

## *Chapitre 7*

### *L'hydrogène et le stockage de l'énergie*

## ***Introduction***

Les énergies renouvelables se caractérisent généralement par un rendement relativement faible, un coût important et surtout une intermittence de la ressource. Des systèmes utilisant l'énergie solaire, éolienne, hydraulique ainsi que la biomasse fonctionnent dans de nombreuses régions du monde. Ils deviennent de plus en plus efficaces et rentables. Par ailleurs, l'utilisation des ressources renouvelables, en dehors des grands hydrauliques, reste généralement limitée aux sites isolés où le coût des systèmes renouvelables devient compétitif par rapport aux autres moyens de production d'électricité du fait de l'acheminement très coûteux de l'électricité.

Ainsi, ce développement est encore freiné par ces problèmes liés à leur nature répartie, à faible densité énergétique et à production irrégulière.

☞ *La problématique du stockage d'énergie...*

En plus des problèmes d'irrégularités des ressources renouvelables, un autre paramètre apparaît comme un réel handicap pour l'utilisation de ces sources, il s'agit du stockage d'énergie.

Pour la plupart des énergies renouvelables, le stockage se fait à court terme. En effet, dans le cas du photovoltaïque, le stockage d'énergie électrique dans des batteries ne peut durer que quelques heures ; quant à l'éolien, l'excès de vent pourra être emmagasiné sous forme de volant d'inertie, l'excès de l'énergie électrique pourra aussi être utilisé pour comprimer de l'air afin de l'utiliser en cas de faible vitesse de vent.

En période de faible consommation, l'énergie produite par l'éolienne pourra être utilisée dans la production d'hydrogène par électrolyse de l'eau par un électrolyseur qui pourra être à son tour stocké puis utilisé comme combustible dans une pile à combustible pour produire de l'électricité lorsque la demande est forte ou par manque de vent.

☞ *L'hydrogène est donc présenté comme un très bon candidat à cette fonction pour le futur, car sa capacité de stockage de 30000 Wh.kg<sup>-1</sup> est trois fois plus élevée que celle de l'essence et une utilisation bien maîtrisée ne présente que peu de risques, tout comme celle du gaz naturel,*

### ***1. L'hydrogène comme vecteur énergétique***

L'hydrogène représente le bon choix comme future source d'énergie non polluante pour de nombreuses raisons. En voici quelques-unes de ces raisons :

- L'hydrogène peut être produit à l'aide de plusieurs sources. Il est tout à fait renouvelable car l'élément de départ le plus abondant et le plus propre pour produire de l'hydrogène est l'eau.

- L'hydrogène peut être stocké à l'état gazeux, à l'état liquide, ou à l'état solide. Il peut aussi être stocké dans différentes substances chimiques telles que le méthanol, l'éthanol, ou les hydrures métalliques.
- Il peut être produit à partir d'électricité ou converti en électricité avec un bon rendement.
- Il peut être transporté et stocké avec autant de sécurité que les combustibles utilisés de nos jours.

Comparé à d'autre combustible, l'hydrogène est désormais un bon concurrent, le tableau suivant présente quelques éléments de comparaison.

Propriétés	Hydrogène	Methane	Methanol	Ethanol	Propane	Essence
Masse Moléculaire (g/mol)	2,016	16,043	32,04	46,06	44,1	~107
Densité (kg/m <sup>3</sup> ) à 20°C	0,08375	0,6682	791	789	1,865	751
Point d'ébullition (°C)	-252,8	-161,5	64	78,5	-42,1	27-225
Point d'éclair (°C)	<-253	-188	11	13	-104	-43
Limites d'inflammabilité dans l'air (% volume)	4,0 - 75,0	5,0 - 15,0	6,7 - 36,0	3,3 - 19	2,1 - 10,1	1,0 - 7,6
CO <sub>2</sub> produit par unité d'énergie	0	1	1,5			180
Température d'auto-inflammation dans l'air (°C)	585	540	385	423	490	230 - 480
Pouvoir calorifique supérieur (MJ/kg)	142	55,5	22,9	29,8	50,2	47,3
Pouvoir calorifique inférieur (MJ/kg)	120	50	20,1	27	46,3	44

### 1.1. La filière technologique de l'hydrogène

La filière hydrogène ou autrement dit, la production et les applications de ce vecteur énergétique très important est composé de plusieurs variantes, la figure 1 présente cette filière. Nous pouvons constater trois domaines d'applications. En effet, dans le domaine du transport, l'hydrogène peut être utilisé dans les moteurs à combustion interne et dans les moteurs électriques alimentés par des piles à combustible. Le secteur bâtiment bénéficie aussi de l'hydrogène vu qu'il existe des piles à hydrogène adaptées aux usages bâtiments commerciaux, résidentiels ou même tertiaires.

En industrie, l'hydrogène peut servir comme le vecteur énergétique de plusieurs applications telles que la cogénération par des piles à hydrogène, des turbines ou même des moteurs à combustion interne, son application dans des procédés de synthèse demeure aussi possible.

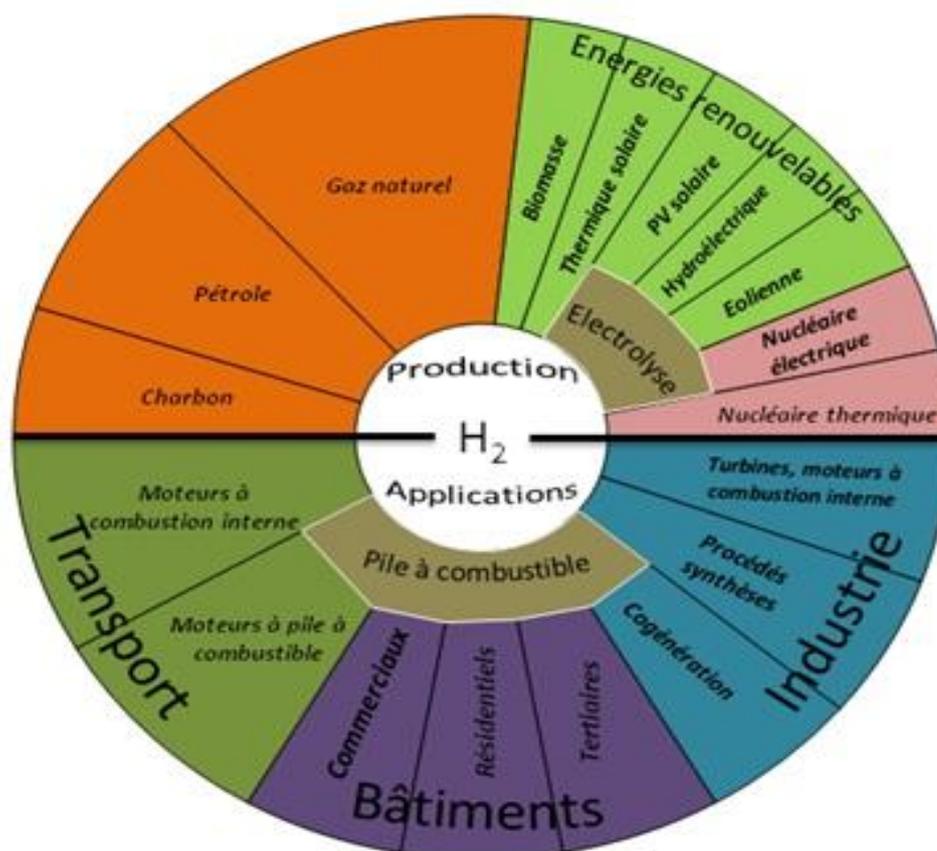


Figure 1. Filière technologique de l'hydrogène

## 1.2. La pile à combustible

Le développement de la filière hydrogène repose en grande partie sur la technologie de la pile à combustible (PàC). Son principe n'est pas nouveau, puisqu'il fut découvert dès 1839 par William R. Grove qui inventa la première pile à combustible. À l'époque, cet avocat anglais, chercheur amateur en électrochimie, constate qu'en recombinaison de l'hydrogène et de l'oxygène, il est possible de créer simultanément de l'eau, de la chaleur et de l'électricité et c'est ainsi que la pile à combustible est née. Cette pile à combustible qui est considérée comme un convertisseur électrochimique fonctionnant selon le principe inverse de l'électrolyse de l'eau, peut être un des éléments de diversification des ressources énergétiques. De la micro PàC, qui ne produit que les quelques watts nécessaires à l'alimentation d'un téléphone mobile, à la pile capable de produire 1 MW pour fournir de l'électricité à un immeuble collectif, en passant par la pile destinée aux applications embarquées, dans le secteur des transports, il existe désormais toute une gamme de PàC.

Les piles à combustible constitueront l'un des éléments essentiels de la future économie de l'hydrogène, ils ont la capacité de subvenir à tous nos besoins en énergie tout en offrant un haut rendement et une technologie à très faible degré de pollution.

La pile à combustible à membrane polymère électrolytique (appelée aussi proton exchange membrane PEM), sujet de recherche de ma seconde tâche scientifique attribuée par la division, fournit une haute densité de puissance et un poids moindre, un coût raisonnable et un faible volume.

Une pile à combustible PEM comprend une électrode chargée négativement (anode) une électrode chargée positivement (cathode), et un électrolyte, (la membrane). L'hydrogène est introduit du côté de l'anode et l'oxygène est introduit du côté de la cathode. Les protons sont transportés de l'anode vers la cathode, à travers la membrane électrolytique et les électrons circulent par un circuit externe représenté par la charge, voir Figure (2). Une pile à combustible PEM typique comporte les réactions suivantes:

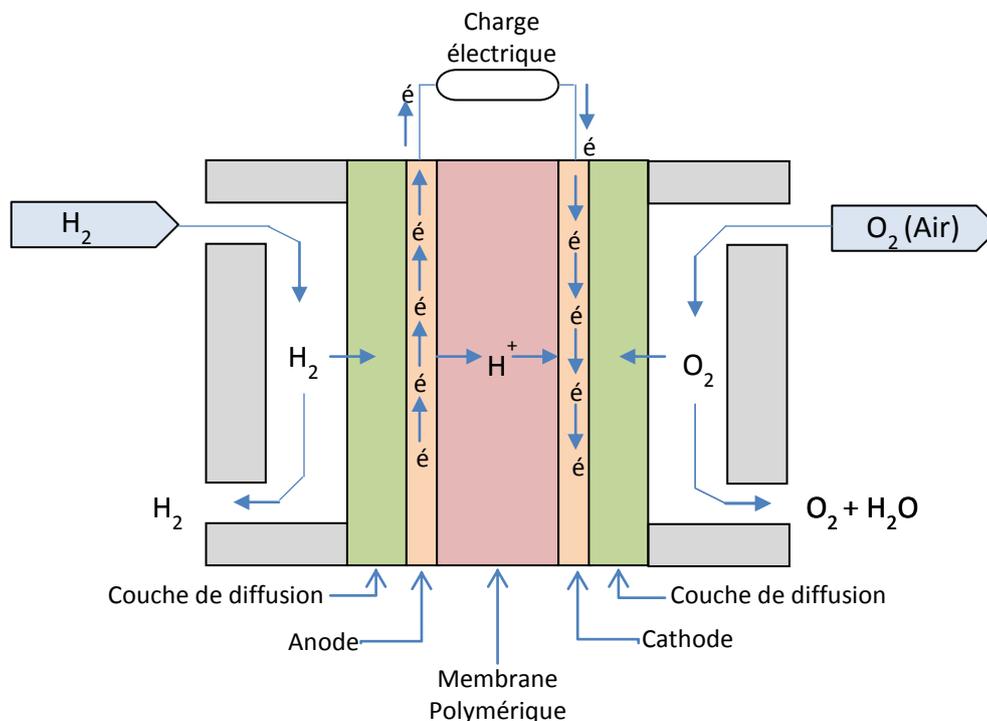
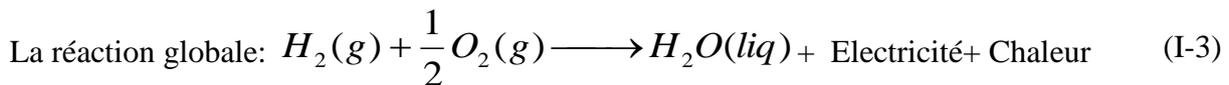
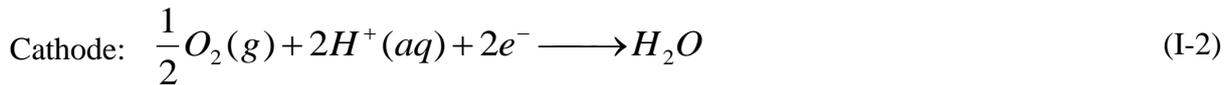
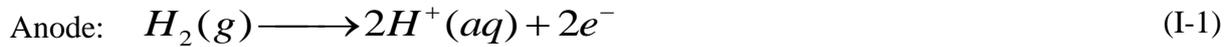


Figure 2. Schéma décrivant le principe d'une pile PEM

Ces piles travaillent à une température inférieure à  $100^\circ\text{C}$  pour un rendement de l'ordre de 50%. La faible température de fonctionnement leur confère une aptitude à démarrer relativement rapidement.

Ces piles sont développées pour alimenter en énergie des véhicules et des installations fixes de petite ou moyenne taille. La gamme de puissance des piles PEMFC se situe de quelques dizaines de watts à une dizaine de mégawatts.

## Caractéristiques de fonctionnement

Le tableau suivant résume les caractéristiques et les performances de la PEMFC :

Caractéristiques et Performances	
Température de fonctionnement	60 à 80 °C
Pression de fonctionnement	1 à 3 bars
Rendement électrique	40 à 50 %
Tension réelle	0,6 à 0,95 V
Densité de courant	Jusqu'à plusieurs A/cm <sup>2</sup>
Temps de démarrage	Pratiquement instantané
Temps de réponse à une variation rapide de demande	Très rapide
Durée de vie	1000 à 2000 heures (valeur en 2005) Jusqu'à 4000 heures [HFC Consulting Group] Des essais actuelles pour atteindre les 8000 heures.

## Avantages et inconvénients

Ces piles cumulent certains avantages:

- Temps de démarrage très rapide ;
- Temps de réponse très rapide ;
- Compacité ;
- Insensible au CO<sub>2</sub> ;
- L'électrolyte est solide. Il n'y a donc pas de risque de fuite de l'électrolyte ;
- La température de fonctionnement est faible ;
- La puissance massique est élevée, la densité de puissance peut atteindre 1kW/kg.

Elles présentent cependant certains inconvénients :

- Coût élevé de la membrane ;
- Les membranes doivent être impérativement maintenues en permanence dans un bon état d'hydratation pour favoriser le transport des protons. Dans le cas contraire ; il y a un risque de détérioration de la membrane ;
- Elles sont sensibles au monoxyde de carbone qui empoisonne les sites catalytiques.

## Vieillessement

Dans une pile PEMFC, les composantes sont soumises à un vieillissement chimique ou mécanique dont les principales causes sont :

- Dégradation de la membrane sous l'effet de la température ;
- Perte d'activité catalytique ;
- Hétérogénéité des matériaux utilisés ;
- Humidité de la membrane non parfaitement contrôlée.

## 2. Le stockage de l'énergie

Principales formes d'énergie renouvelables (sauf géothermie et marémotrice) sont stockées :

- A court terme : énergie hydraulique et éolienne
- A moyen terme : biomasse
- A long terme : combustibles fossiles

### 2.1. Nécessité de stocker l'énergie dans le contexte actuel

- Développement des énergies intermittentes
- Fluctuations des consommations
- Augmentation des productions décentralisées
- Nouvelles technologies de communication

### 2.2. Le stockage de l'énergie mécanique

#### *Stockage sous forme d'énergie potentielle*

- Barrage hydraulique et pompage de l'eau vers un barrage pendant les heures creuses. Rendement 90%. Permet le stockage de l'électricité
- Compression de l'air et stockage de l'air comprimé dans un dispositif géologique. Récupération par détente dans une turbine de l'air comprimé. (Rendement 40% qui peut être augmenté par récupération de la chaleur de compression ou en effectuant des compressions isothermes par l'intermédiaire d'un liquide)

#### *Stockage sous forme d'énergie cinétique*

Stockage par volant d'inertie (disque lourd) Pour accumuler l'énergie un moteur accélère le disque. L'énergie est récupérée en ralentissant le disque avec un frein/générateur d'électricité. Très utilisé pour régulariser la fourniture d'énergie dans les moteurs thermiques. Développement en cours dans les transports urbains « électriques »

### 2.3. Le stockage chimique et biologique

- Accumulateurs électrochimiques (batteries, piles). Utilisés à faible échelle. Ils sont chers, à durée de vie limitée et posent des problèmes de pollution en fin de vie.
- Supercondensateurs : condensateurs avec électrolyte conducteur ionique qui permet une haute densité d'énergie stockée et une restitution à haute puissance. En développement
- Carburants dont hydrogène sous forme gaz (grande diffusion à travers les matériaux), liquide (basses températures) ou solide(adsorption). Le vecteur hydrogène peut servir à stocker de l'électricité. Electrolyse pendant la phase de charge et pile à combustible pendant la phase de décharge
- Photosynthèse : Biomasse, biocarburants, huiles, graisses...

## 2.4. Le stockage thermique

- Stockage par chaleur sensible. Dans ce cas l'énergie stockée dépend essentiellement de la capacité thermique du matériau et de l'élévation de température. L'eau est un très bon matériau « stockeur »
- Stockage par chaleur latente. C'est le changement de phase du matériau qui permet le stockage de la chaleur latente. Le principal avantage est que les transformations se font à température quasi-constante (corps purs et mélanges). Le plus souvent on utilise la transition solide-liquide.

## 2.5 Récapitulatif du stockage d'énergie

Type	Energie stockée	Puissance	Temps de décharge	Rendement du cycle
Batterie au plomb	chimique	1 kW – 10 MW	Minutes - heures	60%
Batterie Li-ion	chimique	1kW – 100 kW	Minutes - heures	90%
Batterie à circulation	chimique	10 kW – 100 MW	Heures	75%
Pompage hydraulique	mécanique	10 MW – 1000 MW	Heures - jours	75%
Air comprimé Tech. avancée	mécanique	10 MW – 100 MW	Heures	70%
Hydrogène Electrolyse+pile à combustible	chimique	10 kW – 100 MW	Heures -jours	50%
Volant d'inertie	mécanique	1 kW – 1 MW	Secondes - minutes	90%

## 2.6. La densité de l'énergie stockée

Batterie au plomb	30 kWh/t (batterie complète)
Batterie Li-ion	200 kWh/t (batterie complète)
Batterie à circulation	33 kWh/t (produits chimiques)
Eau pompée à 300m de haut	1 kWh/t (d'eau)
Air comprimé à 100 bar	12 kWh/m <sup>3</sup> (volume du réservoir haute pression)
Volant d'inertie à 300m/s	12 kWh/t
Hydrogène stocké à 300 bars	900 kWh/m <sup>3</sup> (volume du réservoir haute pression)
Eau chauffée à 100°C	116 kWh/t
Refractaire chauffé à 1000°C	600 kWh/m <sup>3</sup> (volume du solide)