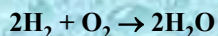


- le principe de fonctionnement :

Le principe de la pile à combustible a été démontré par l'Anglais **William Grove**, en **1839** : le processus peut être décrit comme l'**inverse de l'électrolyse** de l'eau. En fait, il s'agit d'une combustion électrochimique contrôlée d'hydrogène et d'oxygène, avec production simultanée d'électricité, d'eau et de chaleur, selon une réaction chimique globale :

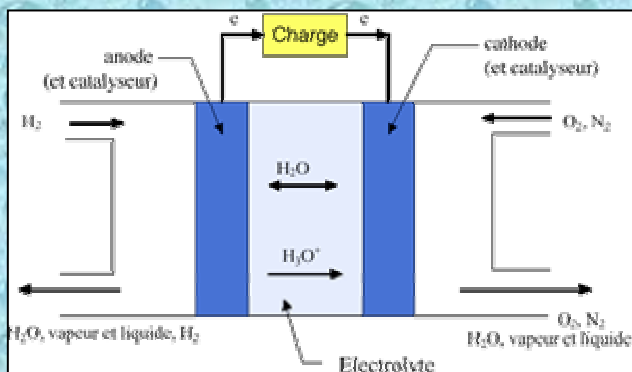


Une PAC est un assemblage de cellules élémentaires, comprenant **deux électrodes (l'anode et la cathode)** chargées en **catalyseur** (le plus souvent du **platine**), séparées par un **électrolyte**, dont le rôle est de permettre la **migration des ions d'une électrode à l'autre**, sous l'effet du champ électrique créé.

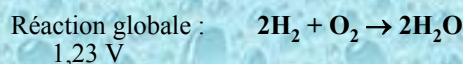
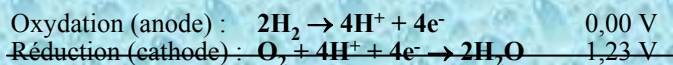
- L'**anode** (où se passe l'**oxydation**) est alimentée en **combustible**. (H_2 , CH_3OH ,...)
- La **cathode** (où se passe la **réduction**) est alimentée en **comburant**. (O_2 , air,...)

On voit donc que le combustible et le comburant **n'entre pas en contact direct** dans la pile à combustible.

Principe de fonctionnement d'une PAC acide H_2/O_2 . (ex : PEMFC)



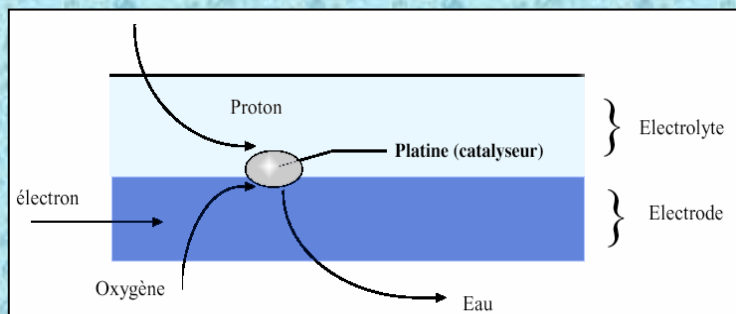
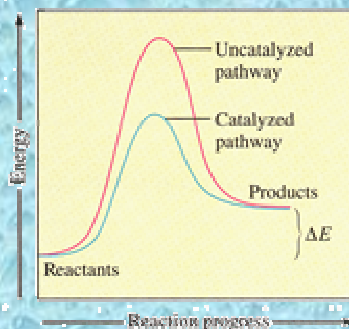
Dans les piles dites "acide", l'hydrogène est oxydé à l'anode, c.-à-d. décomposé en protons et électrons. Les protons traversent ensuite l'électrolyte et se retrouvent à la cathode. Le déséquilibre en électrons crée un pôle positif et un pôle négatif entre lesquels circulent les électrons produisant ainsi de l'électricité. Simultanément à la cathode, les protons réagissent avec les électrons et l'oxygène et donnent de l'eau, seul sous-produit de cette réaction chimique.



Rôle du catalyseur

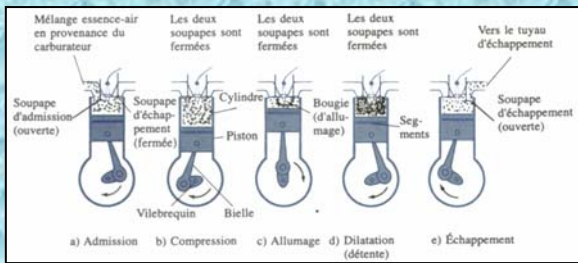
Pour que les deux demi-réactions soient possible, il faut un catalyseur (c.-à-d. un composé capable d'augmenter la vitesse de réaction, sans être consommé lui-même).

Afin que le catalyseur puisse travailler efficacement, la création de **zones actives** doit être assurée. Ces zones mettent en présence à la fois le gaz réactif, les électrons, les protons et le catalyseur, cela se réalise au niveau de l'**interface électrode-électrolyte**.



Les piles à combustible

Moteurs thermiques



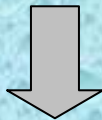
Voie conventionnelle de production d'énergie électrique :
Processus en plusieurs étapes :

- 1. énergie chimique \Rightarrow énergie thermique
- 2. énergie thermique \Rightarrow travail (mécanique)
- 3. travail (mécanique) \Rightarrow énergie électrique (générateur)

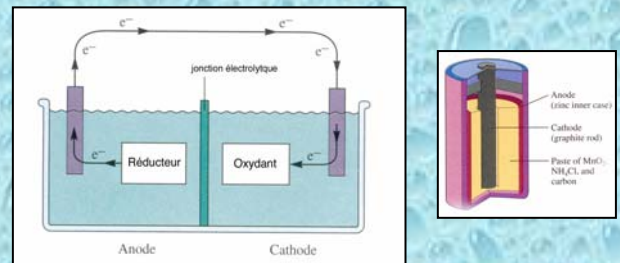
A chaque étape de ce processus on observe des pertes énergétiques.

L'étape cruciale est la conversion de l'énergie thermique (chaleur) en travail (énergie mécanique). Le deuxième principe de la thermodynamique ($\Delta S > 0$) nous dit que la chaleur ne peut pas être entièrement récupérée sous une autre forme d'énergie. Le rendement théorique (maximal) est donné par l'efficacité de Carnot η_c :

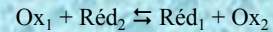
$$\eta_c = (T_s - T_{env}) / T_s < 1$$



Piles conventionnelles



Une réaction électrochimique s'écrit sous la forme :



Le potentiel de réaction est donné par l'équation de Nernst :

$$E = E_0 - \frac{RT}{nF} \ln \frac{[produits]}{[réactifs]}$$

A courant non-nul, les réactifs (Ox_1 et $Réd_2$) sont consommés et le potentiel diminue. Comme les réactifs (oxydant et réducteur) contenus dans la pile sont consommés, la pile doit être jetée et remplacée (batterie primaire) ou rechargée (batterie secondaire).

De plus, les matériaux constituant les électrodes sont consommés.

En effet, ils sont dégradés avec le temps pour finalement rendre le processus inactif :

la pile est usée.



Les piles à combustible

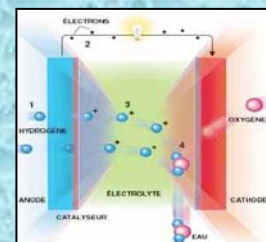
- **Définition :** Une pile à combustible (PAC) est un générateur électrochimique qui permet de **convertir directement l'énergie chimique interne d'un combustible en énergie électrique** sans passer par l'énergie thermique.

Par conséquent, le rendement des PAC n'est pas limité par l'efficacité de Carnot.

Dans les PAC les réactifs sont renouvelés et les produits évacués en permanence, ce qui signifie qu'il y a production d'énergie électrique aussi longtemps que le système est alimenté en gaz réactifs (combustible et comburant).

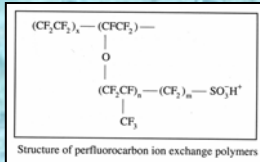
De même la structure (électrodes, électrolyte et sites réactifs) ne réagit pas et ne se dégrade pas au cours du temps.

La durée de vie d'une pile à combustible est donc en théorie illimitée.



Rôle de l'électrolyte

Les électrolytes utilisés dans les PAC sont soit liquide, soit solide. Leur rôle est d'une part de permettre la **migration des ions** d'une électrode à l'autre, et d'autre part la **séparation physique** des deux compartiments anodique et cathodique. Le type d'électrolyte détermine la température de fonctionnement de la pile.

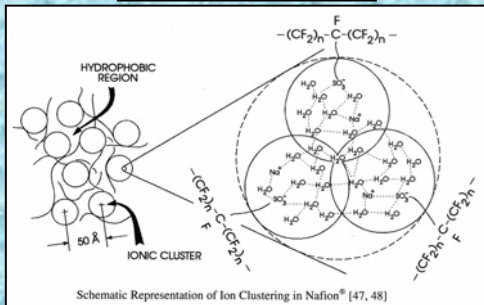


Les **électrolytes liquides et solides** possèdent des **propriétés fondamentalement différentes**.

Pour des raisons essentiellement liées à la fiabilité et à des contraintes d'industrialisation en grande série, la **filière d'électrolyte solide est plus attractif que la filière d'électrolyte liquide**.

C'est pour ces raisons que la technologie PEMFC concentre actuellement le plus gros effort de recherche et développement dans le monde.

Dans les PEMFC, l'électrolyte est une **membrane de polymères (membrane échangeuse de protons)**, qui est un **excellent conducteur d'ions H⁺**. Les matériaux utilisés sont des **membranes à base de polymères perfluorés**, auxquels sont liés chimiquement des groupements acides sulfates (R-SO₃H⁺). Les **protons peuvent migrer librement à travers la membrane**.

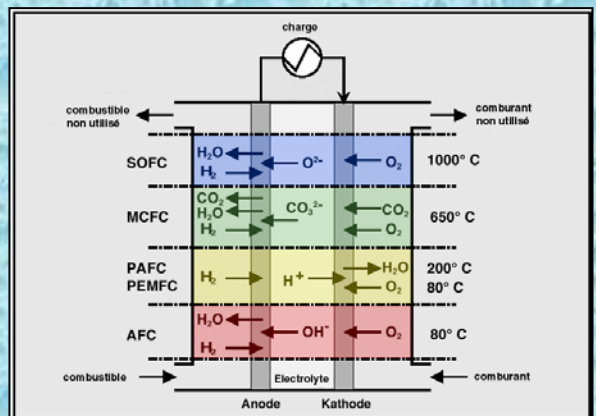


- les différents types de PAC

On distingue plusieurs types de piles à combustible et on les **classifie selon la nature de l'électrolyte utilisé**. Celui-ci détermine en même temps la température de fonctionnement.

- AFC (Alkaline Fuel Cell)
- MCFC (Molten Carbonate Fuel Cell)
- SOFC (Solid Oxide Fuel Cell)
- PAFC (Phosphoric Acid Fuel Cell)
- PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cell)
- DMFC (Direct Methanol Fuel Cell)

type	AFC	PEMFC	PAFC	MCFC	SOFC	DMFC
électrolyte	KOH	membrane échangeuse de protons (MEP)	H ₃ PO ₄	Mélange de Li ₂ CO ₃ , K ₂ CO ₃ dans une matrice LiAlO ₂	Oxyde de zircon ZrO ₂ et yttrium Y ₂ O ₃	MEP ou H ₂ SO ₄
charge transformée	OH ⁻	H ⁺	H ⁺	CO ₃ ²⁻	O ²⁻	H ⁺
Température de fonctionnement (°C)	60-80	80-100	180-210	630-650	900-1000	70-100
combustible	H ₂	H ₂ produit à partir d'hydrocarbures ou du méthanol	H ₂ produit à partir d'hydrocarbures	H ₂ produit à partir d'hydrocarbures	H ₂ et CO produit à partir d'hydrocarbures	méthanol
oxydants	O ₂	air/O ₂	air/O ₂	air/O ₂	air/O ₂	air/O ₂
Rendement %	64	50	40	60	70	45
applications	NASA	véhicules	Installations stationnaires	Santa Clara : Installation de 2 MW	Installations de 50 MW	véhicules



- les atouts des piles à combustible

- Rendements très élevés
- Hydrogène : élément le plus abondant sur terre (eau)
- Peu ou pas polluant : (pas de rejet de gaz à effet de serre, ni de SO_x, ni de NO_x, ni de particules)
- Très silencieuses
- Peu encombrantes (miniaturisation possible)

- sites Internet intéressants :

- <http://www.clubpac.net>
- <http://www.fuelcell.org>
- http://solar-club.web.cern.ch/solar-club/Sol_pile_ext.html

- références littéraires :

- Fuel Cells and their applications, KORDESCH, Simader , VCH
- Chemical Principles, Steven S. Zumdahl, Houghton Mifflin