



### Site

Accueil  
Plan



### Partie 1 : Fonctionnement

Problématique

Introduction

Fonctionnement de la pile

Usage de la pile dans  
l'automobile : la PAC



### Partie 2 : Avantages

Introduction

Les avantages d'une telle  
énergie

Essai dans des conditions  
réelles



### Partie 3 : Inconvénients

Introduction

Production de l'Hydrogène

Stockage de l'Hydrogène

Coût de la pile à hydrogène

Conclusion



### Annexes

Interview

Prototypes

Lexique

Bibliographie



### Autre

Notes de versions

Plan du site >>> tpe09.free.fr > Partie 3 > La production de l'Hydrogène

## La Production de l'Hydrogène

Tout d'abord, l'Hydrogène n'est pas une source d'énergie primaire: il n'existe nulle part sur Terre à l'état isolé et nécessite donc d'être fabriqué.

Or, il est d'ores et déjà utilisé en grandes quantités, notamment dans l'industrie chimique (production de l'ammoniac, de méthanol...). Si on est aujourd'hui capable de le produire, en quoi cette production est-elle un enjeu pour la Pile à Hydrogène?

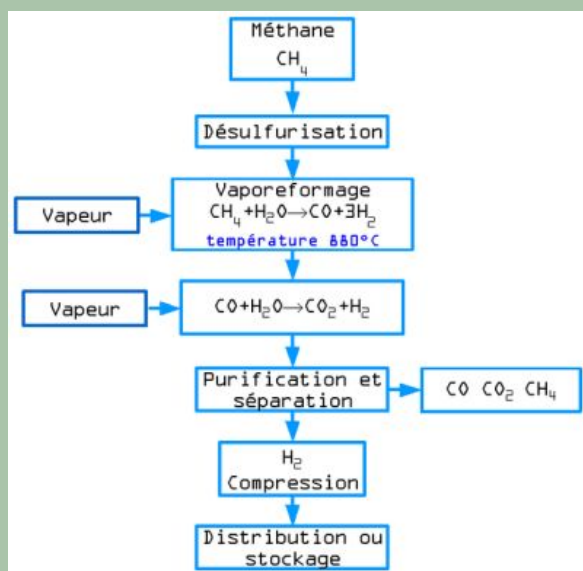
En réalité, il existe plusieurs moyens de produire l'hydrogène, à partir de nombreuses sources d'énergie.

Aujourd'hui, les sources d'énergie fossiles restent les plus utilisées (gaz naturel, charbon, essence, uranium). Cette dominance s'explique par des coûts inférieurs à ceux des autres procédés.

L'Hydrogène est ainsi produit selon plusieurs méthodes:

- des procédés de reformage comme le vaporeformage (le carburant réagit avec l'eau), l'oxydation partielle (le carburant réagit avec l'air) et le reformage autotherme (le carburant réagit avec l'eau et l'air).
- gazéification du charbon. C'est un procédé archaïque, mis au point vers 1780 suivant la réaction  $C + H_2O \rightarrow H_2 + CO$ . La gazéification consiste en un traitement thermochimique, qui convertit un solide carboné en un gaz combustible chargé en hydrogène et en monoxyde de carbone. Cette méthode n'est plus utilisée actuellement, sauf en Afrique du Sud ou en Chine.

### Le procédé dominant de la production d'hydrogène : le vaporeformage



La production actuelle d'hydrogène repose essentiellement sur le vapocraquage du gaz naturel ou vaporeformage.

Aujourd'hui, c'est le cas de 95% de l'Hydrogène produit. Le procédé le plus courant est le vaporéformage de Méthane:

On fait réagir le gaz naturel sur de la vapeur d'eau à une température de l'ordre de 900°C et à une pression de 20 à 30 bar, en présence d'un catalyseur au nickel. Après la réaction  $CH_4 + H_2O \rightarrow CO + 3H_2$ , on obtient un mélange de monoxyde de carbone et d'hydrogène. Le processus continue par la conversion du monoxyde de carbone en dioxyde de carbone  $CO_2$  et hydrogène additionnel, selon la réaction  $CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2$ . Au total, pour une molécule de  $CH_4$ , on obtient par ce procédé quatre molécules d'hydrogène. S'en suit une dernière étape de purification qui permet de récupérer de l'Hydrogène plus ou moins pur selon le procédé utilisé.

Le gaz naturel est la matière première principalement utilisée actuellement pour la production d'hydrogène. Mais d'autres produits peuvent être utilisés. Selon l'IFP, la part du gaz naturel est de 48%, celle des hydrocarbures de 30% et celle du charbon de 20%.

On peut également utiliser d'autres carburants comme le naphta pour produire de l'hydrogène.

### L'oxydation partielle

L'oxydation partielle d'hydrocarbures est la deuxième méthode utilisée pour produire de l'hydrogène, via la production de gaz de synthèse (mélange de monoxyde de carbone et d'hydrogène).

Cette méthode s'applique aux résidus pétroliers lourds ainsi qu'au charbon. Elle met en œuvre des températures très élevées (1200 à 1500°C), des pressions importantes (de 20 à 90 bar ou plus), de l'oxygène et de la vapeur d'eau.

Ces conditions techniques difficiles et coûteuses se justifient par le prix de la matière première peu élevé.

## Le reformage autotherme

Ce procédé est une combinaison des deux procédés précédents: le carburant est mélangé avec de l'air et de l'eau. Cela permet d'utiliser l'exothermicité (cf [lexique](#)) de l'oxydation partielle pour palier à l'endothermicité du vaporeformage et obtenir un réacteur "autotherme" (mélange eau, carburant et air), qui n'a pas besoin d'apport de chaleur. Au démarrage cependant, il est nécessaire d'en fournir: le réacteur est donc alimenté en carburant et en air (oxydation partielle), puis lorsque la température a atteint un niveau suffisamment élevé, le reformeur passe en fonctionnement autotherme.

À la sortie du reformeur, le mélange gazeux est composé d'hydrogène, d'eau, de monoxyde de carbone CO, de dioxyde de carbone, de méthane, de diazote (dans le cas d'oxydation partielle ou de reformage autotherme) et éventuellement de traces d'autres produits. Ce mélange ne peut servir à alimenter une pile de type PEMFC, car celle-ci est trop sensible au CO (qui doit être inférieur à 10 ppm): une purification est donc nécessaire. En cas de présence de soufre, une desulfuration a lieu avant la purification au CO. Dans le cas de traces de carburant ou d'autres produits d'oxydations, les dommages peuvent aller de baisse de la tension à des dommages irréversibles.

Cependant, l'une des principales revendications de l'hydrogène est d'être une alternative écologique au pétrole. Ainsi, ces méthodes se basant sur les énergies fossiles, et riches en gaz à effet de serre sont à exclure; en effet, l'aspect écologique que prône ses partisans n'est alors pas réellement justifié si les gaz à effets de serre économisés lors de son utilisation sont compensés par ceux rejetés lors de la production du carburant.

Des techniques exploitant les ressources renouvelables sont ainsi à privilégier:

- la production par électrolyse de l'eau.
- les procédés à partir de biomasse (gazéification, pyrolyse).
- les procédés futuristes comme la décomposition thermochimique de l'eau à haute température (800/1 000°C); la production par des microorganismes comme les micro algues qui sous l'effet de la lumière produisent de l'hydrogène; ou encore la production photoélectrochimique où la photolyse de l'eau permettrait de produire de l'hydrogène directement à partir de la lumière solaire.

## La production d'hydrogène à partir de la biomasse

La biomasse peut aussi servir à la production d'hydrogène. On produit d'abord du gaz de synthèse  $\text{CO} + \text{H}_2$ , puis de l'hydrogène grâce à la réaction de conversion eau-gaz ( $\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2$ ).

D'un point de vue environnemental, l'intérêt du recours à la biomasse plutôt qu'à un combustible fossile, est que le  $\text{CO}_2$  dégagé par la conversion eau-gaz est compensé par le  $\text{CO}_2$  qui a été absorbé lors de la photosynthèse durant la croissance des plantes utilisées. De même, la dépense énergétique nécessaire à la réalisation des deux réactions pourrait être effectuée en utilisant de la biomasse comme combustibles. D'où un bilan global qui pourrait être neutre en termes de gaz à effet de serre.

## Algues vertes et bactéries

Les algues seraient une autre possibilité pour produire de l'hydrogène. En effet, au cours de la photosynthèse, les plantes vertes dissocient l'eau en hydrogène et oxygène. L'hydrogène est combiné au  $\text{CO}_2$  pour construire des tissus végétaux tandis que l'oxygène est libéré dans l'atmosphère. On peut espérer que ce type de procédé pourra être techniquement au point d'ici 2 ans, et sur le marché d'ici 5 à 8 ans.

## Les cycles thermochimiques à haute température

Les cycles thermochimiques de synthèse d'hydrogène ont pour but de contourner l'impossibilité de produire de l'hydrogène par dissociation directe de l'eau à moins de 5000°C.

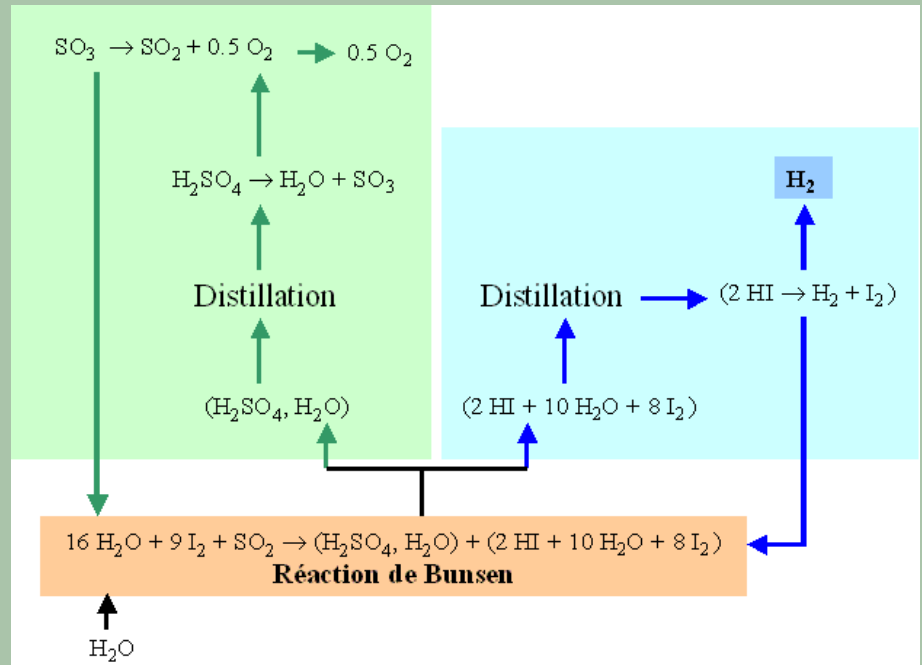
Beaucoup de cycles thermochimiques opérant à des températures de l'ordre d'un millier de degrés Celsius et utilisant l'eau comme la matière première comprennent dans l'une de leurs étapes la formation d'hydrogène. Le principe de la méthode est d'extraire cet hydrogène formé et de recycler la plus forte proportion de réactifs intermédiaires.

Voici quelques cycles thermochimiques différents :

- Calcium-bromure : il est principalement étudié aux États-Unis, au laboratoire national d'Argonne. Il se déroule à basse température ce qui est un gros avantage. L'acide bromhydrique est décomposé en hydrogène, soit en utilisant le fer comme catalyseur, soit en le portant à l'état de plasma. Cependant, ce cycle ne semble pas inscrit dans les priorités des recherches actuelles.
  - Dioxyde de soufre-électrolyse : ici, seul le dioxyde de soufre est utilisé comme réactif intermédiaire et deux étapes seulement sont nécessaires. Ce procédé met en œuvre à la fois la thermochimie et l'électrolyse. Une réaction d'électrolyse à une température comprise entre 20 et 110°C permet la synthèse d'hydrogène et d'acide sulfurique d'après la réaction :  $\text{SO}_2 + 2 \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2\text{SO}_4 + \text{H}_2$ . La réaction de décomposition de l'acide sulfurique nécessite une température de 850°C et l'apport de chaleur, selon le schéma :  $\text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow \text{SO}_2 + \text{H}_2\text{O} + 1/2 \text{O}_2$ .
- Il reste tout de même de nombreux défis techniques à résoudre, comme la mise au point de l'électrolyseur en milieu

acide fortement corrosif.

- Iode-soufre : il fait actuellement l'objet d'études approfondies, en raison de son potentiel. Ce cycle qui nécessite une température de 900°C, pourrait, en effet, atteindre un rendement de 50 à 55%. Il comprend trois réactions majeures. La première réaction se déroule à 120°C et est exothermique. Elle conduit à la formation d'acide sulfurique selon le schéma :  $I_2 + SO_2 + 2 H_2O \rightarrow 2 HI + H_2SO_4$ . La deuxième réaction est celle de la dissociation de l'acide iodhydrique, selon  $2 HI \rightarrow I_2 + H_2$ , réaction endothermique se déroulant à 400°C, très difficile à effectuer. La dernière et plus importante étape difficile est celle de la dissociation de l'acide sulfurique, selon  $H_2SO_4 \rightarrow SO_2 + H_2O + \frac{1}{2} O_2$ , cette réaction endothermique nécessite une température d'au moins 850°C. Une variante pour la dissociation de l'acide sulfurique est la réaction de Bunsen,  $H_2SO_4 + 2 HI \rightarrow I_2 + SO_2 + 2 H_2O$ , qui présente l'avantage d'intervenir à une température de l'ordre de 120°C. Des problèmes doivent cependant être résolus comme des catalyseurs résistants dans le temps pour réaliser la décomposition de l'acide sulfurique.



A l'heure actuelle, les procédés basés sur la décomposition de l'acide sulfurique semblent les plus intéressants.

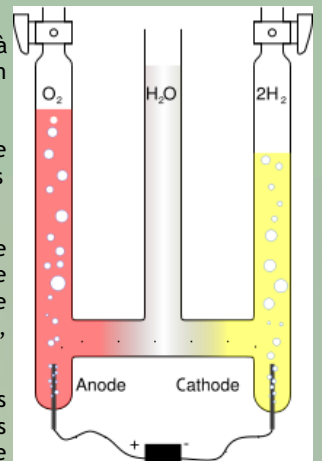
## Une solution prometteuse : l'électrolyse

L'électrolyse de l'eau est une méthode classique de production d'hydrogène qui consiste à dissocier la molécule d'eau en hydrogène et oxygène, selon la réaction  $H_2O \rightarrow H_2 + \frac{1}{2} O_2$ , en faisant passer un courant électrique entre deux électrodes plongées dans l'eau.

Cette réaction est mise en œuvre actuellement au plan industriel à une température de 100°C environ pour produire de l'hydrogène très pur. Cependant, les volumes d'hydrogène sont réduits compte tenu de son coût élevé.

De nombreuses voies de recherche sont donc actuellement explorées pour se rapprocher du rendement maximum théorique de l'électrolyse (50%). Le rendement de l'électrolyse augmente considérablement avec la température. L'une des voies de recherche les plus importantes consiste donc à effectuer l'électrolyse à une température élevée, allant de 250 jusqu'à 900°C.

L'électrolyse de l'eau à haute température est donc une voie prometteuse, plus simple à mettre en œuvre que les cycles thermochimiques, dont les volumes de matières engagées dans les procédés compliquent l'exploitation. Il ne faut pas oublier que cette méthode peut polluer si l'électricité nécessaire a été produite à partir de carburants fossiles et non d'énergies renouvelables.

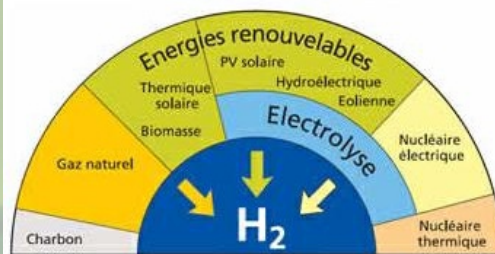


Cependant ces méthodes sont plus modernes et ne sont pas encore entièrement acquises, certaines n'étant encore qu'au stade de projet. Pour la même raison, le coût de ses techniques reste très élevé.

Aujourd'hui, la production de l'hydrogène se trouve ainsi face à plusieurs obstacles que seule l'avancée technologique permettra de surmonter.

Néanmoins, aucun des procédés ne peut être écarté, en l'état actuel des connaissances. Pour le moment, ni le cycle iode-soufre, ni l'électrolyse à conduction oxyde ne sont compétitifs avec le vaporeformage du gaz naturel.

L'augmentation du prix du gaz naturel, ainsi que la taxation des émissions de CO<sub>2</sub> pourrais favoriser le prix de l'hydrogène obtenu par des méthodes moins polluantes. Des recherches sont aussi en cours pour pouvoir exploiter pour les réaction la chaleur des centrales nucléaires, notamment de 4<sup>ème</sup> génération.



Procédé	Type de production	Coût de la matière première (€/GJ)	Coût de production de l'hydrogène (€/GJ)	Coût de l'hydrogène à la consommation (€/GJ)
<b>Référence : essence (2003)</b>	<b>Extraction raffinage</b>	<b>2,5 €/GJ</b>	<b>Essence : 6 €/GJ</b>	<b>Essence : 22-25 €/GJ</b>
Reformage du gaz naturel	Centralisé (3 millions m <sup>3</sup> /jour)	3 €/GJ	5-8 €/GJ	22-25 €/GJ
Reformage du gaz naturel	Décentralisé	4-5 €/GJ	7-12 €/GJ	28-32 €/GJ
Gazéification du charbon	Centralisé	1,2 €/GJ	13-16 €/GJ	32-35 €/GJ
Gazéification de la biomasse	Intermédiaire	2,4 €/GJ	17-22 €/GJ	33-35 €/GJ
Électrolyse	Décentralisé	14 €/GJ (5 c€/kWh)	20-25 €/GJ	35-40 €/GJ

[< PARTIE PRECEDENTE](#)
[sommaire](#)
[PARTIE SUIVANTE >](#)

Remonter

Date de mise en ligne : 11/01/09 | Dernière mise à jour : 17/06/09 | consulter les notes de versions

Surtout, si vous avez des suggestions ou des remarques, n'hésitez pas à me contacter : [etiennefg.pot@hotmail.fr](mailto:etiennefg.pot@hotmail.fr)

