m<sup>2</sup>.

Le catalyseur utilisé est le platine, métal très performant car il assure parfaitement l'oxydation de l'hydrogène et la réduction de l'oxygène, tout en empêchant la formation de peroxyde d'oxygène pouvant dégrader le catalyseur. Aujourd'hui, la quantité de platine utilisée est de l'ordre de 0,2 mg de platine par cm<sup>2</sup> de membrane, l'objectif étant de réduire cette masse par unité de volume au maximum. Le platine étant un métal rare, les coûts associés à son utilisation sont rapidement élevés.

Enfin, la PEMFC fonctionne à une température située entre 60 et 90 °C, ce qui est plutôt bas, privilégiant son utilisation pour les véhicules routiers et pour les portables car le fonctionnement de la pile s'effectue rapidement. C'est également dans ce domaine que la PEMFC a été optimisée pour être la plus compacte possible : on parle ici d'une puissance de 3,1 kW/ kg pour une seule pile.

La deuxième pile que nous avons choisi de vous présenter est la SOFC. Cette dernière utilise un processus bien différent des PEMFC. La température de fonctionnement peut varier entre 650 et 1000 °C. Cette température, très élevée, permet de faciliter la conductivité protonique des électrolytes. De plus, cette chaleur est très utile pour réutiliser les rejets thermiques tels que le monoxyde de carbone pour alimenter une turbine à gaz, ce qui accroît de manière significative le rendement global du système, dépassant les 80 %. Il est également important de préciser que cette température permet de s'affranchir d'un catalyseur précieux comme le platine, et représente donc un très bon rapport coût/rendement. Néanmoins, cette montée en température nécessite un temps de démarrage relativement long ; les piles de ce type sont donc privilégiées pour des utilisations stationnaires et de longue durée. Actuellement, de nombreux efforts de recherche sont effectués par les États-Unis, le Japon et certains pays européens, en mettant en place des projets. Par exemple, au Japon, le programme NEDO, en partenariat avec Toyota Turbine and Systems Inc et Mitsubishi Hitachi Power Systems Ltd, a réalisé en 2017 des essais visant à produire de l'électricité en alliant une SOFC et une micro-turbine à gaz. Ayant pour objectif la production interne d'électricité, ce mécanisme a affiché un rendement assez convaincant, avec 55 % de rendement en production d'électricité.

## Annexe 9 : Les camions à hydrogène

Le transport routier de marchandises est assuré par les camions. Ces derniers sont, comme de nombreux autres véhicules, polluant car ils fonctionnent grâce à des moteurs à combustible ayant pour carburant des énergies fossiles. Comme pour les bus, la nécessité de réduire les émissions de gaz à effet de serre et le rejet de particules fines pousse les acteurs de ce secteur à envisager de nouvelles solutions. C'est donc naturellement que certains se tournent vers l'hydrogène. A l'image des bus, les camions à hydrogène semblent être une réalité qui pourrait arriver rapidement sur le marché et notamment sur le marché américain. En effet, le constructeur Japonais Toyota a testé un camion à hydrogène à Los Angeles durant l'été 2017. Ce semi-remorque est équipé de deux piles à combustibles ainsi que d'une batterie de 12kWh. Le camion affiche une puissance de 670 chevaux ; en revanche l'autonomie est assez faible puisque Toyota prévoit que leur machine puisse parcourir 320km entre chaque ravitaillement. Cependant d'autres entreprises comme Nikola Motor sont proche de la commercialisation de ce type de camions. Cette entreprise prévoit de livrer ses premiers camions à l'horizon 2021. De plus, l'entreprise affirme que 376 stations de ravitaillements seront créées. Cette initiative pourrait accélérer encore le nombre de précommandes car le manque de stations est l'un des principaux freins au développement de cette technologie.

## Annexe 10 : Les hydrogène synonyme de performance dans la compétition automobile.

La solution de l'hydrogène en tant qu'alternative, non polluante, aux énergies fossiles intéresse de nombreux constructeurs automobiles. Dans ce domaine, il est commun de voir des nouveautés technologiques apparaître dans les sports mécaniques. Ce fut le cas avec la société Suisse GreenGT qui a décidé de développer une voiture de course non polluante. En 2009, cette entreprise développait son premier concept de voiture de course la GreenGT. Cette voiture était électrique et alimentée par des batteries lithium-ion. Cependant, la faible autonomie de l'engin n'a pas satisfait l'entreprise. Dès lors, cette dernière changea de technologie pour adopter une PAC. Les avantages de cette nouvelle solution sont nombreux : le poids est contenu (1240 kg), la puissance du modèle atteint les 460 chevaux, l'autonomie est portée à 40 minutes en utilisation intensive. L'avantage principal de cette nouvelle solution est le faible temps nécessaire au ravitaillement du véhicule. Pour ravitailler cette monoplace, les bonbonnes d'hydrogène sont échangées lors du passage au stand. Grâce à ce projet, l'efficacité potentielle de la PAC est démontrée, l'utilisation de ce carburant dans des véhicules accessibles au grand public devient envisageable.

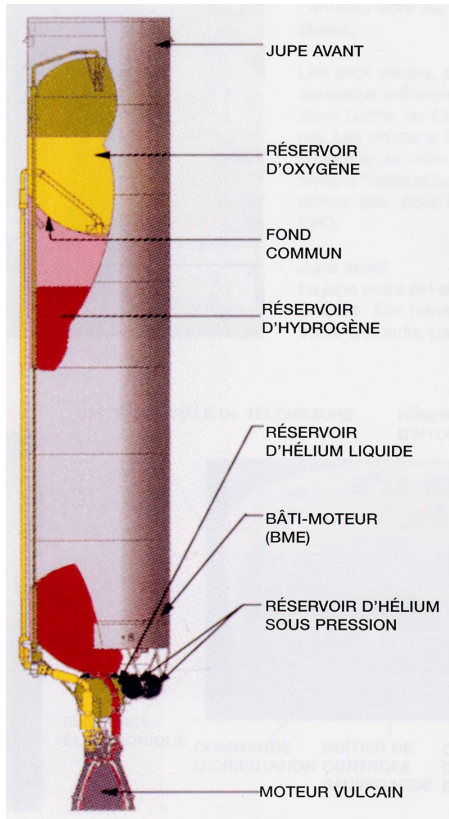


*Illustration XIV- Voiture de course GreenGT*



## Annexe 11 : le moteur Vulcain

Le moteur Vulcain de la fusée Ariane 5 utilise de l'hydrogène H<sub>2</sub>, sous forme liquide, comme combustible, qui va brûler au contact de l'oxygène O<sub>2</sub>. La fusée emporte, au niveau de l'Etage Principal Cyrotechnique (EPC), un réservoir d'hydrogène et un d'oxygène. L'hydrogène embarqué par Ariane 5 est liquéfié à -250°C, sous une pression de 2,15 bars. L'oxygène est liquéfié à -180°C, sous une pression de 3,5 bars. Comme les températures sont très basses, le moteur Vulcain est dit « cryotechnique » (cryo, du grec « froid »).



*Illustration XV- Schéma de l'EPC de la fusée Ariane 5*

Lors du lancement de la fusée, H<sub>2</sub> et O<sub>2</sub> sont amenés des réservoirs par deux turbopompes indépendantes. La combustion de l'hydrogène ( $2\text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$ ) a lieu dans la chambre de combustion du moteur Vulcain à une température de plus de 3000 K. L'énorme quantité de vapeur d'eau produite passe par une tuyère où elle est détendue à très grande vitesse. Le gaz est ensuite éjecté à très grande vitesse, assurant ainsi la propulsion de la fusée.

Le moteur Vinci, développé pour la fusée Ariane 6, prévue à l'horizon de 2020, est aussi un moteur cryotechnique basé sur la combustion de l'hydrogène liquide et de l'oxygène liquide. Auparavant, dans les années soixante, la NASA avait développé le moteur F-2 au fonctionnement similaire.

## 6. Bibliographie / Sitographie

### Bibliographie

**BEGUIN Claude.** *Une chronique de l'hydrogène, Histoire des méthodes de production et des applications.* PRESSES POLYTECHNIQUES ET UNIVERSITAIRES ROMANDES. 2016.

**BLUNIER Benjamin, MIRAOUI Abdellatif,** 20 questions sur la pile à combustible – l'hydrogène : vecteur énergétique de demain ?. Question 13: Comment produire l'hydrogène, p81 à 85. éditions TECHNIP. 2009.

### Sitographie

**[auteur inconnu].** A Saint-Lô, les premiers vélos électriques à hydrogène en France. *Le Monde.* [en ligne]. 12 décembre 2017.  
[http://www.lemonde.fr/smart-cities/article/2017/12/11/a-saint-lo-les-premiers-velos-electriques-a-hydrogene-en-france\\_5228161\\_4811534.html](http://www.lemonde.fr/smart-cities/article/2017/12/11/a-saint-lo-les-premiers-velos-electriques-a-hydrogene-en-france_5228161_4811534.html) [valide le 11/04/18].

**[auteur inconnu].** TPE pile à combustible le S. [en ligne]. 1/02/2009.  
<https://tpepilecombustible.wordpress.com/2009/02/01/principe-de-fonctionnement/> [valide le 31/05/18].

**3EMOTION.** <http://www.3emotion.eu/>. [valide le : 03/6/2018].

**ADEME.** Guide d'information sur les risques et les mesures de sécurité liés à la production décentralisée d'hydrogène. Page 21. Juin 2015.  
<http://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/guide-information-securite-production-decentralise-hydrogene-8505.pdf> [valide le 31/05/2018].

#### **AFHYPAC :**

*Les Bus à hydrogène.* Septembre 2016.

<http://www.afhypac.org/documents/tout-savoir/Fiche%209.2%20-%20Les%20bus%20H2%20rev.sept2016%20Th.pdf>. [valide le : 03/6/2018].

*Production d'hydrogène à partir des combustibles fossiles.* Septembre 2014.

[http://www.afhypac.org/documents/toutsavoir/fiche\\_3.1.1\\_production\\_partir\\_de\\_fossiles\\_rev.sept2014\\_ta.pdf](http://www.afhypac.org/documents/toutsavoir/fiche_3.1.1_production_partir_de_fossiles_rev.sept2014_ta.pdf) [valide le 25/04/2018].

*Production d'hydrogène par électrolyse de l'eau.* Janvier 2017.

<http://www.afhypac.org/documents/tout-savoir/Fiche%203.2.1%20-%20Electrolyse%20de%20l%27eau%20revjanv2017%20ThA.pdf> [valide le : 22/02/2018].

*Production d'hydrogène par dissociation thermochimique de l'eau.* mai 2016.

<http://www.afhypac.org/documents/tout-savoir/Fiche%203.2.2%20-%20Production%20H2%20voie%20thermochimie%20-%20revmai2016%20ThA.pdf>. [valide le 28/05/2018].

STOCKAGE DE L'HYDROGÈNE SOUS FORME DE GAZ COMPRIMÉ. Fiche 4.2. Memento de l'hydrogène [en ligne]. Révisé en septembre 2014.  
[http://www.afhypac.org/documents/tout-savoir/fiche\\_4.2\\_stockage\\_hydrog\\_ne\\_comprim\\_septembre\\_2014.pdf](http://www.afhypac.org/documents/tout-savoir/fiche_4.2_stockage_hydrog_ne_comprim_septembre_2014.pdf)

**AGENCE FRANÇAISE DE LA PRESSE.** Pétrole épuisé avant les renouvelables. 15/11/11.  
<http://www.lefigaro.fr/flash-eco/2010/11/15/97002-20101115FILWWW00763-petrole-epuise-avant-les-renouvelables.php> [valide le 31/05/18]

**AIR LIQUIDE :**

*Air Liquide, acteur majeur du projet « Power to Hydrogen » en Europe.* 26/02/2016.  
<https://www.airliquide.com/fr/media/air-liquide-acteur-majeur-du-plus-grand-projet-power-hydrogen-europe>  
[valide le : 29/05/2018].

Applications de l'hydrogène. In : Site de Air Liquide. [en ligne].  
<https://energies.airliquide.com/fr/mediatheque-planete-hydrogene/applications-lhydrogene> [valide le 09/04/2018].

Comment stocker l'hydrogène.  
<https://energies.airliquide.com/fr/mediatheque-planete-hydrogene/comment-stocker-lhydrogene> [valide le 06/06/18].

Distribution du verre - Verre plat "Float Glass" In : Site de Air Liquide. [en ligne].  
<https://industrie.airliquide.fr/verre/distribution-du-verre/verre-plat-float-glass> [valide le 11/05/18].

L'énergie hydrogène pour l'aéronautique.  
<https://energies.airliquide.com/fr/transport-propre-transport-passagers/lenergie-hydrogene-laeronautique>  
[valide le 06/06/18].

Gas POX - oxydation partielle du gaz naturel.  
<https://www.engineering-airliquide.com/fr/gas-pox-oxydation-partielle-du-gaz-naturel> [valide le 25/04/2018].

Produire l'hydrogène - À partir de composés organiques.  
<https://energies.airliquide.com/fr/mediatheque-planete-hydrogene/comment-produire-lhydrogene> [valide le 25/04/2018].

Reformage du méthane à la vapeur - production d'hydrogène.  
<https://www.engineering-airliquide.com/fr/reformage-du-methane-vapeur-production-dhydrogene>  
[valide le 25/04/2018].

Un peu d'hydrogène dans un monde de kérosène. In : *Cryoscope, le journal des technologies avancées d'Air Liquide*. N°59. Mars 2017.  
<http://www.cryoscope.airliquide.com/fr/collection/59/article/un-peu-dhydrogene-dans-un-monde-de-kerosene/> [valide le 06/06/18].

**ALLEAU Thierry.** Fiches 5.2.2., 5.2.3, 5.2.6. Memento de l'hydrogène [en ligne]. AFHYPAC, révisées en octobre 2014.  
[http://www.afhypac.org/documents/tout-savoir/fiche\\_5.2.2\\_pemfc\\_rev.oct2014\\_ta.pdf](http://www.afhypac.org/documents/tout-savoir/fiche_5.2.2_pemfc_rev.oct2014_ta.pdf)  
[http://www.afhypac.org/documents/tout-savoir/fiche\\_5.2.3\\_afc\\_rev.oct2014\\_ta.pdf](http://www.afhypac.org/documents/tout-savoir/fiche_5.2.3_afc_rev.oct2014_ta.pdf)  
[http://www.afhypac.org/documents/tout-savoir/fiche\\_5.2.6\\_sofc\\_rev.oct2014\\_ta.pdf](http://www.afhypac.org/documents/tout-savoir/fiche_5.2.6_sofc_rev.oct2014_ta.pdf)  
[valides le 31/05/18].

**ALLEAU Thierry, LAMY Claude, MALBRUNOT Pierre.** Fiche 5.2.1 : Les PAC. Memento de l'hydrogène [en ligne]. AFHYPAC, révisée en février 2018.  
<http://www.afhypac.org/documents/tout-savoir/Fiche%205.2.1%20-%20Les%20PAC%20-%20rev%20f%C3%A9vrier%202018%20ThA.pdf> [valide le 31/05/18].

**ALTHYTUDE.** Enseignements de l'opération.  
<http://www.althytude.info/fr/althytude/enseignements-de-loperation/> [valide le 06/06/18].

**ARIA.** Accidentologie de l'hydrogène.  
[https://www.aria.developpement-durable.gouv.fr/wp-content/files\\_mf/1373986645SYHydrogene2008.pdf](https://www.aria.developpement-durable.gouv.fr/wp-content/files_mf/1373986645SYHydrogene2008.pdf)  
[valide le 31/05/18].

**ARIANESPACE.** Brochure Ariane 5. [brochure, en ligne]. Septembre 2015.  
[http://www.arianespace.com/wp-content/uploads/2015/10/Ariane5\\_Brochure\\_Nov2016.pdf](http://www.arianespace.com/wp-content/uploads/2015/10/Ariane5_Brochure_Nov2016.pdf) [valide le 10/04/18].

**ATAWEY.** Des solutions énergétiques décentralisées, propres et innovantes.  
<http://atawey.com/fr/produit.html> [valide le 05/06/18].

**AUBIN Dominique.** Un projet d'usine d'hydrogène « vert » à 450 millions en Normandie. *LesEchos.fr*. 07/06/2017. [https://www.lesechos.fr/07/06/2017/lesechos.fr/030371861578\\_un-projet-d-usine-d-hydrogene---vert---a-450-millions-en-normandie.htm](https://www.lesechos.fr/07/06/2017/lesechos.fr/030371861578_un-projet-d-usine-d-hydrogene---vert---a-450-millions-en-normandie.htm) . [valide le : 29/05/2018].

**AUTOMOBILE PROPRE.** *Toyota Mirai.* <http://www.automobile-propre.com/voitures/toyota-mirai/>. [valide le : 03/6/2018].

**BOREL Ines.** L'hydrogène dans le mix énergétique français en 2050 ? 06/04/18. In : *Techniques de l'ingénieur*. <https://www-techniques-ingenieur-fr.ezproxy.normandie-univ.fr/actualite/articles/lhydrogene-ancre-dans-le-mix-energetique-en-2050-53726/> [valide le 06/06/18].

**BOUDET Nicolas, MARION Pierre, ROY-AUBERGER Magalie.** Gazéification du charbon. [en ligne] *Techniques de l'Ingénieur*. 101/02/2016.  
<https://www-techniques-ingenieur-fr.ezproxy.normandie-univ.fr/res/pdf/encyclopedia/42329210-j5200.pdf> [valide le 05/06/18].

**BROUSTE Nicolas.** *Toyota acquiert 20 chariots élévateurs à hydrogène.* 21/03/2018.  
<https://www.flotauto.com/toyota-chariot-pile-hydrogene-20180321.html> [valide le : 06/06/2018].

**BRUN kevin.** L'hydrogène solide, une révolution est en cours dans la production d'énergie. 02/11/16. In : Moovely. <https://moovely.fr/hydrogene-solide-solution-stockage-energetique-avenir/> [valide le 06/06/18].

**CADENT.** Decarbonisation of gas distribution networks\_Liverpool-Manchester Hydrogen Clusters project. <https://cadentgas.com/about-us/innovation/projects/liverpool-manchester-hydrogen-cluster> [valide le 05/06/18].

**CAPDEVILA Didier.** « Ariane 5 » et « Les piles à combustible ». In : Capcom Espace [en ligne].  
[https://www.capcomespace.net/dossiers/espace\\_europeen/ariane/ariane5/caracteristiques.htm](https://www.capcomespace.net/dossiers/espace_europeen/ariane/ariane5/caracteristiques.htm)  
[https://capcomespace.net/dossiers/espace\\_US/gemini/vaisseau/pile\\_combustible.htm](https://capcomespace.net/dossiers/espace_US/gemini/vaisseau/pile_combustible.htm)  
[valides le 09/04/18].

**CEA.** *Modes de production du dihydrogène.* Publié le 1er décembre 2013  
<http://www.cea.fr/comprendre/Pages/energies/renouvelables/hydrogene.aspx?Type=Chapitre&numero=3> . [valide le 25/04/2018 ].

**Centre de Développement des Energies Renouvelables (CDER),** Le projet éolien-hydrogène d'Utsira, Bulletin des énergies renouvelables, n°8 décembre 2005.  
[http://www.cder.dz/vlib/bulletin/pdf/bulletin\\_008\\_14.pdf](http://www.cder.dz/vlib/bulletin/pdf/bulletin_008_14.pdf) [valide le 05/04/2018]

**CDER.** Agathos S., Belhamel S., Chader S., Hacene H. . Etudes des procédés de production biologiques de l'hydrogène. *Revue des Energies Renouvelables* Vol.10 n°4. 2007.  
[https://www.cder.dz/download/Art10-4\\_5.pdf](https://www.cder.dz/download/Art10-4_5.pdf) [valide le 4/05/2018].

**CHIC.** <http://chic-project.eu/> . [valide le : 03/6/2018].

**CNR, Frédéric STORCK.** *Quelles perspectives pour le Power-to-Gas et le stockage d'hydrogène?* 08/10/2015. [http://atee.fr/sites/default/files/j2\\_53\\_-\\_frederic\\_storck\\_cnr.pdf](http://atee.fr/sites/default/files/j2_53_-_frederic_storck_cnr.pdf). [valide le : 29/04/2018].

**CNRS.** *Vers une production massive et économique d'hydrogène.* 08/04/2009.  
<http://www2.cnrs.fr/presse/communiqu/1570.html>. [valide le : 12/04/2018].

**CDE.** L'hydrogène est plus dangereux que les carburants traditionnels. 01/08/11.  
<https://www.connaissancedesenergies.org/l-hydrogene-est-plus-dangereux-que-les-carburants-traditionnels>  
[valide le 31/05/2018].

**COURNAC Laurent, LEGRAND Jack, PRUVOST Jérémy.** *Production d'hydrogène par les micro-organismes photosynthétiques.* Techniques de l'Ingénieur. 10/05/2012.  
<https://www-techniques-ingenieur-fr.ezproxy.normandie-univ.fr/base-documentaire/procedes-chimie-bio-agro-th2/ressources-marines-et-biotechnologies-bleues-42834210/production-d-hydrogene-par-les-micro-organismes-photosynthetiques-bio3352/> [valide le 04/05/2018].

**CRE, Smart grids.** Dossier : l'hydrogène, vecteur pour la production de gaz vert. Page 3.  
<http://www.smartgrids-cre.fr/index.php?p=hydrogene-production-gaz-vert> [valide le 06/06/18].

**DARKRIM-LAMARI Farida, DICKO Moussa, MALBRUNOT Pierre.** *Combustible hydrogène - Production.* [en ligne]. Techniques de l'Ingénieur. 01/02/2016.  
<https://www-techniques-ingenieur-fr.ezproxy.normandie-univ.fr/base-documentaire/procedes-chimie-bio-agro-th2/chimie-verte-et-nouvelle-gestion-de-l-energie-42494210/combustible-hydrogene-be8565/> [valide le 24/04/2018].

**DARKRIM-LAMARI Farida, MALBRUNOT Pierre.** Combustible hydrogène – Utilisation. [en ligne]. *Techniques de l'ingénieur.* 10/10/2013.  
<https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/procedes-chimie-bio-agro-th2/chimie-verte-et-nouvelle-gestion-de-l-energie-42494210/combustible-hydrogene-be8566/> [valide le 10/04/18].

**DEMEULE Mathieu.** *Toyota va tester un camion à hydrogène.* 24/04/2017.  
<https://news.autoplus.fr/Toyota/Toyota-Hydrogene-Los-Angeles-Camion-Project-Portal-1515707.html>. [valide le : 03/6/2018].

**DESJARDINS Pierre.** BMW Hydrogen 7 : pas si propre que ça . *Caradisiac.com.* 21/11/2006.  
<https://www.caradisiac.com/BMW-Hydrogen-7-pas-si-propre-que-ca-194.htm>. [valide le : 03/6/2018].

**DOCHE Audric.** Le prototype de course Green GT H2 : l'hydrogène au service de la performance. *Caradisiac.com.* 30/01/2012.  
<http://www.caradisiac.com/Green-GT-H2-l-hydrogene-au-service-de-la-performance-75832.htm>. [valide le : 3/6/2018].

**EDF.** La Réunion teste l'hydrogène pour stocker l'énergie solaire.  
<https://www.edf.fr/edf/accueil-magazine/la-reunion-teste-l-hydrogene-pour-stocker-l-energie-solaire> [valide le 30/03/2018].

**EMEC.** Blog: Have your say on Orkney's Hydrogen Strategy. 08/12/2015.  
<http://www.emec.org.uk/blog-orkney-hydrogen-strategy/>. [valide le 30/05/2018].

**ENERGY OBSERVER.** *Les taxis Hype : la mobilité hydrogène en plein cœur de Paris.*  
<http://www.energy-observer.org/actu/fr/les-taxis-hype-la-mobilite-hydrogene-pour-tous-en-plein-coeur-de-paris/>. [valide le : 03/6/2018].

**ENGIE.** Le projet de démonstration GRHYD.  
<https://www.engie.com/innovation-transition-energetique/pilotage-digital-efficacite-energetique/power-to-gas/projet-demonstration-grhyd/> [valide le 06/06/18].

**FLORES Javier.** El tranvía de hidrógeno que funcionará en 2012. *Muy Interesante* [en ligne]. 2011.  
<https://www.muyinteresante.es/innovacion/articulo/el-tranvia-de-hidrogeno-que-funcionara-en-2012> [valide le 12/04/18].

**Fondation de l'entreprise d'ALCEN.** Gazéification. *Connaissance des Energies.* 11/07/2011.  
<https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/gazeification>. [valide 05/06/18].

**FONTAINE Séverine.** La Poste va tester des vélos à hydrogène. *L'Automobile & L'Entreprise*. [en ligne]. 06/022016. <http://www.automobile-entreprise.com/La-Poste-va-tester-des-velos-a.4763> [valide le 11/04/18].

**FONTECAVE Marc.** L'hydrogène: une énergie propre pour demain ?, *Pour la Science*, n°69 octobre 2010. <https://www.pourlascience.fr/sd/environnement/dossier-pour-la-science-69-347.php> [valide le 30/03/2018].

**FOUCHE Gwladys.** 'In 50 years' time no one will be using oil any more', *The Guardian*, 16/06/2005. <https://www.theguardian.com/science/2005/jun/16/environment.society1> [valide le 30/03/2018].

**FUEL CELLS WORKS.** *Plug Power completes formulation of Hypulsion JV with Axane*. Mars 2012. <https://fuelcellsworks.com/archives/2012/03/15/plug-power-completes-formulation-of-hypulsion-jv-with-axane/> [valide le : 06/06/2018].

**GAMBERINI Guilietta.** La France a son usine de production d'électrolyseurs. *La Tribune*. 28/06/2016. <https://www.latribune.fr/entreprises-finance/industrie/energie-environnement/hydrogene-la-france-a-son-usine-de-production-d-electrolyseurs-582002.html>. [valide le : 17/05/2018].

**GIROUDIERE Fabrice, LE GALL André.** *Production des gaz de synthèses par vaporeformage*. [en ligne]. Techniques de l'Ingénieur. 01/02/2016. <https://www-techniques-ingenieur-fr.ezproxy.normandie-univ.fr/base-documentaire/procedes-chimie-bio-agro-th/2/procedes-industriels-de-base-en-chimie-et-petrochimie-42329210/production-des-gaz-de-synthese-par-vaporemage-j5480/> [valide le 24/04/2018].

**GONDOR Germain.** Pour le stockage de l'hydrogène : Analyse thermodynamique de la formation d'hydrures métalliques et optimisation du remplissage d'un réservoir. Université de Franche-Comté, 2008. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00782271/document> [valide le 06/06/18].

**GOUT Didier.** Les chariots élévateurs s'essaient à la pile à combustible. *Les Echos*. 18/01/2006. [https://www.lesechos.fr/18/01/2006/LesEchos/19586-175-ECH\\_les-chariots-eleveurs-s-essaient-a-la-pile-a-combustible.htm](https://www.lesechos.fr/18/01/2006/LesEchos/19586-175-ECH_les-chariots-eleveurs-s-essaient-a-la-pile-a-combustible.htm) [valide le 05/06/18].

**GRDF.** Inédit: la chaudière du futur débarque en France. 27/11/2014. <https://www.grdf.fr/actualites/chaudiere-pile-combustible-epilog> [valide le 30/03/2018].

**GRHYD.** Dossier de presse du projet GRHYD. <https://www.engie.com/wp-content/uploads/2014/01/dossier-de-presse-gestion-des-reseaux-par-injection-dhydrogene-pour-decarboner-les-energies-grhyd-janvier-2014.pdf> [valide le 06/06/18].

**H2BUS FRANCE.** *Les Projets*. <https://www.h2bus-france.fr/les-projets/> . [valide le : 03/6/2018].

**HAAS Jacques.** La production d'hydrogène plus abordable grâce à l'énergie solaire. 02/08/2013. *Futura-Sciences*. <https://www.futura-sciences.com/sciences/actualites/chimie-production-hydrogene-plus-abordable-grace-energie-solaire-48112/> . [valide le :24/04/2018].

**HAMON Grégoire.** Camion à hydrogène : Nikola appuie sur l'accélérateur. *Actu-Transport-Logistique.fr*. 06/02/2018. <https://www.actu-transport-logistique.fr/routier/camion-a-hydrogene-nikola-appuie-sur-lacceleateur-455293.php> . [valide le : 03/6/2018].

**HOPPESTEYN Peter, VAN DEN BEMT Jan.** "What are the applications of Combustion of Coke Oven Gas ?". Combustion file No 241. *IFRF Online Combustion Handbook*. 08/09/2003.

**HYCARUS.** Project website of HYCARUS "HYdrogen Cells for AiRborne Usage". <http://hycarus.eu/> [valide le 06/06/18].

**JUNGHEINRICH.** Des chariots avec pile à hydrogène pour Prélcentre. Avril 2015. <https://www.jungheinrich.fr/entreprise/newsletters/newsletters-2015/newsletteravril2015/pile-hydrogene/> [valide le 05/06/18].

**LEFERVRE Caroline.** <https://www.unamur.be/sciences/enligne/transition/biologie/Fichesderevision/revision2%20fonctionnement/atp.htm> [valide le 02/06/2018].

**LENNTECH.** Propriétés chimiques-Effets de l'hydrogène sur la santé-Ettes de l'hydrogène sur l'environnement. <https://www.lenntech.fr/data-perio/h.htm> [valide le 31/05/2018].

**MAIRIE DE FORBACH.** Fin de l'expérimentation des piles à combustible, septembre 2016. [http://www.mairie-forbach.fr/2016\\_fin\\_experimentation\\_piles.html](http://www.mairie-forbach.fr/2016_fin_experimentation_piles.html) [valide le 30 mars 2018].

**MAZAR Alexandra.** Le premier tramway à hydrogène voit le jour en Chine. In : *France Diplomatie* [en ligne]. 18/05/2016. <https://www.diplomatie.gouv.fr/fr/politique-etrangere-de-la-france/diplomatie-scientifique/veille-scientifique-et-technologique/chine/article/le-premier-tramway-a-hydrogene-voit-le-jour-en-chine> [valide le 12/04/18].

**MAZUCCOTELLI Stéphane.** Chaudières à pile à combustible : Lyon s'inspire de Forbach. *Le Républicain Lorrain*. 11/01/2017. <https://www.republicain-lorrain.fr/edition-de-forbach/2017/01/10/chaudieres-a-pile-a-combustible-lyon-s-inspire-de-forbach> [valide le 30/03/2018].

**MEILLAUD Laurent.** Toyota teste un générateur associant la PAC et une turbine à gaz. In : H2 Today. [en ligne]. 26/04/2017. <https://hydrogentoday.info/news/2724> [valide le 31/05/18].

**MTATERRE.** *Comment ça marche la biomasse ?*. Mis à jour en octobre 2017. <http://www.mtaterre.fr/dossiers/comment-ca-marche-la-biomasse/la-biomasse-cest-quoi> [valide le 31/05/2018].

**MUREAU Quentin.** La pile à combustible. In : Ecosources.info. <https://www.ecosources.info/dossiers/439-la-pile-a-combustible> [valide le 31/05/18].

**NOWAWKOSKA Milena.** *Conversion thermique des goudrons provenant de la gazéification de la biomasse.* Université de Lorraine. Mai 2014. [http://docnum.univ-lorraine.fr/public/DDOC\\_T\\_2014\\_0092\\_NOWAKOWSKA.pdf](http://docnum.univ-lorraine.fr/public/DDOC_T_2014_0092_NOWAKOWSKA.pdf) [valide le 31/05/2018].

**NUNO BENTO.** La transition vers une économie de l'hydrogène : infrastructures et changement technique. Page 20. 15/03/2015. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00463857/document> [valide le 31/05/18].

**OOREKA.** Chaudière à hydrogène. <https://chaudiere.ooreka.fr/astuce/voir/636423/chaudiere-a-hydrogene> [valide le 30/03/2018].

**PASSEBON Philippe.** Mc Phy industrialise la production et le stockage d'hydrogène décarboné. Dossier : Mobilité, quand les transports font le plein d'hydrogène. 01/10/13. In : *Site de Industrie et Technologies*. <https://www.industrie-techno.com/mc-phy-industrialise-la-production-et-le-stockage-d-hydrogene-decarbone.25219> [valide le 06/06/18].

**PESSINA Laure-Anne.** *Produire de l'hydrogène bon marché par action simplifiée.* 27/04/2015. <https://actu.epfl.ch/news/produire-de-l-hydrogene-bon-marche-par-electrolyse/> [valide le : 18/03/2018].

**PLANETE ENERGIES.** Les multiples utilisation de l'hydrogène. [en ligne]. 02/10/2014. <https://www.planete-energies.com/fr/medias/decryptages/les-multiples-utilisations-de-l-hydrogene> [valide le 11/05/18].

**PLANETOSCOPE.** Marchandises transportées par voie maritime dans le monde. <https://www.planetoscope.com/Mobilite/1835-marchandises-transportees-par-voie-maritime-dans-le-monde.html> [valide le 06/06/18].

**PELLOLI Matthieu.** Alstom : le train à hydrogène sur les rails. *Le Parisien* [en ligne]. 13/11/2017. <http://www.leparisien.fr/economie/alstom-le-train-a-hydrogene-sur-les-rails-13-11-2017-7389033.php> [valide le 12/04/18].

**DE RANGO Patricia.** Le stockage solide de l'hydrogène au service des énergies renouvelables. [http://www.cnrs.fr/publications/imagesdelaphysique/couv-PDF/IdP2011/13\\_De\\_Rango.pdf](http://www.cnrs.fr/publications/imagesdelaphysique/couv-PDF/IdP2011/13_De_Rango.pdf) [valide le 06/06/18].

**REGION NORMANDIE.** *Eashymob*. [en ligne]. <http://eashymob.normandie.fr/fr/mobilite-hydrogene/lhydrogene> [valide le 11/05/18].

**SAINT GOBAIN.** Document de référence 2017. sections 2 et 4. [en ligne]. [https://www.saint-gobain.com/sites/sgcom.master/files/saint-gobain\\_document\\_de\\_reference\\_2017\\_vf.pdf](https://www.saint-gobain.com/sites/sgcom.master/files/saint-gobain_document_de_reference_2017_vf.pdf) [valide le 11/05/18].

**SCHULZ Philippe.** Production d'hydrogène par électrolyse de l'eau, Task-Force Hydrogène-Piles à Combustible, TotalFinaElf. *L'actualité chimique*. Janvier 2002. <https://www.lactualitechimique.org/Production-d-hydrogene-par-electrolyse-de-l-eau> [valide le 12/03/2018].

**STAC.** Aviation et pollution atmosphérique. 07/12/2017. <http://www.stac.aviation-civile.gouv.fr/fr/environnement/aviation-pollution-atmospherique> [valide le 06/06/18].

**STAHL R.** Page informative sur les zones atex. <https://zone-atex.fr/page/zones-atex.html> [valide le 31/05/2018].

**TARASCON Jean-Marie.** Filière hydrogène: de la production au stockage. 23/02/11. [https://www.college-de-france.fr/media/jean-marie-tarascon/UPL58650\\_hydrogenecollege.pdf](https://www.college-de-france.fr/media/jean-marie-tarascon/UPL58650_hydrogenecollege.pdf) [valide le 06/06/18].

**TECHNIQUES POUR L'INGENIEUR.** Un procédé innovant pour le stockage de l'hydrogène. 14/11/12. <https://www-techniques-ingenieur-fr.ezproxy.normandie-univ.fr/actualite/articles/un-procedede-innovant-pour-le-stockage-de-lhydrogene-7121/#reagir-article> [valide le 06/06/18].

**TOYOTA.** *La Toyota Mirai*. [https://www.toyota.fr/new-cars/new-mirai/landing\\_json](https://www.toyota.fr/new-cars/new-mirai/landing_json). [valide le : 03/6/2018].

**VAN EECKHOUT Laetitia.** La pollution du transport maritime plus dangereuse que celle du transport automobile. *Le Monde* [en ligne]. 23/07/15. [https://www.lemonde.fr/planete/article/2015/07/22/la-pollution-du-transport-maritime-plus-dangereuse-que-celle-du-transport-automobile\\_4694015\\_3244.html](https://www.lemonde.fr/planete/article/2015/07/22/la-pollution-du-transport-maritime-plus-dangereuse-que-celle-du-transport-automobile_4694015_3244.html) [valide le 06/06/18].

## Vidéos

**HOSTALERY Isabelle.** C'est Pas Sorcier. HYDROGENE : combustible du futur ? [vidéo, durée : 26'02"]. 2007, France 3. <https://www.youtube.com/watch?v=7Bn9Gp5kuyI> [valide le 09/04/2018].

**LE MOBILISTE.** Alpha 2.0, le premier vélo à hydrogène au monde ! [vidéo en ligne, durée : 3'10"]. Youtube, 14/04/2017. <https://www.youtube.com/watch?v=trY38XA6Vek> [valide le 11/04/18].

**MICHEL Fabrice.** Tout savoir sur le moteur spatial Vulcain. 2014. In : SAFRAN.[vidéo, durée : 5'42"]. <https://www.safran-group.com/fr/atom/7435> [valide le 09/04/2018].





## 7. Crédits d'illustrations

### Illustration de couverture:

**MAGNIN Véronique.** Des chercheurs grenoblois optimisent la photosynthèse artificielle pour produire l'hydrogène. *Place GRE'NET*. 21/04/2018.

<https://www.placegrenet.fr/2018/04/21/fil-info-des-chercheurs-grenoblois-ont-developpe-des-nanocristaux-capteurs-de-lumiere-pour-produire-du-carburant-hydrogene/186899> . [valide le 14/06/2018].

### Reformage:

**BLUNIER Benjamin** et **MIRAOUI Abdellatif**, *20 questions sur la pile à combustible – l'hydrogène : vecteur énergétique de demain ?* p 68. éditions TECHNIP. 2009

**DARKRIM-LAMARI Farida, MALBRUNOT Pierre.** Combustible hydrogène – Utilisation. [en ligne]. *Techniques de l'ingénieur*. 10/10/2013.

<https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/procedes-chimie-bio-agro-th2/chimie-verte-et-nouvelle-gestion-de-l-energie-42494210/combustible-hydrogene-be8566/> [valide le 10/04/18].

### Gazéification :

**WIKIPEDIA.** *Gazogène*. <https://fr.wikipedia.org/wiki/Gazog%C3%A8ne>. [valide le 21 mars 2018]

**S3D ingénierie.** *Principes de la gazéification*. [schéma]. <http://www.gazeification.info/> [valide le 21 mars 2018].

**COGEBIO.** *La gazéification: Transformation de la biomasse solide en gaz*. [schéma]. <http://cogebio.com/gazeification/> [valide le 17 avril 2018].

**Fondation de l'entreprise d'ALCEN.** *Gazéification. Connaissance des Energies*. 11/07/2011. <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/gazeification>. [valide 05/06/18].

### Electrolyse :

**BEGUIN Claude.** *Une chronique de l'hydrogène, Histoire des méthodes de production et des applications*. PRESSES POLYTECHNIQUES ET UNIVERSITAIRES ROMANDES. 2016.

**HAAS Jacques.** La production d'hydrogène plus abordable grâce à l'énergie solaire. 02/08/2013. *Futura-Sciences*.

<https://www.futura-sciences.com/sciences/actualites/chimie-production-hydrogene-plus-abordable-grace-energie-solaire-48112/> [valide le :24/04/2018].

**AFHYPAC.** *Production d'hydrogène par électrolyse de l'eau*. Janvier 2017. <http://www.afhypac.org/documents/tout-savoir/Fiche%203.2.1%20-%20Electrolyse%20de%20l%27eau%20revi-anv2017%20ThA.pdf> [valide le : 22/02/2018].

### Techniques en cours de développement :

**TARASCON Jean-Marie.** Filière hydrogène: de la production au stockage. 23/02/11. [https://www.college-de-france.fr/media/jean-marie-tarascon/UPL58650\\_hydrogenecollege.pdf](https://www.college-de-france.fr/media/jean-marie-tarascon/UPL58650_hydrogenecollege.pdf) [valide le 06/06/18].

**Fondation de l'entreprise d'ALCEN.** *Solaire thermodynamique à concentration. Connaissance des*

Energies.

05/02/2016. <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/solaire-thermodynamique-concentration>. [valide le 14/06/2018].

### Stockage :

**DURVILLE, Jean-Louis et collaborateurs.** Filière hydrogène énergie. Septembre 2015. <https://www.actu-environnement.com/media/pdf/news-26748-rapport-cgedd-cgeiet-hydrogene.pdf> [valide le 06/06/18].

**MAHYTEC.** Réservoirs. <http://www.mahytec.com/fr/nos-solutions/> [valide le 06/06/18].

**POURCELLY Gérald.** Stockage de l'hydrogène, Piles à combustible. Page 3. 27/02/13. [http://www2.cnrs.fr/sites/communiqu/fichier/gp\\_presentation.pdf](http://www2.cnrs.fr/sites/communiqu/fichier/gp_presentation.pdf) [valide le 06/06/18].

**TARASCON Jean-Marie.** Filière hydrogène: de la production au stockage. 23/02/11. [https://www.college-de-france.fr/media/jean-marie-tarascon/UPL58650\\_hydrogenecollege.pdf](https://www.college-de-france.fr/media/jean-marie-tarascon/UPL58650_hydrogenecollege.pdf) [valide le 06/06/18].

### Sites intégrés :

**ATAWEY.** Des solutions énergétiques décentralisées, propres et innovantes. [schéma] <http://atawey.com/fr/produit.html> [valide le 05/06/18].

### Réseaux de gaz naturel :

**GRHYD.** Présentation. [schéma]. <http://grhyd.fr/presentation/> [valide le 06/06/18].

**GRT GAZ.** Le projet Jupiter 1000. [schéma]. <https://www.jupiter1000.eu/projet> [valide le 06/06/18].

### Utilisations :

**AFHYPAC.** Bus MAN 1996 [photographie]. In : Les bus à hydrogène. Fiche 9.2. "Memento de l'hydrogène. <http://www.afhypac.org/documents/tout-savoir/Fiche%209.2%20-%20Les%20bus%20H2%20rev.sept2016%20Th.pdf> [valide le 03/06/2018].

**ALVAREZ FERNANDEZ Omar.** El prototipo del nuevo tranvía de hidrógeno de Feve. 2011. [photographie]. In : *Via Libre*. <https://www.vialibre-ffe.com/noticias.asp?not=7711> [valide le 12/04/18].

**ALSTOM.** Coradia iLint. 2016. [plan]. In : Coradia iLint Product sheet. <http://www.alstom.com/Global/Transport/Resources/Documents/brochure2014/Coradia%20iLint%20-%20Product%20sheet%20-%20English.pdf?epslanguage=fr-FR> [valide le 12/04/18].

**BIDON Jérémy.** Energy Observer. [photographie]. In: Site de Air Liquide. <https://www.airliquide.com/fr/magazine/energy-observer-premier-navire-hydrogene-autour-monde>

**CONNAISSANCE DES ENERGIES (CDE).** Fonctionnement d'une pile PEMFC. [schéma]. In : Pile à combustible. 16/01/2014. <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/pile-a-combustible> [valide le 31/05/18].

**CDE.** Les chiffres clés de l'énergie dans le monde [schéma]. 26/09/17. <https://www.connaissancedesenergies.org/les-chiffres-cles-de-lenergie-dans-le-monde-170926> [valide le 31/05/18].

**EASHyMob.** Carte de déploiements des stations de ravitaillements à hydrogène.

<http://eashymob.normandie.fr/fr/stations-recharge-hydrogene-normandie> [valide le 03/06/2018].

**Office of Electricity Delivery & Energy Reliability.** Utsitra Wind Power & Hydrogen Plant. [photographie]. <https://www.energystorageexchange.org/projects/1488>. [valide le 05/04/2018].

**TOYOTA.** Toyota Mirai. <https://www.toyota.fr/new-cars/new-mirai/landing.json> [valide le 03/06/2018].

**WU Kechao.** Le premier tramway au monde fonctionnant à l'hydrogène. 26 octobre 2017. [photographie]. In : China News. <http://www.chinanews.com/m/cj/2017/10-26/8361277.shtml> [valide le 12/04/18].

### **Risques :**

**CEA.** Analyse des risques d'une fuite d'hydrogène. In : Rapport Filière Hydrogène-énergie. Page 23. <https://www.actu-environnement.com/media/pdf/news-26748-rapport-cgedd-cgeiet-hydrogene.pdf> [valide le 06/06/18].

**INRS.** Pictogramme réglementaire dans les zones ATEX. <http://www.inrs.fr/risques/explosion/zonage-marquage-materiel-atex.html> [valide 06/06/18].

**GAZ DETECT.** <https://www.gazdetect.com/wp-content/uploads/2014/06/SATEX-w1.jpg> [valide le 06/06/18].