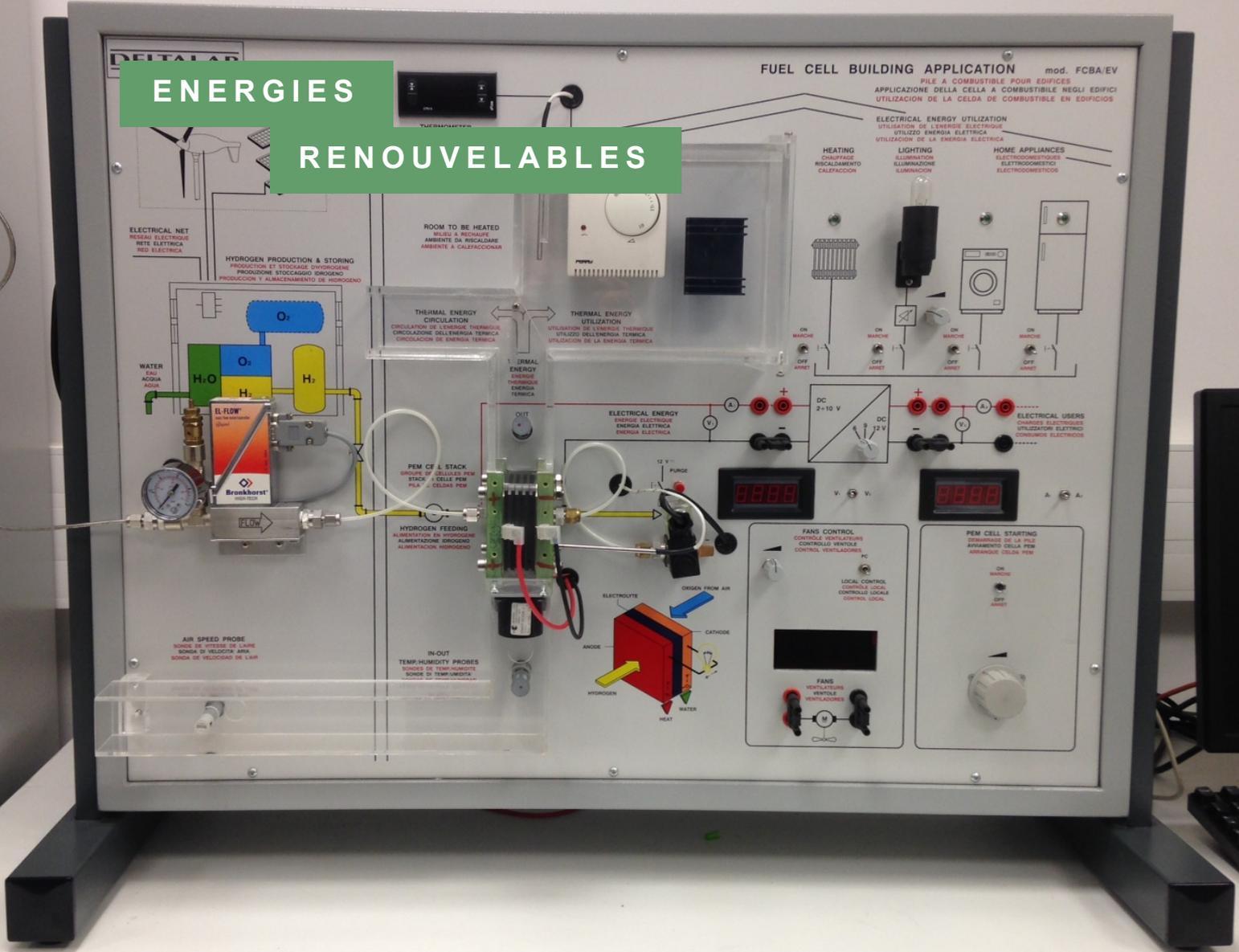


ENERGIES

RENOUVELABLES



DOCUMENT PEDAGOGIQUE

# TP Etude d'une pile à combustible

PLATEFORME D'INGENIERIE EXPERIMENTALE  
CAMPUS DE ST CYR L'ECOLE – BATIMENT 10

## Table des matières

A.	Introduction .....	2
1.	Généralités .....	2
2.	Historique .....	4
3.	Fonctionnement .....	5
4.	Approche thermodynamique, rendements .....	7
5.	Courbes caractéristiques .....	12
6.	Types des cellules .....	14
B.	Description du support Pile à combustible PEM dans son environnement d'utilisation ..	16
1.	Objectifs du projet.....	16
2.	Description de l'installation.....	17
3.	Instructions pour le fonctionnement .....	20
a)	Mise en route et mise en conditionnement hydrique de la cellule .....	20
b)	Procédure à suivre entre l'un exercice et l'autre .....	21
c)	Procédure pour arrêter .....	21
C.	Etudes expérimentales .....	22
1.	Etude de la caractéristique tension-densité de courant.....	22
a)	Objectifs .....	22
b)	Procédure et résultats .....	22
2.	Etude des rendements de l'installation.....	24
a)	Objectifs .....	24
b)	Procédure et résultats .....	24
3.	Etude des courbes de puissance électrique et rendement électrique.....	26
4.	Etude du coefficient d'utilisation.....	26
D.	Annexes .....	29



## A. Introduction

### 1. Généralités

L'hydrogène, ou plus exactement le dihydrogène, ( $H_2$ ) est un vecteur énergétique et non pas une source d'énergie car il n'existe pratiquement pas à l'état naturel. En effet, dans la nature, on le retrouve essentiellement combiné à l'oxygène (dans l'eau) ou à de longues chaînes carbonées (dans les hydrocarbures). Il faut donc d'abord dépenser de l'énergie pour produire du dihydrogène à partir d'eau ou d'hydrocarbures avant de récupérer l'énergie via sa combustion dans une pile à combustible ou dans un moteur, par exemple. Le grand intérêt de ce vecteur énergétique est qu'il pourrait être stocké plus facilement que l'électricité.

Même si l'utilisation des vecteurs d'énergie ne cause pas de pollution, leur fabrication à partir de sources d'énergies fossiles peut engendrer de la pollution tout en consommant de l'énergie. Granovskii et al. (2006) ont analysés les cycles de vie d'un véhicule à combustion interne fonctionnant à l'essence et d'un véhicule utilisant une pile à combustible du type PEM en évaluant et comparant leurs rendements et leurs effets sur l'environnement. Les étapes prises en compte pour l'évaluation sont les suivantes : extraction et transport du produit fossile, raffinage ou reformulation du gaz, conditionnement, production d'hydrogène par électrolyses de l'eau (provenant d'une ressource gaz naturel, éolien ou solaire), distribution et utilisation de l'hydrogène ou de l'essence. Sur la Figure 1 – Comparaison entre l'utilisation de l'essence et d'hydrogène. A gauche, production de  $CO_2$  équivalent, à droite la consommation d'énergie pour produire 1MJ de carburant

sont montrés les résultats obtenus en termes de production de  $CO_2$  équivalent et de consommation d'énergie pour l'utilisation d'1MJ d'essence et d'1MJ d'hydrogène.

*Figure 1 – Comparaison entre l'utilisation de l'essence et d'hydrogène. A gauche, production de  $CO_2$  équivalent, à droite la consommation d'énergie pour produire 1MJ de carburant*

On note que la production de l'essence à partir de pétrole brute est beaucoup plus efficace que la production d'hydrogène par reformulation du gaz naturel. La production d'hydrogène via les sources d'énergie renouvelables est considérée comme une alternative très intéressante pour le stockage d'un vecteur énergétique qui peut être utilisée par exemple pour de la mobilité.

Actuellement, les rendements de conversion d'énergie des piles à combustible varient selon le type de pile et sont généralement supérieurs à 50%. L'énergie non convertie en énergie électrique est émise sous forme de chaleur et est évacuée par le système de refroidissement sous forme d'eau chaude ou de vapeur d'eau.

Dans les centrales thermiques, un rendement proche de 50% ne peut être atteint que dans des grandes installations de type combinées (cycle gaz vapeur). Si l'on réduit la taille de l'installation, le rendement de conversion va fortement chuter. Par contre, le rendement électrique d'une pile à combustible n'est quant à lui pas dépendant de sa taille. Ceci va permettre la construction de petites unités, très proches des utilisateurs, qui non seulement fourniront l'énergie électrique mais également une source d'eau chaude qui pourra, par exemple, être utilisée pour le chauffage domestique. Alors que dans les grandes centrales de production d'électricité, une partie de la chaleur est perdue, ici elle est valorisée, donnant une valeur du rendement global de l'ordre de à 80-90 %.

L'hydrogène réagit avec l'oxygène, libérant de l'eau et de la chaleur. Lors de la combustion de l'hydrogène dans l'air, on n'a aucune formation de dérivés carbonés ou soufrés. De plus, les émissions sonores sont très réduites notamment grâce au fait qu'il n'y a aucune partie rotative dans les piles.

Le rendement d'une cellule à combustible n'est pas limité par le rendement de Carnot, comme les thermo-machines qui suivent un cycle de conversion. Le rendement de conversion d'énergie chimique en énergie électrique très élevés. Par contre, la viabilité industrielle se heurte encore à un rendement énergétique global assez faible compte tenu du fait que chaque

étape (synthèse de l'hydrogène, séchage du gaz, stockage, vaporisation, rendement des réactions électrochimiques de la pile, circulation des fluides, régulation thermique, maintenance, récupération du platine, etc.) contribue à un rendement global encore décevant.

L'hydrogène possède un haut pouvoir énergétique massique: 120 MJ/kg comparé au pétrole (45 MJ/kg), au méthanol (20 MJ/kg) et au gaz naturel (50 MJ/kg). Cependant il possède un faible pouvoir volumétrique de 8960 MJ/m<sup>3</sup> face au pétrole (311170 MJ/m<sup>3</sup>), méthanol (16020 MJ/m<sup>3</sup>), gaz naturel (21250 MJ/m<sup>3</sup>). Cela pose un véritable problème de stockage et de transport: que ce soit pour l'utilisation de l'hydrogène dans un véhicule ou pour le transport en pipeline, en camion, où c'est la densité volumétrique qui importe.

3



Figure 2 – Problème de stockage de l'hydrogène (<http://www.toonpool.com>).

Les piles à combustibles sont encore une technologie coûteuse, qui n'est pas du niveau de concurrence avec d'autres technologies. Cela est dû à plusieurs raisons, notamment à l'utilisation de platine comme catalyseur et aussi à l'utilisation de membranes aux prix coûteux. Les coûts d'investissement restent beaucoup trop élevés : entre 4000€ et 6000€ par kW installé pour un coût au MWh de 150€ à 220€, bien loin des 42€/MWh du parc nucléaire français (source : Sia Conseil, 2011).

En 2010, des chercheurs américains et allemands ont proposé d'intégrer un catalyseur spécial, moins coûteux et qui pourrait diviser par deux la quantité de platine des piles à combustibles. Il s'agit de nano sphères construites avec des atomes de platine et de cuivre. Selon cette équipe, cela pourrait réduire de 80 % le prix des piles à combustible.

De plus, comme cette technologie est encore en développement, les durée de vie maximales des piles à hydrogène sont atteintes dans les laboratoires, avec des conditions bien contrôlées. Il est atteint quelques milliers d'heures en application stationnaires. Dû à cette même raison, on ne connaît pas actuellement les frais de maintenances, puisque les cellules ne sont pas industrialisées à grande échelle.

La figure suivante montre les différents combustibles utilisés dans chaque type de pile et leurs principales applications.

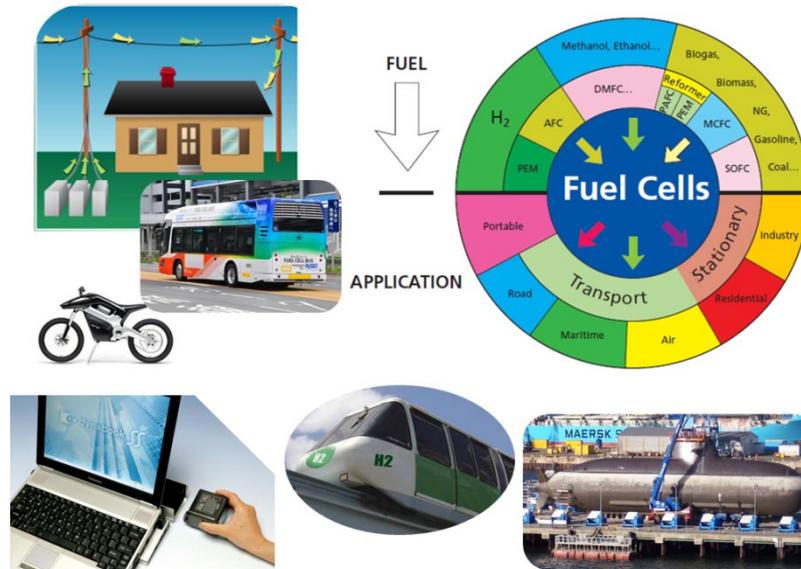


Figure 3 - Les différents combustibles utilisés dans chaque type de pile et leurs principales applications.

## 2. Historique

Des questions telles que la demande d'énergie à chaque fois plus importante, l'effet de serre, le réchauffement de la planète, le défaut de combustibles fossiles, sont les moteurs du développement des sources d'énergie renouvelable. Ces enjeux sont inhérents à la fin du 20<sup>ème</sup> siècle, mais surtout au 21<sup>ème</sup> siècle. Toutefois, depuis le 19<sup>ème</sup> siècle jusqu'à aujourd'hui, des grands noms de la Science ont atteint des progrès dans le développement des piles à combustible, depuis la découverte de l'électrolyse jusqu'à l'utilisation d'une cellule dans un véhicule.

Des doutes surgissent quant à la paternité de certaines inventions. En ce qui concerne les piles à combustible, certains prétendent qu'elles ont été découvertes par Christian Friedrich Schönbein (Figure 4, à gauche), tandis que d'autres sources indiquent l'anglais Sir William Robert Grove (Figure 4, à droite) comme son père.

De grands progrès dans le domaine de l'électrolyse de l'eau ont été réalisés par Sir William Nicholson et Anthony Carlisle, mais les travaux théoriques les plus importants ont été développés par Friedrich Wilhelm Ostwald et déployés dans la pratique par Francis Thomas Bacon. La Figure 5 montre l'évolution temporelle des découvertes dans le champ de l'électrolyse et des cellules à combustible.



Figure 4 - Christian Friedrich Schönbein à gauche et Sir William Robert Grove à droite.

Le long laps de temps de plus d'un siècle qui s'est écoulé entre la réalisation du premier modèle de pile à combustible et les premières utilisations s'explique par le très fort développement qu'ont connu les autres types de générateurs d'énergie électrique et par le fait

que le coût des matériaux utilisés dans la pile à combustible reste encore actuellement élevé. Ce fut seulement dans les années 70 et 80, principalement en Amérique et au Japon, que les premières applications importantes des piles à combustibles ont été réalisées.

5

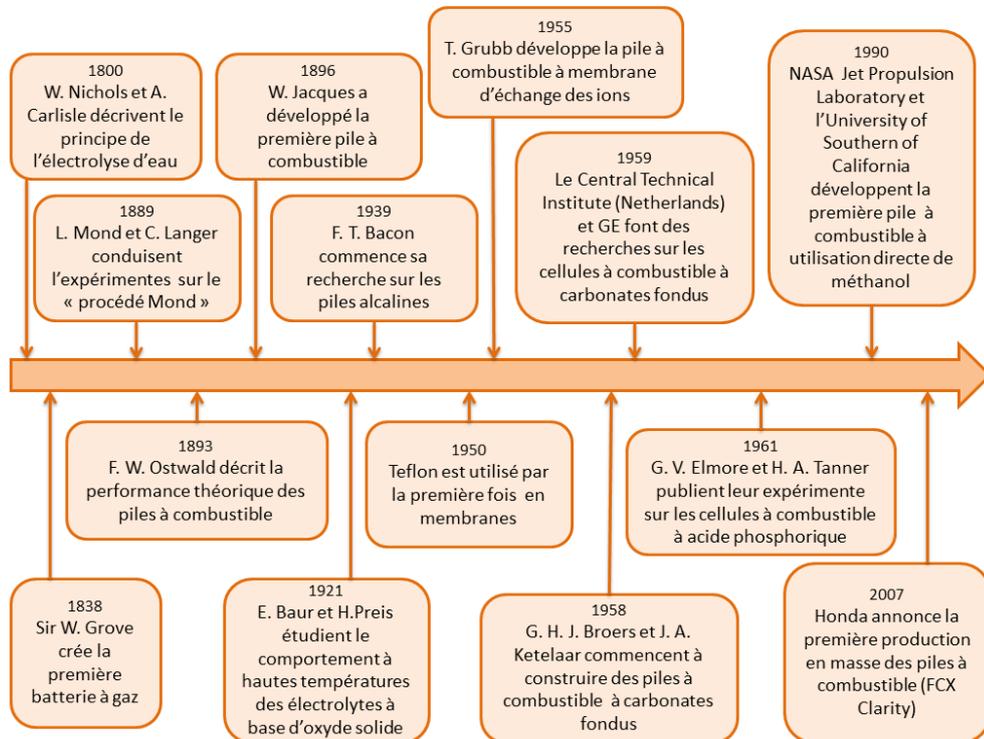


Figure 5 – Evolution temporel des découvertes (Adapté de J.M. Andujar, F. Segura (2009))

### 3. Fonctionnement

Une cellule à combustible est un dispositif électrochimique dont la fonction principale est de convertir l'énergie chimique en l'énergie électrique avec une production d'eau et de chaleur. Un schéma de principe est montré sur la Figure 6. On retrouve les principaux composants: deux électrodes (l'anode et la cathode) séparés par l'électrolyte. Le combustible arrive continuellement à l'anode et l'oxygène (généralement apporté par l'air) arrive continuellement à la cathode sans entrer en contact direct l'un avec l'autre.

Au niveau de l'anode, l'hydrogène s'oxyde en se décomposant en ions positifs et négatifs alors qu'au niveau de la cathode, l'oxygène se réduit (en absorbant des électrons). Pour que le système puisse retourner à son état stable, il faut que le flux d'électrons soit transporté extérieurement par un conducteur, alors que le transfert correspondant de charges à l'intérieur de la cellule est effectué par le mouvement des ions à travers l'électrolyte.

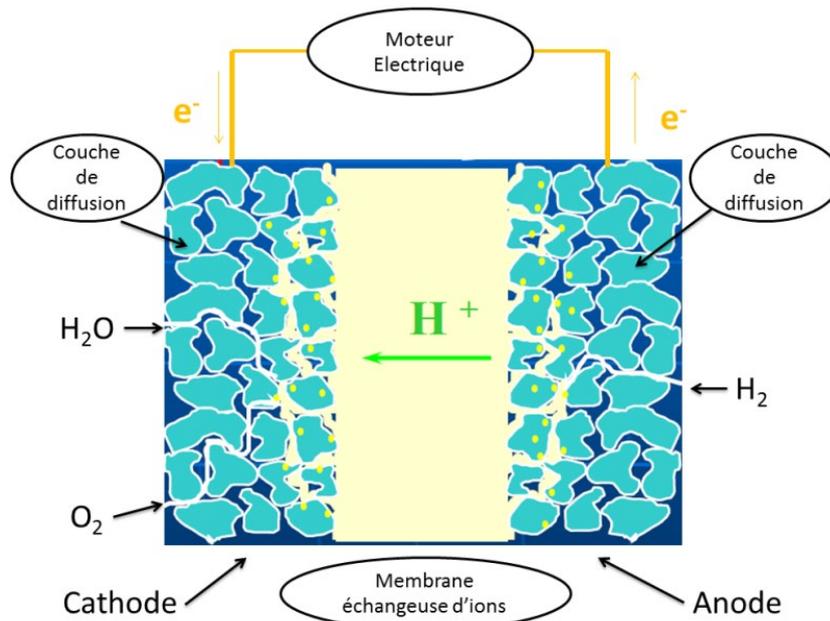


Figure 6 – Schéma de fonctionnement simplifié d'une cellule à combustible.

Les électrodes des cellules PEM présentent la même structure de base, en fait elle ne se différencie que par quelques détails. On dispose de particules de platine d'ordre du nanomètre à la surface de grosses particules de charbon. Les faces externes des électrodes sont recouvertes avec des composés comme le Téflon, ce qui permet la diffusion du gaz vers les électrodes tout en retenant l'eau en contact avec la membrane. Cette structure est en mesure de rejeter l'eau produite à la surface où elle peut s'évaporer.

La membrane polymère s'étend partiellement sur la structure poreuse de l'électrode permettant ainsi la formation d'une interface entre le gaz, le catalyseur et l'électrolyte (dite interface triphasée). Ainsi la platine doit être en contact simultané avec le gaz, le proton et l'électron afin que la réaction ait lieu.

Les Figures 7, 8 et 9 montrent les schémas des réactions au niveau de l'anode, au niveau de la cathode et au niveau global, respectivement. On peut noter que les réactions ont lieu à l'interface triphasée mentionnée précédemment.

- Réaction au niveau de l'anode:  $H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$

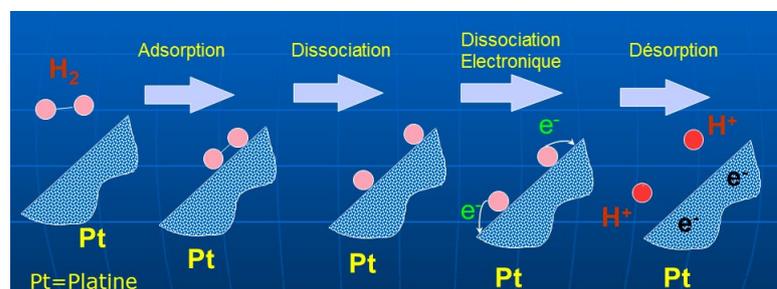


Figure 7 – Réaction au niveau de l'anode.

- Réaction au niveau de la cathode:  $\frac{1}{2}O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2O$

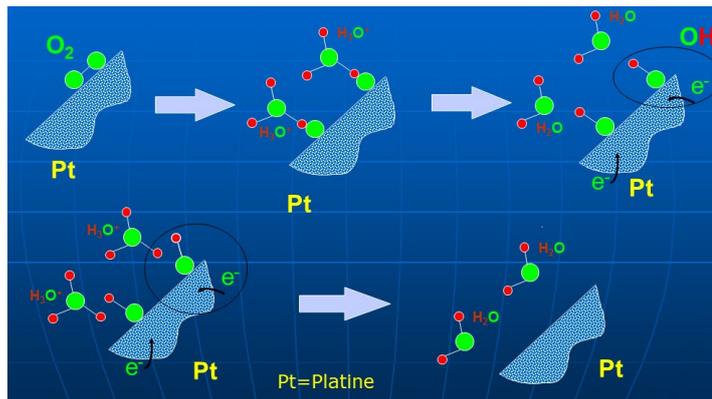


Figure 8 – Réaction au niveau de la cathode.

- Réaction globale:  $H_2 + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow H_2O$

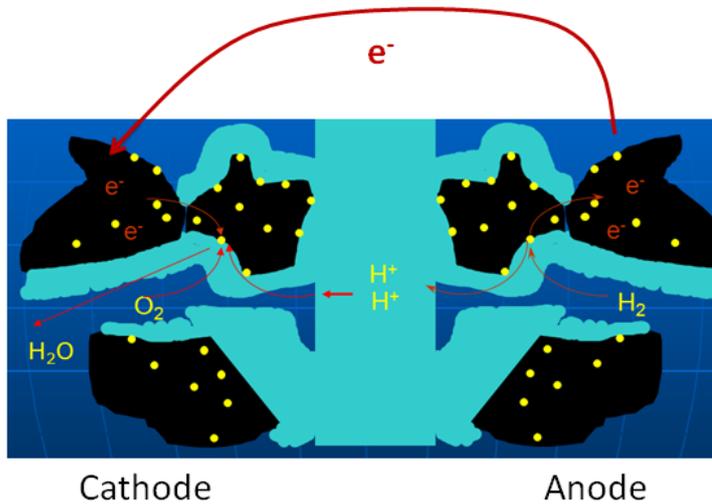


Figure 9 – Réaction globale.

#### 4. Approche thermodynamique, rendements

Comme toutes les machines transformant une forme d'énergie en une autre, les générateurs chimiques-électriques obéissent eux aussi aux lois fondamentales de la thermodynamique. Cependant, dans ce dernier domaine, il n'est possible d'écrire les réactions d'égalité que si l'on étudie les transformations réversibles.

##### Point de vue exergetique

Dans les cellules à combustible, un des termes les plus importants est l'enthalpie libre de Gibbs (G). L'enthalpie de Gibbs est une fonction d'état du système et représente la condition d'une transformation spontanée lorsque celle-ci a lieu à pression et à température constante :

$$dG_{T,P} \leq 0 \quad \text{Équation 1}$$

Où le signe < indique une transformation spontanée, c'est-à-dire irréversible, où toute cause d'irréversibilité entraîne une diminution de l'enthalpie libre de Gibbs. En rappelant la relation liant l'énergie de Gibbs à la variation de travail électrique, on aura :

$$dG_{T,P} \leq \delta L' \quad \text{Équation 2}$$

$$dH_{T,P}^{co} + \delta W_{el} = T\delta S^i = \delta P_{ex} \quad \text{Équation 3}$$

Où  $\delta W_{el}$  représente le travail infinitésimal de nature électrique (autre que mécanique), définie aussi comme travail utile. Cette expression exprime que dans le cas d'une transformation réversible, le travail maximal utile qu'on peut obtenir se limite à la variation de l'énergie de Gibbs (que l'on peut aussi noter co enthalpie à la température T afin d'aboutir au travail maximal) ;

$$W_{el}^{max} = \Delta H_{T,P}^{co} = \Delta G_T \quad \text{Équation 4}$$

Alors, le travail électrique produit par le système en conditions isothermes et avec une pression extérieure constante est égal à la co enthalpie ou l'énergie libre de formation des produits de réaction à T, c'est-à-dire à la différence entre l'énergie libre de Gibbs des produits et des réactifs.

$$\Delta G = \Delta G_{produits} - \Delta G_{réactifs} \quad \text{Équation 5}$$

Cas d'une écriture aux conditions standards

$$\Delta G^0 = \Delta G_{produits}^0 - \Delta G_{réactifs}^0 \quad \text{Équation 6}$$

Le cas le plus classique de fonctionnement pour les cellules à combustible du type PEM est la réaction de combinaison d'oxygène avec l'hydrogène :



En tenant compte des valeurs molaires standards et en les indiquant par (-), on a donc l'enthalpie libre de formation d'eau donnée par :

$$\Delta \bar{g}_f = (\bar{g}_f)_{H_2O} - (\bar{g}_f)_{H_2} - (\bar{g}_f)_{O_2} \quad \text{Équation 8}$$

On remarque que l'enthalpie libre de formation de Gibbs n'est pas constante, mais varie en fonction de la température et d'état du gaz (Tableau 1 : Variation de l'enthalpie libre de réaction de l'hydrogène en fonction de l'état physique et de la température,).

Etat physique de l'eau produite	Température (°C)	$\Delta \bar{g}_f$ (kJ/mole)	$E_{rev}$ (V)	Rendement limite (%)
Liquide	25	-237,2	1,23	83
Liquide	80	-228,2	1,18	80
Vapeur	100	-225,3	1,17	79
Vapeur	200	-220,4	1,14	77
Vapeur	400	-210,3	1,09	74
Vapeur	600	-199,6	1,04	70
Vapeur	800	-188,6	0,98	66
Vapeur	1000	-177,4	0,92	62

Tableau 1 : Variation de l'enthalpie libre de réaction de l'hydrogène en fonction de l'état physique et de la température, [6].

Sans pertes dans la cellule, le processus est réversible. Ainsi toute l'enthalpie libre de Gibbs se transforme alors en électricité. La tension maximale en circuit ouvert dans un processus réversible s'écrit comme :

$$E_{ex,max} = \frac{-W_{el}^{max}}{2F} = \frac{-\Delta \bar{g}_f}{2F} \quad \text{Équation 9}$$

(\*) L'indice « ex » fait référence à une formulation exergetique, « en » respectivement à une formulation énergétique

Avec  $F$  la charge électrique d'une mole d'électrons (96485 Coulombs,  $F =$  la constante de Faraday = 96 485,3415 s A/mol). Le facteur 2 provient des 2 électrons qui traversent le circuit extérieur pour chaque molécule d'hydrogène utilisée.

En considérant un processus réversible avec l'hydrogène comme combustible et l'oxygène comme comburant dans les conditions de pression standard de 0,1Mpa ayant lieu dans une cellule à combustible travaillant à 100°C, on obtiendrait :

$$E_{ex,max}(100^{\circ}C) = \frac{225300}{2 \times 96485} = 1,17V \quad \text{Équation 10}$$

On voit pour une cellule travaillant dans les mêmes conditions mais à une température de 25°C, on trouverait :

$$E_{ex,max}(25^{\circ}C) = \frac{237200}{2 \times 96485} = 1,23V \quad \text{Équation 11}$$

Cette valeur de tension représente la tension maximale obtenue aux extrémités des électrodes. En pratique, la tension envisageable est bien inférieure à cause des facteurs d'irréversibilité du processus.

$$\eta_{ex,electrique} = \frac{W_{el}}{W_{el}^{max}} = \frac{\text{Tension mesurée réelle}}{E_{ex,max}(T)} \quad \text{Équation 12}$$

### Point de vue énergétique

Vu que dans une cellule à combustible, l'hydrogène est « brûlé » pour produire de l'électricité, on peut définir le rendement comme le rapport entre l'énergie électrique produite et l'énergie fournie par le combustible, représentée par le pouvoir calorifique, ou plus précisément, par la variation d'enthalpie de formation molaire du combustible dans les conditions standard :

$$\eta_{en,electrique}^{(1)} = \frac{\text{Energie électrique produite par mole du combustible}}{-\Delta \bar{h}_f} \quad \text{Équation 13}$$

Par rapport à l'utilisation d'hydrogène comme combustible, on peut distinguer deux différentes valeurs :

$$\Delta \bar{h}_f = -241,83 \frac{kJ}{mole} = LHV \text{ (lower heating value)} \quad \text{Équation 14}$$

$$\Delta \bar{h}_f = -285,84 \frac{kJ}{mole} = HHV \text{ (higher heating value)} \quad \text{Équation 15}$$

Où le signe négatif indique une réaction avec libération de chaleur (exothermique), selon la forme – vapeur LHV ou liquide HHV – prise par l'eau provenant de la recombinaison de l'hydrogène avec l'oxygène. La différence entre ces deux valeurs est l'enthalpie molaire d'évaporation d'eau (44,01kJ/mole). Les données sont prises aux conditions standards  $T_0$ .

D'après ce que l'on vient de voir, si dans la réaction entraînant la formation de l'eau, toute l'énergie de l'hydrogène se transformait complètement en énergie électrique, on obtiendrait dans la cellule un potentiel de :

$$E_{en,max} = \frac{-\Delta \bar{h}_f}{2F} = \begin{cases} 1,48V, \text{ si l'on considère le HHV} \\ 1,25V, \text{ si l'on considère le LHV} \end{cases} \quad \text{Équation 16}$$

De cette façon, on arrive à l'efficacité dite électrique d'une cellule de type PEM, avec  $V_c$  la tension de cellule :

$$\eta_{en,electrique}^{(1)} = \frac{V_c}{1,25} \times 100 \text{ (réf. LHV)} \quad \text{Équation 17}$$

Dans la réalité, on utilise un facteur de « by-pass », aussi appelé rendement matière, tenant compte de l'utilisation réelle du combustible (généralement on adopte  $\mu = 0,95$ ), donc :

$$\eta_{en,electrique}^{(2)} = \mu \cdot \frac{V_c}{1,25} \cdot 100 \quad (\text{réf. LHV}) \quad \text{Équation 18}$$

La différence entre les deux rendements est liée aux pertes d'énergie dues à des processus de catalyse ayant lieu sur les électrodes (cas des courants faibles), des pertes liées à une diffusion gênée par une hygrométrie trop forte ainsi que des pertes ohmiques.

### Comparaison avec les cycles thermodynamiques

Les cellules transforment l'énergie chimique directement en l'énergie électrique, sans transformation préalable en énergie mécanique. Le schéma suivant compare les processus de conversion d'énergie chimique en énergie électrique grâce à un cycle thermodynamique et suivant un cycle électrochimique.

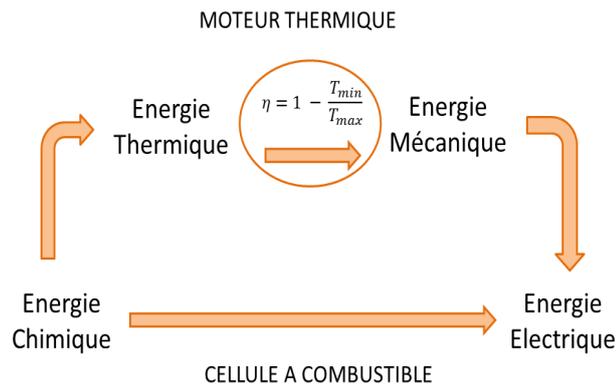


Figure 10 – Comparaison des chemins de conversion d'énergie pour un moteur thermique et une cellule à combustible.

Contrairement aux moteurs thermiques qui requièrent des cycles thermodynamiques intermédiaires, le rendement de conversion d'une cellule à combustible n'est pas limité par le rendement du cycle de Carnot.

En effet, pour une machine idéale travaillant entre une source et un puits de chaleur à une température constante, on a un rendement maximal de :

$$\eta_{th,theorique} = 1 - \frac{T_{min}}{T_{max}} \quad \text{Équation 19}$$

Pour les cellules on peut aussi exprimer le rendement théorique comme :

$$\eta_{ex,electrique} = \frac{\text{Tension de travail}}{\text{Tension maximale}} \quad \text{Équation 20}$$

Par exemple, un cycle à vapeur travaillant à une température de 800K avec des gaz condensés à 325K possède un rendement théorique de 35%. Par contre, une cellule à combustible travaillant à 25°C avec une tension de 1,23V a un rendement théorique de 83%.

Les cellules à combustible actuelles atteignent des rendements de l'ordre de 40 à 65%, alors que les moteurs thermiques opérant sur la base d'un Cycle d'Otto atteignent 22% à 30%.

La Figure 11 montre l'évolution du rendement d'une cellule à combustible et du processus de Carnot en fonction de la température d'opération. On voit clairement que les tendances sont opposées. Le rendement des cellules diminue avec la température pendant que pour les machines thermiques il augmente avec la température de la source chaude.

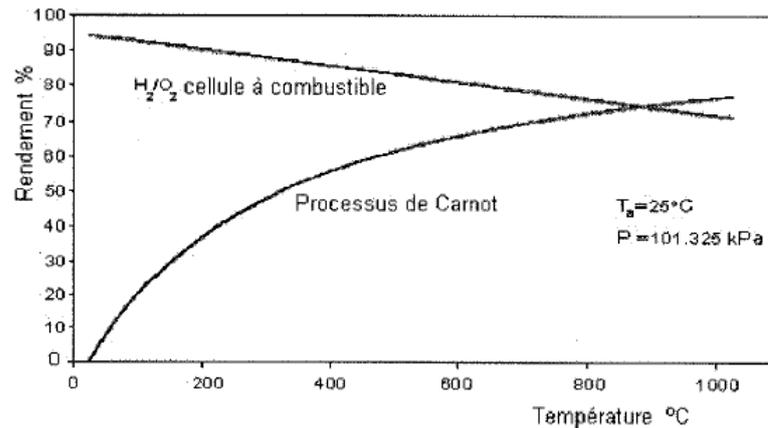


Figure 11 – Comparaison de rendement entre le processus de Carnot et une cellule à combustible [6].

### Extension de l'expression du rendement d'une cellule

On peut exprimer le rendement global d'une cellule à combustible à l'aide de la formule suivante :

$$\eta_{\text{électrique global}}^{\text{théorique}} = \eta_{\text{ex,électrique}} \eta_{\text{farad}} \eta_{\text{matière}} \eta_{\text{syst}} \quad \text{Équation 21}$$

$\eta_{\text{ex,électrique}}$  = rendement exergetique électrique (paragraphe précédent)

$\eta_{\text{farad}}$  = rendement faradique

$\eta_{\text{syst}}$  = rendement du système

$\eta_{\text{matière}}$  = rendement matière

Le rendement exergetique électrique  $\eta_{\text{ex,électrique}}$  est égal au rapport entre la tension réelle dans les extremités de la pile et la valeur la tension pour le cas réversible. La tension de cellule atteint 0.7V pour un rendement maximal de 57% à 25°C.

Le rendement faradique est défini par :

$$\eta_{\text{farad}} = \frac{I}{I_{\text{théorique}}} \quad \text{Équation 22}$$

Où  $I$  est le courant traversant la cellule et  $I_{\text{théorique}}$  le courant théorique que l'on devrait obtenir si tous les réactifs introduits subissaient une réaction complète. Le courant théorique est obtenu par l'expression suivante :

$$I_{\text{théorique}} = \frac{2F \dot{V}}{V_m N} \quad \text{Équation 23}$$

Où :

$F$  = la constante de Faraday = 96 485,3415 s A/mol

$V_m$  = volume molaire de l'hydrogène (l/mol)

$\dot{V}$  = débit d'hydrogène (l/s)

$N$  = nombre de cellules (égal à 4 dans le montage étudié)

Le rendement faradique tient compte :

- d'un éventuel courant de fuite à travers la membrane (d'ordre de quelques mA/cm<sup>2</sup>), traversée par des électrons qui vont réagir avec l'oxygène sans fournir de travail électrique ;
- de la diffusion d'hydrogène et/ou d'oxygène à travers cette membrane. Dans ce cas, ce sont les espèces chimiques qui réagissent sur l'électrode opposée sans fournir de travail électrique.

En pratique, ce rendement n'atteint pas 100 %, par suite de réactions électrochimiques parallèles (par exemple si c'est le méthanol qui est utilisé à la place de l'hydrogène, il y a possibilité de formation de formaldéhyde et d'acide formique ce qui réduit le nombre d'électrons échangés à 2 ou 4, au lieu de 6 pour l'oxydation totale en  $\text{CO}_2$ ), et de réactions chimiques entre les espèces réactives, catalysées par les matériaux d'électrodes, en particulier l'oxydation chimique du combustible par l'oxygène [15].

Le rendement matière  $\eta_{\text{matière}}$  est supérieur à 90%. Il rend compte du taux d'utilisation de l'hydrogène par la cellule. En effet, l'eau produite à la cathode diffuse à travers la membrane si bien qu'il faut purger périodiquement le compartiment anodique, ce qui ne peut se faire sans perte d'hydrogène.

Le rendement du système doit prendre en considération les pertes dû aux accessoires, comme les pompes, les ventilateurs et les compresseurs.

## 5. Courbes caractéristiques

La tension sur une seule cellule est d'environ 1,2V et en conséquence, pour augmenter la tension à la sortie, il faut ajouter plusieurs cellules connectées en série de sorte à obtenir une capacité de puissance plus importante.

Les piles à combustibles sont caractérisées par les courbes de polarisation qui nous permettent d'observer l'allure du comportement de la tension dans la pile par rapport à la densité de courant qui la traverse (Figure 12). On peut voir que les piles possèdent une valeur de tension théorique limite qui ne peut pas être atteinte à cause des pertes d'irréversibilité. La valeur de tension à vide est la tension obtenue dans le cas de circuit ouvert (densité de courant nulle).

Pour la région de valeurs de densité de courants moyenne, on remarque un comportement linéaire. A mesure que la densité de courant augmente, la tension dans la pile chute due à l'augmentation de la résistance du système.

Les pertes ohmiques sont provoquées par la résistance au flux des ions dans l'électrolyte et le flux des électrons dans les matériaux constituant l'électrode. En outre, les interconnexions de cellules et les plats bipolaires constituent eux aussi une cause de pertes importantes. De tout cela, il s'ensuit une réduction de la tension qui est proportionnelle au courant qui circule  $\Delta V_{\text{Ohmique}} = r \text{ (k}\Omega \text{ cm}^2) i \text{ (}\frac{\text{mA}}{\text{cm}^2}\text{)}$ . Due à sa nature ohmique, cette région s'appelle Région de Polarisation Ohmique.

A des faibles courants, les pertes de nature ohmique deviennent insignifiantes, mais les pertes par activation sont plus importantes provoquant une chute de la tension (appelée région de Polarisation d'activation).

Pour les valeurs plus importantes de la valeur de la densité de courant, les principales pertes sont dues à la réduction de l'efficacité des transferts de masse du gaz induit par l'inondation des électrodes (région de polarisation par concentration).

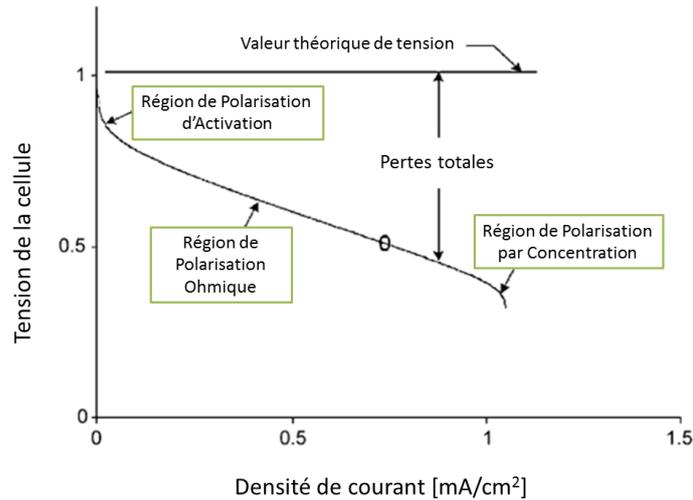


Figure 12 – Courbe de polarisation d'une cellule à combustible et les régions des pertes par polarisation [6].

En ce qui concerne l'impact de la température de travail des cellules, la forme et les caractéristiques des courbes de polarisation changent. Pour cellules travaillant à de hautes températures (Figure 12), on a une tension à vide inférieure à la tension théorique. Celles-ci présentent ensuite une chute initiale de tension rapide, suivie d'une région linéaire où la tension décroît plus lentement avec l'augmentation de courant. A des hautes densités de courant, la tension chute rapidement.

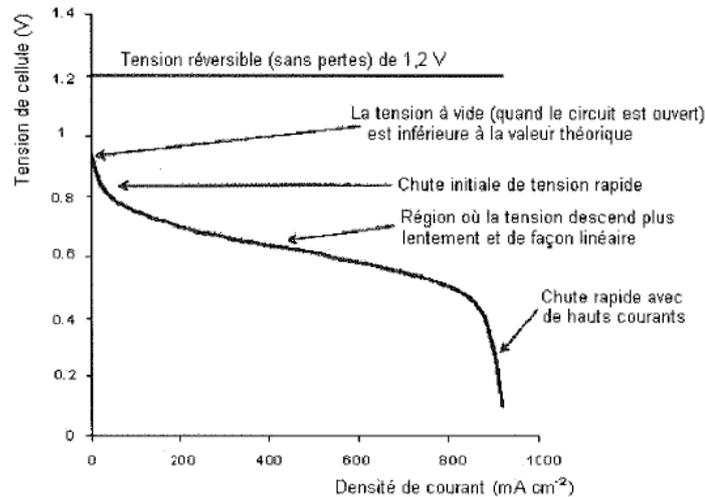


Figure 13 – Courbe caractéristique d'une cellule travaillant à de hautes températures [6].

Pour le cas des basses températures (Figure 14), la tension à vide est presque égale à la tension théorique. On ne note pas de chutes de tension aux faibles densités de courant. La tension diminue de façon beaucoup plus linéaire depuis la valeur de tension réversible. Pour le cas des hautes densités, la tension chute plus rapidement.

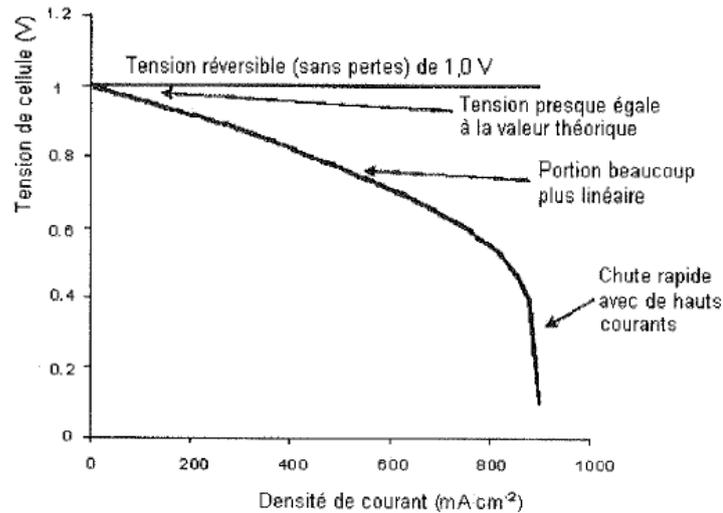


Figure 14 - Courbe caractéristique d'une cellule travaillant à des basses températures [6].

## 6. Types des cellules

Les cellules sont différenciées l'une de l'autre par le choix du matériau utilisé pour l'électrolyte. Le Tableau 2 : Type de cellules, plage de fonctionnement et caractéristiques montre pour chaque type de cellule les différentes plages de température de fonctionnement et le type d'électrolyte.

Les cellules qui travaillent aux températures comprises entre 50 à 250°C sont dites cellules à basse température (*Proton Exchange Membrane Fuel Cells - PEMFC*, *Alkaline Fuel Cells – AFC*, et *Phosphoric Acid Fuel Cells - PAFC*). En revanche, les cellules dites haute température opèrent à des valeurs comprises entre 650 à 1000°C (*Molten Carbonate Fuel Cells - MCF* et les *Solid Oxyde Fuel Cells - SOFC*).

Type de cellule	Température de travail [°C]	Type de l'électrolyte	Porteur de charge	Catalyseur	Combustible	Efficiéce électrique [%]	Puissance qualifié [kW]
<b>Alcaline</b>	10 – 100	KOH (solution aqueuse)	H+	Ni	H2	60 - 70	10 - 100
<b>Electrolyte polymère</b>	50 – 100	Perflour-sulphonated polymer (solid)	H+	Pt	H2	30 - 50	0,1 - 500
<b>Méthanol direct</b>	90 – 120	Perflour-sulphonated polymer (solid)	H+	Pt	Méthanol	20 - 30	100 - 1000
<b>Ethanol direct</b>	90 – 120	Perflour-sulphonated polymer (solid)	H+	Pt	Ethanol	20 - 30	100 - 1000
<b>Acide phosphorique</b>	150 - 220	Phosphoric acid (immobilized liquid)	H+	Pt	H2	40 - 55	5 - 10000
<b>Carbonate fondu</b>	650 - 700	Alcaline carbonate (immobilized liquid)	O2-	Ni	Reformulé ou CO/H2	50 - 60	100 - 300
<b>Oxyde solide</b>	800 - 1000	Ytria-stabilized zirconia (solid)	O2-	Ni	Reformulé ou CO/H2 ou CH4direct	50 - 60	0,5 - 100

Tableau 2 : Type de cellules, plage de fonctionnement et caractéristiques

Le Tableau 3 compare les principaux types de cellules déjà mentionnés pointant sur les avantages et inconvénients, et les principales applications de chacune.

Type de cellule	Applications	Avantages	Désavantages
<b>Electrolyte polymère</b>	Résidences et services d'urgence (l'hôpital, banques), industrie, transports, commerce	Haute densité de puissance, start up rapide, électrolyte solide et non corrosive	Catalyseur cher, sensibilité aux contaminants du combustible (CO, H <sub>2</sub> S)
<b>Alcaline</b>	Transports, applications portables, navettes spatiales	Haute densité de puissance, start up rapide	Catalyseur cher, sensibilité aux contaminants du combustible (CO, CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , H <sub>2</sub> S)
<b>Acide phosphorique</b>	Transports, cogénération commerciale, applications portables	Haute production de la chaleur, électrolyte possède des conditions stables	Electrolyte liquide et corrosive, sensibilité aux contaminants du combustible (CO, H <sub>2</sub> S)
<b>Carbonate fondu</b>	Transports (des navires, chemins de fer), industries, plantes de puissance	Haute efficacité, n'utilise pas des catalyseurs métalliques	Haute coût, électrolyte liquide et corrosive, start up lent, intolérance au sulfure
<b>Oxyde solide</b>	Résidences, cogénération commerciale, applications portables, plantes utilitaires de puissance	Electrolyte solide, haute production de la chaleur, haute efficacité	Haute coût, start up lent, intolérance au sulfure
<b>Méthanol direct</b>	Utilisé au lieu des batteries en applications portables, comme des ordinateurs et portables	Coût réduit due à non-utilisation de combustibles reformulés	Baisse efficacité et baisse densité de puissance

Tableau 3 : Applications, avantages et inconvénients

## B. Description du support Pile à combustible PEM dans son environnement d'utilisation

### 1. Objectifs du projet

Cette application à échelle réduite a pour but de montrer le principe d'emploi des systèmes des piles à combustibles pour une utilisation simultanée d'un besoin thermique et électrique dans le domaine par exemple de l'habitat. Le système sur lequel vous allez travailler FCBA/EV constitue une application d'un « *stack* » (une pile) de cellules à combustible du type *Proton Exchange Membranes Fuel Cell* (PEMFC ou PEM) destiné à la production d'énergie électrique et de chaleur de façon combinée (Figure 15).

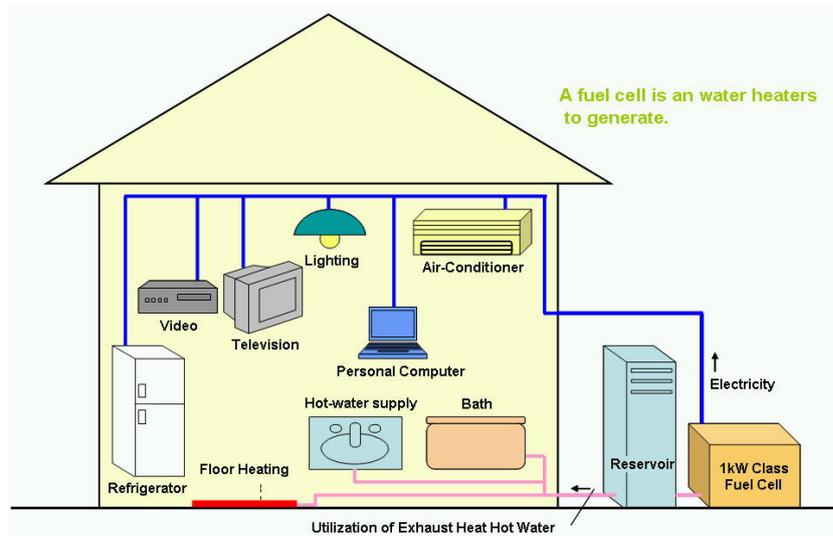


Figure 15 – Application des piles à combustible dans le domaine de l'habitat.

La structure est dotée de plusieurs capteurs dédiés à l'analyse des paramètres fonctionnels fondamentaux pour l'évaluation du processus de conversion électrochimique de l'énergie du combustible.

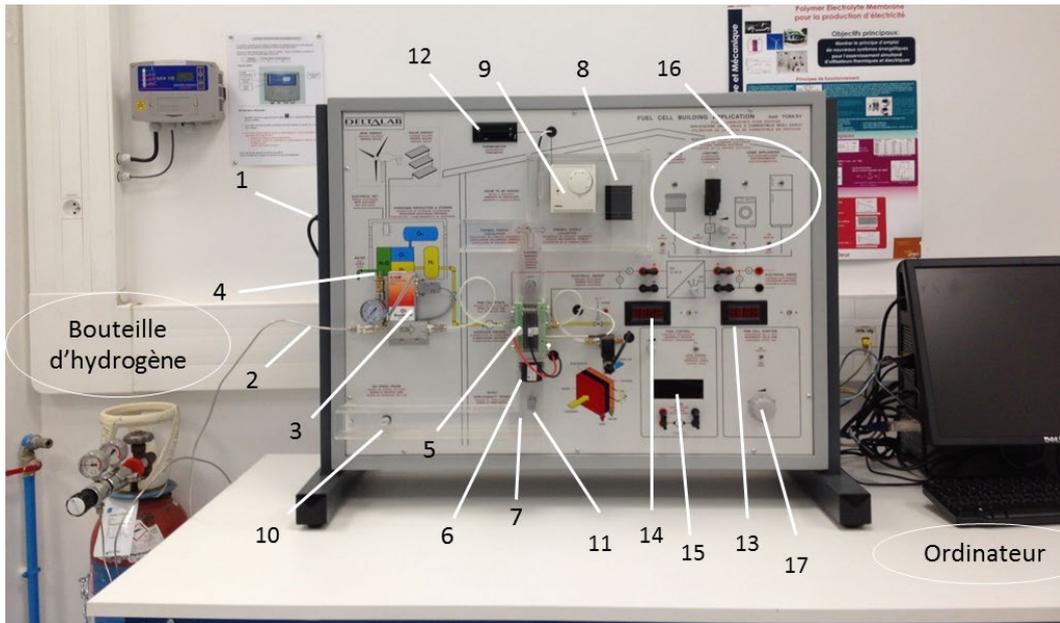
Une des caractéristiques particulières observées dans ce montage fait référence à l'apport d'hydrogène à la cellule au niveau de l'anode. Deux différentes configurations se présentent : celle à flux continu ou bien celle à flux *dead-end*. En ce qui concerne ce TP, on adopte la configuration à flux *dead-end*, où une électrovanne normalement fermée est montée à la sortie de la pile, ce qui implique que le système est fermé pendant le fonctionnement normal et seule la quantité d'hydrogène requise par les cellules circule dans la pile. Cette configuration permet de déterminer le rendement du système sur la base des puissances produites en régime stationnaire. L'électrovanne une fois ouverte permet d'évacuer l'eau qui aurait pu diffuser par osmose inverse (augmentation de la polarisation de concentration).

Le choix des paramètres pour les exercices a pour objectif de permettre l'observation et la mesure de la tension en fonction de la densité de courant pour différentes conditions expérimentales.

## 2. Description de l'installation

Le système FCBA/EV constitue une application d'une pile à combustible ayant comme électrolyte une membrane polymère, appelé *Proton Exchange Membrane (PEM)*, et destiné à la production d'électricité et de chaleur combinée en utilisant comme réactifs l'hydrogène et l'oxygène disponible dans l'air. La structure du système est décrite ci-après et illustré par la Figure 15.

- 1 pile (*stack*) *Polymer Electrolyte Membranes Fuel Cell (PEMFC)* constituée par une série de 4 cellules élémentaires, avec une puissance nominale de 20W, une puissance maximale de 25W et une plage de tension de 1,8 à 3,8V (soit par cellule de 0.45V à 0.95V). La surface de la membrane concernée par la réaction électrolytique est de 27,64cm<sup>2</sup>
- Une ligne d'alimentation d'hydrogène avec un débitmètre électronique et une électrovanne de purge
- Un ventilateur pour l'alimentation en air et pour le refroidissement, avec contrôle de la vitesse et affichage numérique de la tension appliquée
- un mini convertisseur de tension d'entrée de 2-10V (CC) et de tension de sortie de 12V (CC) ;
- La mesure numérique de la tension et du courant à la sortie de la cellule et dans les différents simulateurs de charge électrique
- Une charge électrique variable pouvant être connectée individuellement : élément chauffant à résistance qui simule un apport de chauffage électrique dans un local à échelle réduite, incluant des lampes et la simulation de charges électriques de type électroménager
- Un thermostat de contrôle de la température situé dans le local à échelle réduite ;
- La fermeture/ouverture de conduit d'air chaud grâce à un moteur CA et à deux interrupteurs de butée
- la mesure de la température grâce à une sonde avec indication numérique
- La mesure de la vitesse de l'air avec une sonde à fil chaud dans le conduit qui alimente la cellule
- Un capteur de température et d'humidité de l'air à l'entrée et à la sortie de la cellule (circuit cathode)
- Une alimentation en hydrogène à partir d'un réservoir sécurisé et un détendeur de pression
- Un système d'acquisition sur ordinateur pour le traitement informatisé des valeurs relevées de températures, de courant et de tension, de la vitesse du ventilateur et du flux d'hydrogène



- |                                     |   |
|-------------------------------------|---|
| 1. Alimentation électrique          | 10. Sonde de vitesse de l'air à fil chaud       |
| 2. Alimentation en hydrogène        | 11. Sonde de température et d'humidité de l'air |
| 3. Débitmètre                       | 12. Thermomètre                                 |
| 4. Vanne de décharge de l'hydrogène | 13. Ampèremètre                                 |
| 5. Pile de cellules ST20            | 14. Voltmètre                                   |
| 6. Ventilateur                      | 15. Afficheur du ventilateur                    |
| 7. Voie d'introduction de l'air     | 16. Utilisateurs électriques                    |
| 8. Local chauffé                    | 17. Rhéostat                                    |
| 9. Thermostat ambiant               |   |

Figure 16 – Description de l'installation.

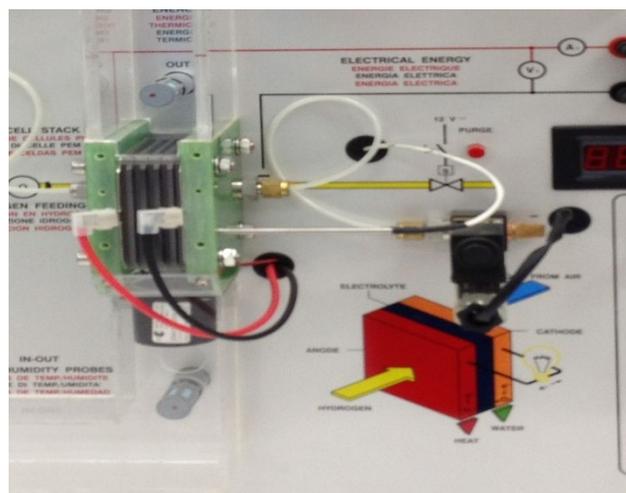


Figure 17 – Zoom sur la cellule.

En utilisant un système d'acquisition par ordinateur, il est possible d'effectuer un contrôle pendant les processus des principaux paramètres caractérisant la pile. Le système d'acquisition utilisé par le FCBA/EV fait l'acquisition des signaux analogiques suivants :

1. Tension produite par la pile, qui est la somme de chacune des tensions entre la cathode et l'anode de chaque élément constituant de la pile (stack) (V);
2. Courant circulant dans le circuit de la pile en fonction de la charge électrique (A);
3. Température d'air à l'entrée de la cellule (°C);
4. Humidité d'air à l'entrée de la cellule (%);
5. Température d'air à la sortie de la cellule (°C);
6. Humidité d'air à la sortie de la cellule (%);
7. Consommation d'hydrogène par la cellule (ml/min);
8. Vitesse d'air et le débit d'air à l'entrée de la cellule (m/s et m<sup>3</sup>/s, respectivement);
9. Température de la pile (°C).

Ces données peuvent être visualisées et traitées grâce à un Logiciel écrit sous visual basic. Il est possible d'obtenir les grandeurs dérivées suivantes:

- La puissance électrique, calculée par :

$$\text{Puissance électrique} = V \cdot I \quad \text{Équation 24}$$

V est la tension dans la pile et I le courant qui la traverse.

- La puissance thermique du flux d'air à la cathode, calculée par :

$$\text{Puissance thermique} = \Delta h \cdot \rho_{\text{air}} \cdot \dot{V}_{\text{air}} \quad \text{Équation 25}$$

$\Delta h$  = saut entalpique entre l'entrée et la sortie (kJ/kg)

$\rho_{\text{air}}$  = densité de l'air dans les conditions d'entrée (kg/m<sup>3</sup>)

$\dot{V}_{\text{air}}$  = débit d'air fourni par le ventilateur (m<sup>3</sup>/s)

- La puissance d'hydrogène, calculée par :

$$\text{Puissance d'hydrogène} = \dot{V}_{\text{H}_2} \cdot \frac{m_{\text{H}_2}}{V_m} \cdot H_i \quad \text{Équation 26}$$

$\dot{V}_{\text{H}_2}$  = débit d'hydrogène (m<sup>3</sup>/s)

$H_i$  = pouvoir calorifique d'hydrogène (kJ/kg)

$m_{\text{H}_2}$  = masse molaire d'hydrogène (kg/mole)

$V_m$  = volume molaire d'hydrogène (m<sup>3</sup>/mole)

- Rendement électrique, calculé par :

$$\eta_{\text{électrique}} = \left( \frac{\text{Puissance électrique}}{\text{Puissance d'hydrogène}} \right) \quad \text{Équation 27}$$

la puissance électrique et puissance d'hydrogène sont des valeurs mesurées et affichées par le Logiciel, et pas les valeurs théoriques calculées ultérieurement par le moyen des formules.

- Rendement total, calculé par :

$$\eta_{\text{global}} = \left( \frac{\text{Puissance thermique} + \text{Puissance électrique}}{\text{Puissance d'hydrogène}} \right) \quad \text{Équation 28}$$

### Le système d'acquisition

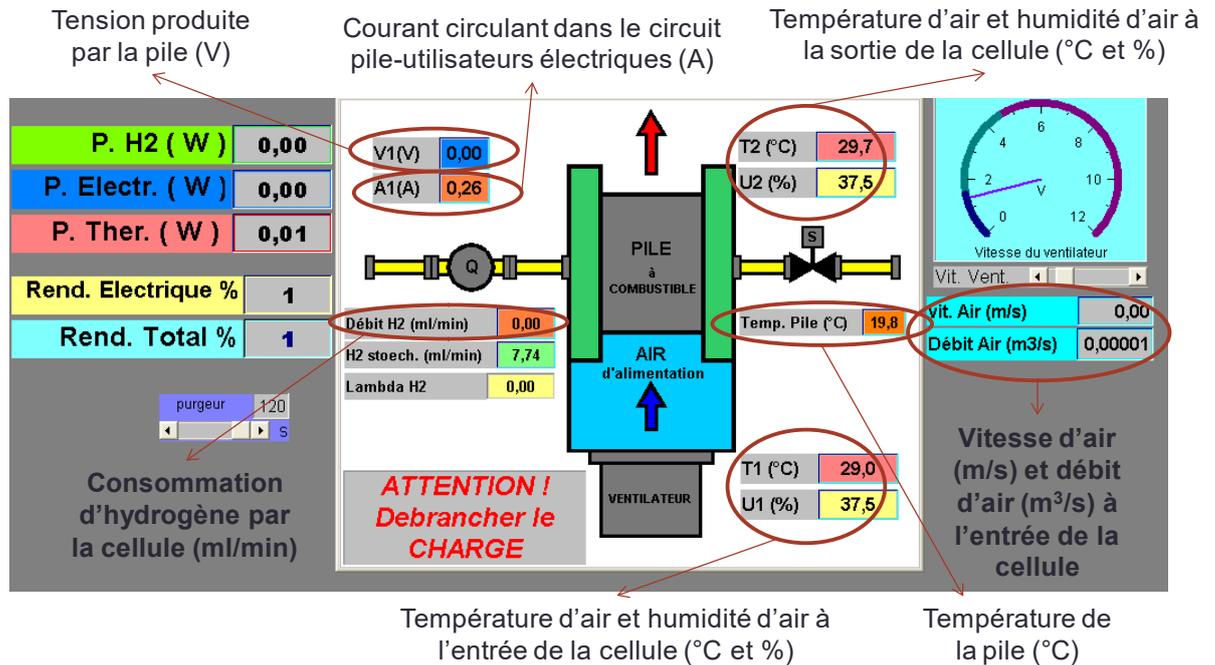


Figure 18: Paramètres mesurés et présentés sur la fenêtre d'acquisition

### 3. Instructions pour le fonctionnement

#### a) Mise en route et mise en conditionnement hydrique de la cellule

Avant toute expérimentation, on devra s'assurer que la pression d'hydrogène soit augmentée lentement sans jamais dépasser les **2 bars absolus**, afin d'éviter l'endommagement de la cellule. La valeur de pression optimale recommandée est de 1,6 bar. Donc, pour la mise en service du banc et chaque fois qu'on met en marche le système, on doit procéder comme suit :

- Démarrer l'installation ;
- Appuyer sur le bouton de l'électrovanne de purge pendant 1 seconde ;
- Alimenter la cellule en hydrogène à une pression d'environ 1,6 bar et appuyer au nouveau sur le bouton de purge pendant quelques secondes pour éliminer les impuretés de la cellule ;
- Suivre les instructions indiquées dans la liste de contrôle (*check-list*)

La purge a pour but d'effectuer une distribution homogène de l'hydrogène sur les voies des cellules et donc de permettre le bon fonctionnement du système. Pendant l'utilisation, la purge s'effectue automatiquement à l'aide du logiciel. Les dernières cellules tendent à s'appauvrir en hydrogène et à inverser leur propre fonctionnement en créant une charge électrique opposée, donnant lieu à un potentiel négatif, qui peut compromettre la structure de la membrane.

Si les vérifications prévues dans la *check-list* donnent des résultats positifs, on peut donc poursuivre avec le réchauffement de la cellule. Pour assurer l'obtention des courbes caractéristiques réelles, on doit avant tout garantir que les membranes soient **correctement humidifiées**, ce qu'on fait par moyen d'une période de 10 à 15min de réchauffage, selon la procédure suivante:

- Avec le rhéostat mise en marche, on impose un courant de 1A ;
- Avec le variateur de tension du ventilateur, on impose une tension de 1V ;

- Avec le réducteur de pression, on impose une pression d'hydrogène comprise entre 1,3 et 1,9 bar (préférentiellement à 1,6bars) ;

**Ne continuer l'expérience que si, et seulement si, la température de la pile ne dépasse pas les 30°C et la tension hors charge (à vide) ne dépasse pas les 3,5V.** Si on est dans ces conditions susmentionnées, on peut poursuivre avec la réalisation des essais.

b) Procédure à suivre entre l'un exercice et l'autre

Après la réalisation d'une première expérience, le système ne sera plus dans son état d'équilibre, on se trouvera à des hautes valeurs de courant et de température de la cellule. Pour que le système puisse retourner à son état initial de façon à ne pas endommager la cellule et pour l'obtention de données comparatives, il faut suivre les recommandations suivantes :

- Diminuer progressivement le courant d'environ 0,5A en 0,5A jusqu'à 1A pendant qu'on diminue la tension du ventilateur d'1V en 1V jusqu'à 1V.
- Effectuer la procédure de réchauffement de la cellule : pression d'hydrogène à 1,6bars, rhéostat à 1A et tension du ventilateur à 1V par environ 10min.

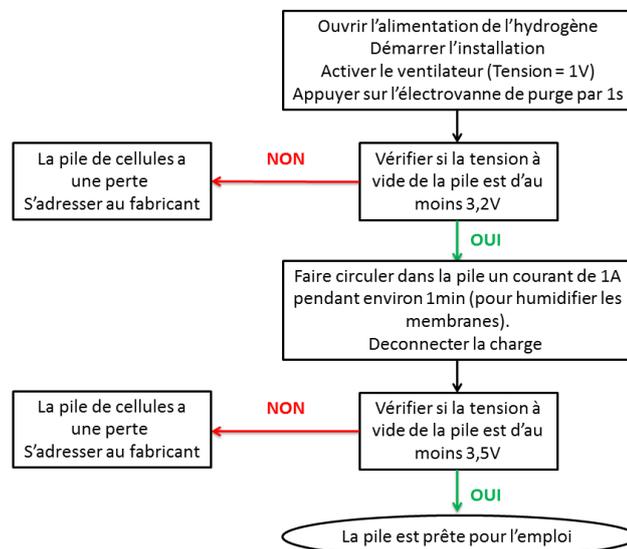


Figure 19: Procédure entre chaque exercice

c) Procédure pour arrêter

La procédure pour éteindre l'installation suivre les mêmes étapes déjà décrites lors de la procédure entre l'un essai et l'autre, sauf que cette fois-ci on doit fermer la bouteille d'hydrogène. Les étapes sont les suivantes :

- Fermer la bouteille d'hydrogène (pas la vanne de régulation de pression) ;
- Au logiciel, mettre le temps de purge en 5s ;
- Diminuer le courant de 0,5A en 0,5A à mesure qu'on diminue la tension du ventilateur de 1V en 1V ;
- Il faut s'assurer qu'il n'y a plus d'hydrogène dans les lignes avant de fermer la vanne de régulation de pression : si l'on purge la ligne et on n'entend aucun bruit, c'est-à-dire que les lignes sont évacuées.

## C. Etudes expérimentales

Les exercices proposés vont permettre d'obtenir les courbes caractéristiques d'une pile à combustible de type PEM; courbes de puissance, valeurs de rendement et d'autres caractéristiques seront étudiés. Pour permettre la comparaison entre les différents types de cellules ou entre une cellule et d'autres générateurs électriques, on a recourt à un paramètre appelé *courant spécifique* ou *densité de courant* exprimé en mA/cm<sup>2</sup>. La surface de la membrane concernée par la réaction électrolytique est de 27,64cm<sup>2</sup>. Les conditions d'alimentation d'hydrogène sont des conditions à flux « *dead-end* ».

NB : les résultats proposés sont donnés à titre d'exemple de tendance. Il conviendra de considérer des écarts possibles en fonction des conditions expérimentales du moment.

### 1. Etude de la caractéristique tension-densité de courant

#### a) Objectifs

On vous demande d'effectuer une étude des caractéristiques courant-tension en fonction du débit d'hydrogène (carburant) ainsi qu'en fonction du débit d'air (comburant). Ce balayage doit vous permettre d'identifier la région de polarisation d'activation

Recommandations: il n'est pas possible d'atteindre les grandes valeurs de densité de courant pour éviter une dégradation prématuré. Il est donc difficile de représenter les régions de polarisation Ohmique et par Concentration ainsi seule la région de polarisation par Activation sera représentée.

#### b) Procédure et résultats

#### Schéma général

Question 1- Une courbe caractéristique courant-tension d'une cellule PEM est présentée sur la figure suivante. Identifier les trois régions de polarisation et définir à quoi correspondent les limites de tension identifiés par les lignes rouge et verte.

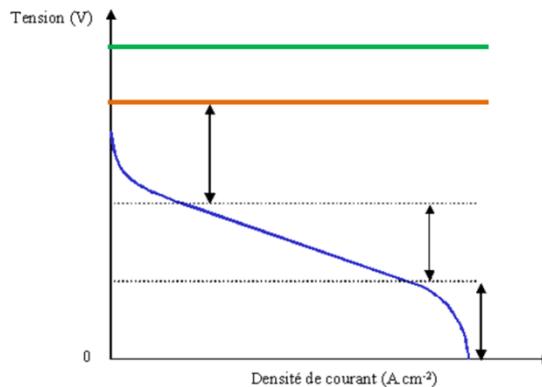


Figure 20 – Allure d'une courbe tension-densité de courant pour une cellule PEMFC.

#### Etude du débit de carburant P<sub>H2</sub>=1.3 bar et 1.6 bars absolues

Après la vérification de la check-list et de la période de réchauffement (procédure B.3.b), en utilisant les instruments fournis avec l'équipement, enregistrer les paramètres fonctionnels de la cellule en procédant comme suit :

- Activer l'électrovanne de purge pendant 1 seconde ;
- Au logiciel, régler le temps de purge à 120s. Après chaque ouverture de l'électrovanne, il faut attendre 1 minute avant de noter les valeurs.
- Régler l'alimentation du ventilateur à 6V, en effectuant la commande par le bouton de variation de la tension ;
- Imposer la valeur de pression d'hydrogène à 1bar en utilisant le réducteur de pression ;

- Déconnecter la charge de la cellule, attendre environ 1min pour que le système s'équilibre, puis noter la valeur de tension sans charge ;
- Mettre le rhéostat en marche, après avoir attendu pendant environ 1min, noter les valeurs demandées au tableau ;
- A l'aide du rhéostat, augmenter la charge progressivement par pas de 0,5A, toujours en attendant 1 minute entre une mesure et l'autre. ATTENTION : Ne pas dépasser les **6A**.
- Pour éviter de grosses surchauffes et déshumidifications des membranes, ne pas rester trop longtemps sur la même valeur de mesure, surtout si l'on dépasse les 4A.
- Arrêter les mesures si la tension de la pile descend en dessous de 1,6V, ou si la température de la pile mesurée à l'aide de la sonde PTC dépasse des 45°C.
- **Effectuer la procédure (procédure B.3.b)**

On répétera la même séquence réalisée précédemment mais cette fois pour un apport d'hydrogène en changeant la pression d'1 bar à 1,6bars. On donne ci après un exemple de résultat ou  $P_{H_2}$  varie entre 1 et 1.7bars.

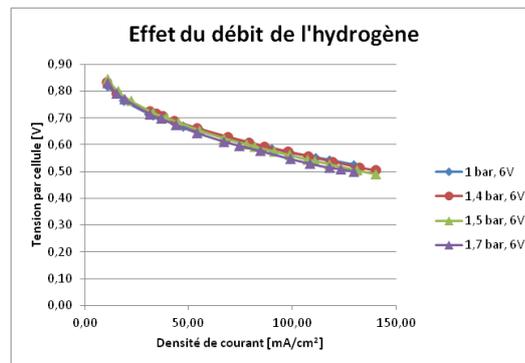


Figure 21 – Effet de la pression d'hydrogène sur les courbes caractéristiques.

Question 2- Que remarque t'on sur le comportement de la courbe de tension par rapport à la densité de courant ? Et sur la valeur de tension à vide ?

Question 3- Expliquer pourquoi il existe une chute de tension lorsque le débit d'hydrogène augmente.

### Etude du débit de comburant 3V et 6V avec $P_{H_2}=1.6bars$

On vous demande d'investiguer l'influence de l'apport d'oxydant en changeant la tension du ventilateur de 6V (essais déjà réalisé) et pour 3V.

- Activer l'électrovanne de purge pendant 1 seconde ;
- Au logiciel, régler le temps de purge à 120s. Après chaque ouverture de l'électrovanne, il faut attendre 1 minute avant annoter les valeurs, de façon qu'on n'a plus qu'un minute pour enlever les données;
- Régler l'alimentation du ventilateur à **3V**, en effectuant la commande par le bouton de variation de la tension ;
- Imposer la valeur de pression d'hydrogène à 1,6 bar en utilisant le réducteur de pression ;
- Déconnecter la charge de la cellule, attendre environ 1min pour que le système s'équilibre, puis annoter la valeur de tension sans charge ;
- Mettre le rhéostat en marche, après avoir attendu pendant environ 1min annoter les valeurs demandées au tableau ;

- A l'aide du rhéostat, augmenter la charge progressivement par pas de 0,5A, toujours en attendant 1 minute entre une mesure et l'autre. ATTENTION : Ne pas dépasser les 3A.
- Pour éviter de grosses surchauffes et déshumidifications des membranes, ne pas rester trop longtemps sur la même valeur de mesure, surtout si l'on dépasse les 4A.
- Arrêter les mesures si la tension de la pile descend en dessous de 1,6V, ou si la température de la pile mesurée à l'aide de la sonde PTC dépasse des 45°C.
- **Effectuer la procédure pour arrêter l'installation (B.3.c).**

24

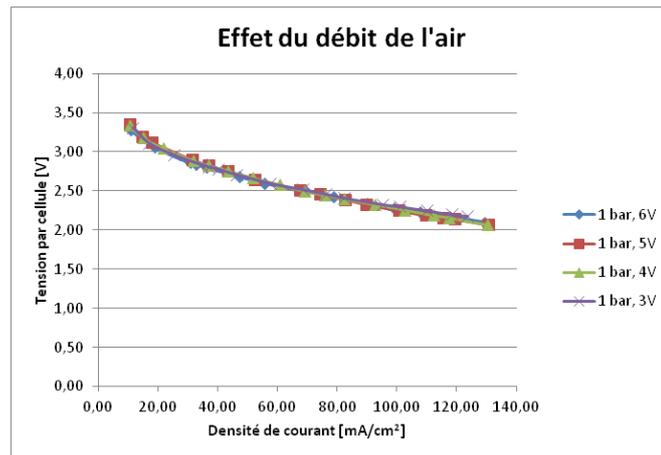


Figure 22 - Effet de la tension du ventilateur sur les courbes caractéristiques.

Question 4- Pourquoi l'augmentation du débit d'air n'a pas d'influence sur les caractéristiques générales?

## 2. Etude des rendements de l'installation

### a) Objectifs

On s'intéresse maintenant à l'évolution de divers rendements décrits dans les paragraphes précédents : le rendement global (équation 28), le rendement électrique (équation 27), le rendement faradique (équation 22), le rendement électrique au sens exergétique (équation 12) et le rendement électrique théorique (équation 20). L'analyse des résultats se fera aussi en prenant en compte les performances des capteurs et de la façon dont les grandeurs sont mesurées (principe, capteur, conditions d'utilisation).

Le rendement électrique et le rendement global distinguent le cas d'une production d'énergie électrique sans utilisation de la chaleur produite et d'un cas de fonctionnement avec cogénération, où l'on profite de la puissance thermique produite.

### b) Procédure et résultats

#### **Rendement total**

Question 5- Calculer les différents rendements. Les tracer dans un même graphique en fonction de la densité de courant.

**Remarque** : A cause des incertitudes concernant les valeurs de la puissance thermique mesurées, les valeurs de rendement global mesurées peuvent être imprécises.

Question 6- Pourquoi le rendement global n'est pas égal au rendement électrique théorique ?

Question 7- Si l'on utilise cette pile à combustible seulement pour produire d'énergie électrique, à quelles valeurs de densité de courant on doit travailler ? Justifier.

Question 8- Si l'on utilise cette pile à combustible pour produire d'énergie électrique et de la chaleur (cas de cogénération), à quelles valeurs de densité de courant on doit travailler ? Justifier.

25

**Courbes de Rendement 1bar, 6V**

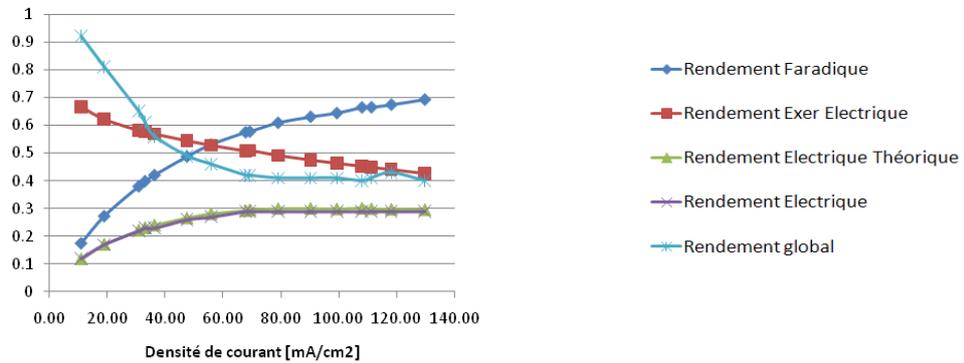


Figure 23 – Courbes de rendement pour la condition de pression d'hydrogène à 1 bar et de tension du ventilateur à 6V.

**Courbes de Rendement 1 bar, 3V**

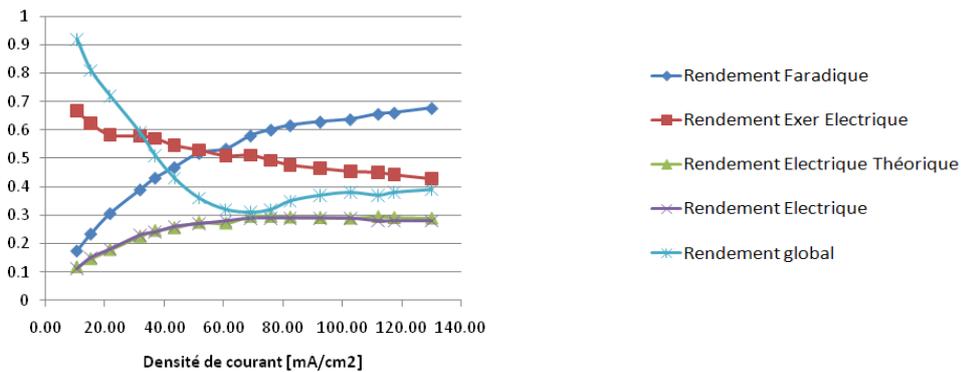


Figure 24 - Courbes de rendement pour la condition de pression d'hydrogène à 1 bar et de tension du ventilateur à 3V.

**Courbes de Rendement 1,7 bar, 6V**

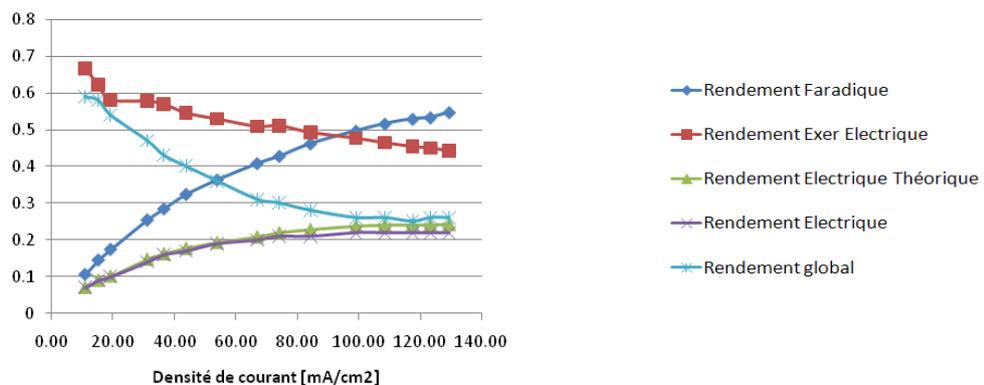


Figure 25 - Courbes de rendement pour la condition de pression d'hydrogène à 1,7 bar et de tension du ventilateur à 6V.

### 3. Etude des courbes de puissance électrique et rendement électrique

**Objectif :** Vérifier l'influence de la pression d'hydrogène et de la tension du ventilateur sur la production d'énergie électrique et sur le rendement électrique.

Les courbes de puissance électrique sont obtenues en traçant les valeurs de puissance enlevées par rapport aux valeurs de densités de courant calculées.

Question 9: Commenter en basant sur les résultats obtenus l'influence de la pression d'hydrogène et de la tension du ventilateur sur la production d'énergie électrique et sur le rendement électrique.

26

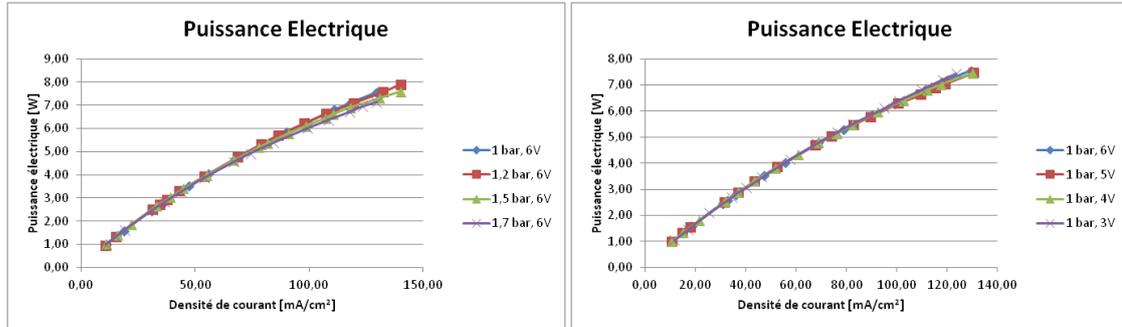


Figure 26 - Effet de la pression d'hydrogène et le débit d'air sur la puissance électrique

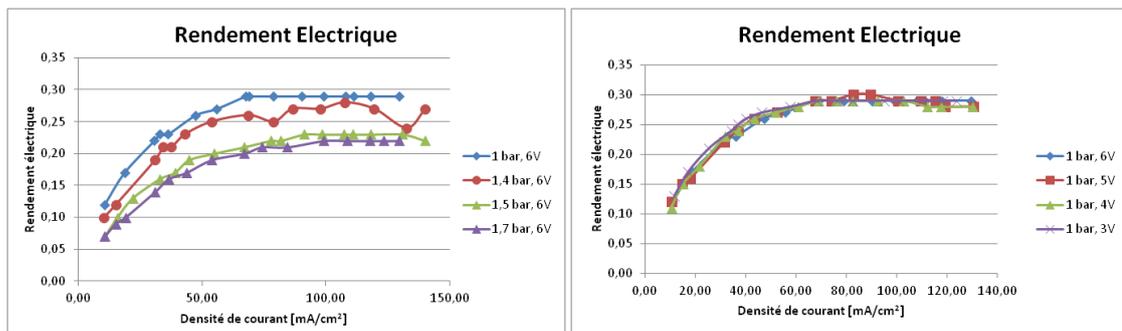


Figure 27 - Effet de la pression d'hydrogène et le débit d'air sur le rendement électrique

### 4. Etude du coefficient d'utilisation

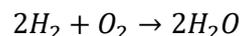
**Objectif :** Tracer les courbes des coefficients d'utilisation de combustible et d'air. Comparer ses ordres de grandeur. Il faut noter que l'air a une fonction aussi de refroidissement de la cellule.

Le coefficient d'utilisation de l'oxydant (air), s'exprime par la relation :

$$U_a = \frac{\dot{m}_{air,consommé}}{\dot{m}_{air}}$$

Où le débit d'air est mesuré par le débitmètre à l'entrée de la canalisation et est affiché par le Logiciel. Pour une tension du ventilateur donnée, on peut considérer le débit constant pendant les réalisations des différents essais.

Exprimons le débit d'air consommé, partons de l'équation de bilan d'atome:



La charge circulant dans le circuit extérieur vaut, pour chaque mole d'oxygène qui réagit :

$$Charge = 4F \times moles \ d'O_2$$

Si l'on divise le courant I (coulomb/s) par la charge F (coulomb/mole) de 4 électrons pour une mole d'oxygène, avec N le nombre de cellules, on obtient :

$$\dot{n}_{O_2\text{consommé}} = \frac{NI}{4F} \quad \text{en moles/s}$$

Si l'on introduit  $V_c$  la tension de la cellule et  $P_e$  la puissance électrique générée, on obtient :

$$P_e = V_c I N$$

En remplaçant le courant calculé à l'aide de l'expression précédente dans la formule du débit d'oxygène, on obtient :

$$\dot{n}_{O_2\text{consommé}} = \frac{P_e}{4V_c F} \quad \text{en moles/s}$$

En exprimant enfin le débit en kg/s , on a :

$$\dot{m}_{O_2,\text{consommé}} = \frac{8,29 \cdot 10^{-8} P_e}{V_c}$$

Par référence à l'air et sachant que la masse molaire de l'air correspond à  $28,97 \cdot 10^{-3}$  kg/mole et que la fraction molaire de l'oxygène dans l'air est de 0,21, on obtient :

$$\dot{m}_{\text{air}\text{consommé}} = \frac{3,57 \cdot 10^{-7} P_e}{V_c}$$

De façon analogue, on pourra calculer le coefficient d'utilisation du combustible, c'est-à-dire pour l'hydrogène :

$$U_c = \frac{\dot{m}_{H_2,\text{consommé}}}{\dot{m}_{H_2}}$$

Cette fois-ci on a une charge circulant dans le circuit extérieur est de  $2Fx$  moles d' $H_2$ , se façon que :

$$\dot{n}_{H_2\text{consommé}} = \frac{nI}{2F} \quad \text{en moles/s}$$

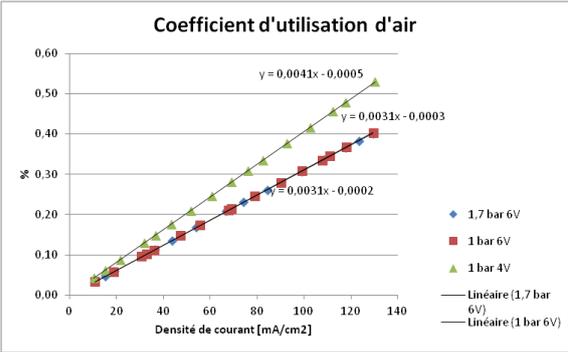
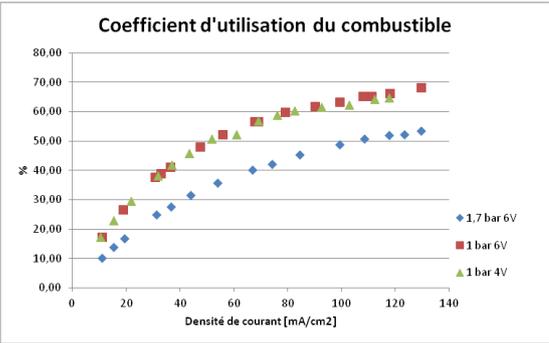
$$\dot{n}_{H_2\text{consommé}} = \frac{P_e}{2V_c F} \quad \text{en moles/s}$$

$$\dot{m}_{H_2,\text{consommé}} = \frac{1,05 \cdot 10^{-8} P_e}{V_c}$$

Pour la mesure du débit d'air  $\dot{m}_{\text{air}}$  ; on utilise la formule suivante  $\dot{m}_{\text{air}} = V_{\text{air}} S \rho$  (avec  $\rho = 1.2 \text{ kg/m}^3$ ). Pour le débit d'hydrogène  $\dot{m}_{H_2}$ , on calcul le débit massique de l'hydrogène arrivant à la pile par le produit de la densité d'hydrogène ( $0,0084 \text{ kg/m}^3$  dans les conditions standard) et le débit volumique fournit par la mesure.

Questions 10:

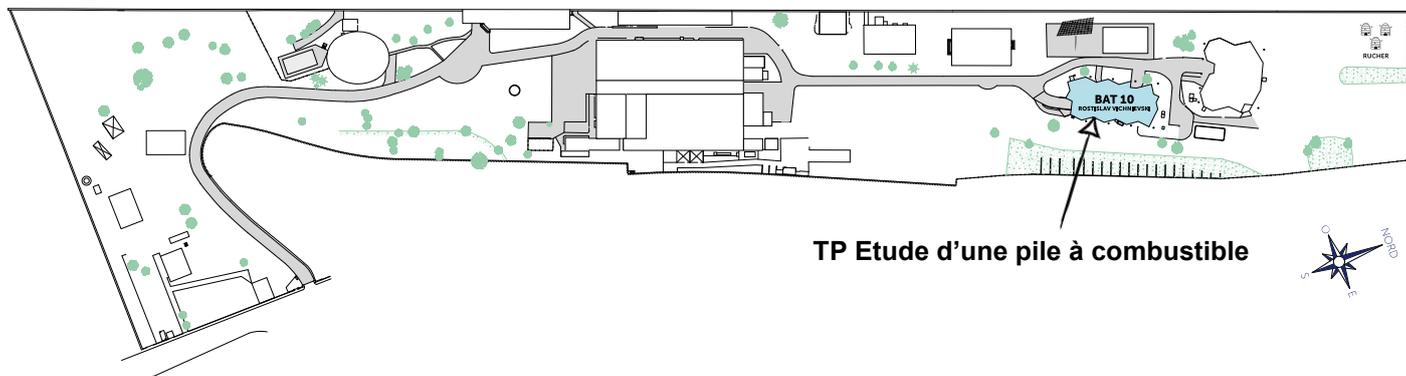
- Comparer l'ordre de grandeur des coefficients d'utilisation du combustible et de l'air. Pourquoi c'est logique que le coefficient d'utilisation d'air soit beaucoup plus inférieur à celui du combustible ?
- Quelles sont les possibles pertes qui ne permettent pas que le coefficient d'utilisation du combustible soit proche de l'unité ?





# SORBONNE UNIVERSITE

Faculté des Sciences et Ingénierie  
Plateforme d'Ingénierie Expérimentale  
Campus de Saint-Cyr-l'Ecole  
2 Place de la Gare de Ceinture  
78210 SAINT CYR L'ECOLE



TP Etude d'une pile à combustible

Campus de St Cyr - Sorbonne Université

## REJOINDRE LA PLATEFORME

Accès en **train**, arrêt Saint Cyr :

Depuis Montparnasse, ligne N

Depuis La Défense, ligne U

Depuis Saint Michel ND, RER C

Prévoir ensuite 10 mn de **marche**

Accès en **voiture** :

Coordonnées GPS

N 48.80217°

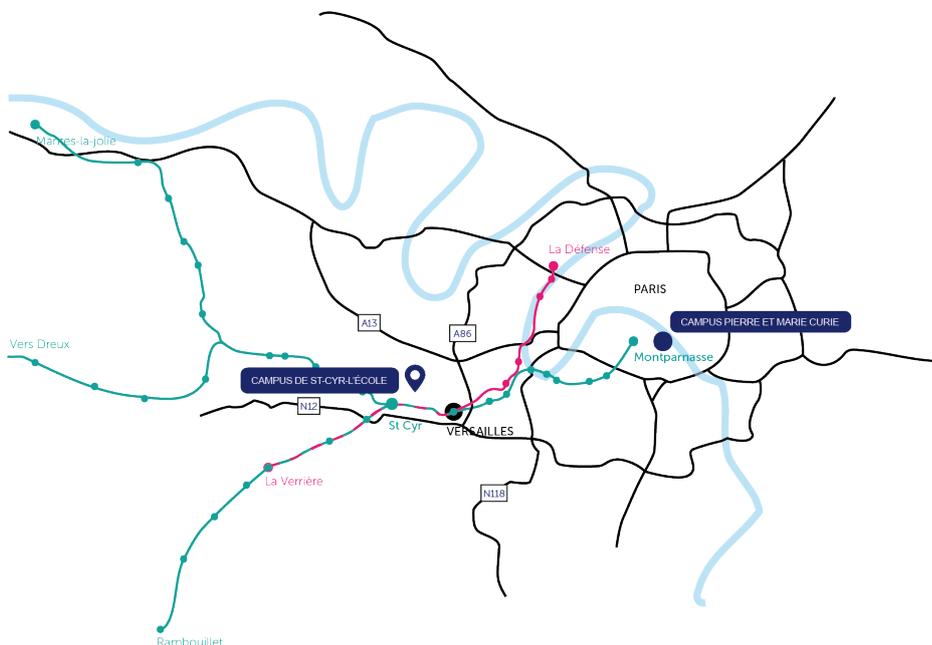
E 2.07639

Accueil campus

01.44.27.95.64

Informations et réservations TP

01.44.27.95.22



→ [www.sorbonne-plateforme-ingenierie-experimentale.fr](http://www.sorbonne-plateforme-ingenierie-experimentale.fr)