

La Pile à combustible

Dr. Malgorzata Adamowska

Objectifs du TP

Le système FCBA/EV constitue une application d'un "*stack*" (en français, pile ou accumulation) de cellules à combustible ayant un électrolyte polymère, appelé PEM (Proton Exchange Membranes), destiné à la production de courant électrique et de chaleur combinés.

Cette application à échelle réduite a pour but de montrer le principe d'emploi de ces systèmes pour l'asservissement simultané d'utilisateurs thermiques et électriques dans le domaine civil.

On approfondira aussi les concepts permettant de connaître de l'emploi de l'hydrogène comme combustible fondamental dans le processus de transformation énergétique.

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

Un petit local que l'on doit chauffer, délimité par une structure réalisée avec un matériau transparent, est doté d'un thermostat pour contrôler l'apport de chaleur au système à chauffer et son éventuelle évacuation grâce à une vanne déviatrice, tout ceci afin de mettre en relief l'emploi du système combiné de production électrique et thermique dans les futures réalisations des cellules à combustible appliquée au bâtiment.

En outre, la structure FCBA/EV est tout particulièrement prévue pour s'insérer dans un système modulaire, permettant d'obtenir une évaluation globale du processus de transformation de l'énergie à partir de la composante primaire fournie, par exemple, par le soleil ou le vent, mais aussi par des systèmes hydrauliques, jusqu'à arriver à l'énergie électrique communément utilisée suite à une série de transformations successives.

Objectifs du TP

Outre qu'à l'analyse énergétique, l'équipement FCBA/EV se prête principalement à l'évaluation théorique/fonctionnelle des cellules à combustible de type PEM, permettant ainsi d'apprécier leurs principales caractéristiques fonctionnelles et leurs potentialités d'application. En plus, il sera possible, en utilisant un programme d'acquisition par ordinateur, d'effectuer un contrôle pendant le processus des principaux paramètres caractérisant la cellule, tels que :

- la tension produite par la pile (*stack*) de cellules tout entière, qui est la somme de chacune des tensions entre la cathode et l'anode de chaque élément constituant la pile ;
- le courant circulant dans le circuit pile-utilisateurs électriques en fonction de la charge électrique ;
- la température de l'air à l'entrée de la cellule (vecteur de transport de l'oxygène nécessaire à la réaction électrochimique) ;
- l'humidité relative de l'air à l'entrée de la cellule ;
- la température de l'air à la sortie de la cellule ;
- l'humidité relative de l'air à la sortie de la cellule ;
- la consommation d'hydrogène de la part de la cellule ;
- la vitesse de l'air et le débit à l'entrée de la cellule.

Rappels Théoriques

- Thermodynamique et Pile
 - Bases
 - Notions de rendement ou efficacité
 - Courbes caractéristiques

Thermodynamique fondamentale des cellules à combustible

Comme toutes les machines transformant une forme d'énergie en une autre forme, les générateurs chimiques-électriques obéissent eux aussi aux lois fondamentales de la physique, en particulier à celles 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.

On calcule facilement la puissance électrique et l'énergie obtenue à l'aide des équations :

$$P = V \cdot I \quad [W]$$

$$E = V \cdot I \cdot t \quad [J]$$

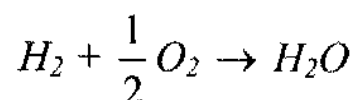
Thermodynamique réversible

Dans les cellules à combustible, un des termes les plus importants est l'énergie libre de Gibbs. On l'indique habituellement par G.

Le travail électrique net, produit par le système en conditions isothermes (et avec une pression extérieure constante), est égal à l'énergie libre de formation des produits de réaction, c'est-à-dire à la différence entre l'énergie libre (de Gibbs) des produits, moins celle des réactifs :

$$\Delta G^0 = G^0 (\text{produits}) - G^0 (\text{réactif})$$

Examinons les cas de l'eau que l'on obtient grâce à la relation:



En tenant compte des valeurs molaires standard et en les indiquant par ($\bar{}$):

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

S'il n'y avait pas de pertes dans la cellule à combustible - c'est-à-dire que si le processus était réversible -, toute l'énergie libre de Gibbs se transformerait en électricité.

Ceci permet de définir la tension maximale en circuit ouvert dans un processus réversible comme E_{rev} .

$$E_{rev} = \frac{-\Delta g f}{2F}$$

F = charge d'une mole d'électrons = 96485 Coulombs

Par exemple, si l'on considère un processus réversible avec combustible hydrogène et oxygène dans les conditions de pression standard de 0,1 Mpa, dans une cellule à combustible travaillant à 100°C

($\Delta g f = -225.3 \text{ kJ/mol}$) on obtiendra :

$$E_{rev} = \frac{225.300}{2 * 96485} = 1.17 \text{ volt}$$

Etat physique eau produite	Température (°C)	$\Delta g f$ (kJ/mole)	E_{rev} (V)	Efficienc 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

Pratiquement, la tension réalisable est bien inférieure à cause des facteurs d'irréversibilité du processus.

La définition d'énergie libre de Gibbs est très commune dans les processus chimiques, mais vu que dans une cellule à combustible l'hydrogène est "brûlé" pour produire de l'électricité, on pourra dire de façon cohérente que l'efficacité est le rapport entre l'énergie électrique obtenue et l'énergie fournie avec le combustible.

Pour cela, on recourt à la définition de pouvoir calorifique du combustible, ou plus précisément, à la variation d'enthalpie de formation molaire du combustible dans les conditions standard ($P= 0,1$

MPa, $T= 298,15$ K), $\Delta \bar{h}_f$

on pourra définir l'efficacité d'une cellule à combustible comme suit :

$$\eta_{rev} = \frac{\text{énergie électrique produit par mole de combustible}}{-\Delta \bar{h}_f}$$

Si l'on considère $\Delta \bar{h}_f$ on peut distinguer deux valeurs différentes :

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

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

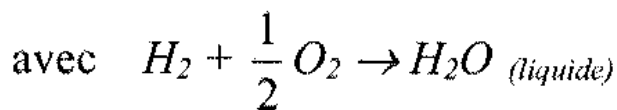
où le signe - indique une réaction avec développement de chaleur (réaction exothermique), selon la forme - vapeur ou liquide - prise par l'eau provenant de la réaction de recombinaison de l'hydrogène avec l'oxygène. La différence entre les deux valeurs est l'enthalpie molaire de vaporisation = 44,01 kJ/mole.

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 :

$$E_{rev} = \frac{-\Delta h_f}{2F}$$

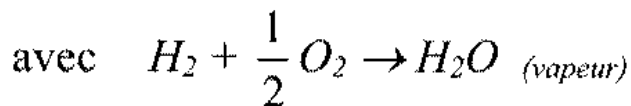
égal à

$$= 1,48 \text{ V, avec } \Delta H_f = -285,84 \text{ kJ/mole} = \text{HHV}$$



ou bien

$$= 1,25 \text{ V, avec } \Delta H_f = -241,83 \text{ kJ/mole} = \text{LHV}$$



En résumé, l'efficacité d'une cellule de type PEM correspond à :

$$\text{Efficacité} = \frac{V_c}{1.25} \times 100 \text{ (réf. LHV)}$$

En réalité, vu que pas tout le combustible introduit dans le système contribue à la conversion énergétique, on utilise un facteur de "by-pass" tenant compte de l'utilisation réelle du combustible.

$$\text{Efficacité limite (\%)} = \mu \frac{V_c}{1.25} \cdot 100\% \text{ (réf. LHV)}$$

$$\mu = 0,95 \text{ valeur communément adoptée.}$$

V_c – tension de cellule

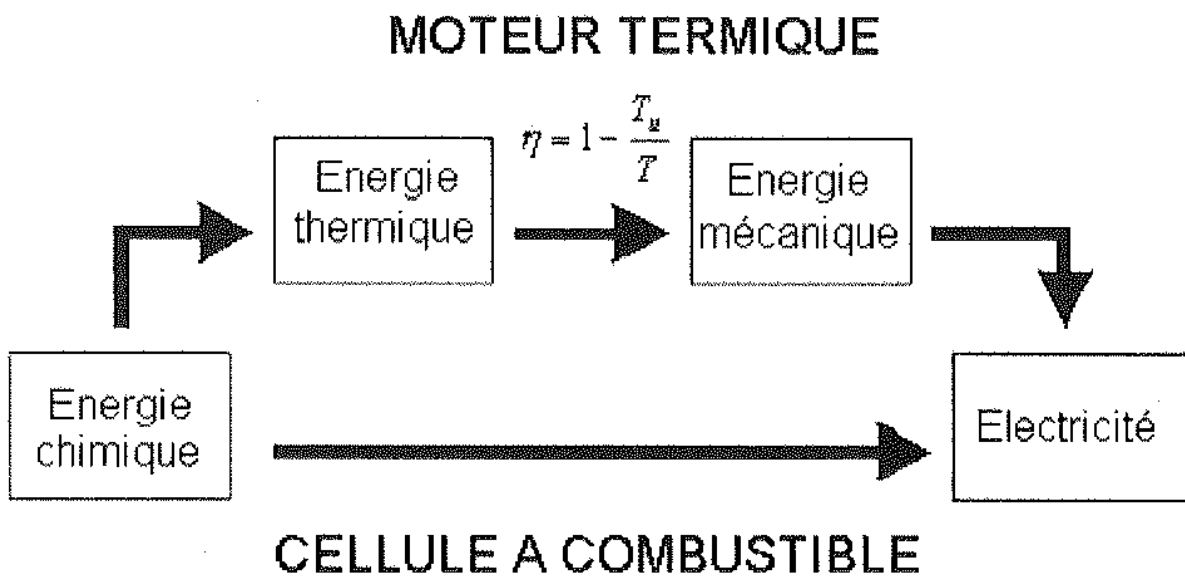
Efficacité maximale d'une cellule à combustible

Les cellules à combustible transforment l'énergie des combustibles en électricité.

Contrairement aux moteurs thermiques qui requièrent des cycles thermodynamiques intermédiaires, l'efficacité de conversion de la cellule n'est pas limitée 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, l'efficacité maximale vaut :

$$\eta = 1 - \frac{T_{\min}}{T_{\max}}$$

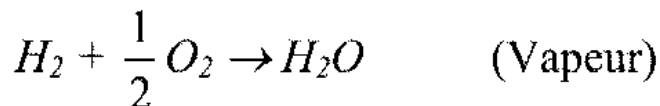
Les cellules à combustible actuelles offrent des efficacités électriques entre 40 et 65%.



Comment nous l'avons dit auparavant, le rendement thermodynamique (ou efficacité de Gibbs) est donné par l'équation suivante:

$$\eta_{\text{rev}} = \frac{\Delta G}{\Delta H} = 1 - T \frac{\Delta S}{\Delta H}$$

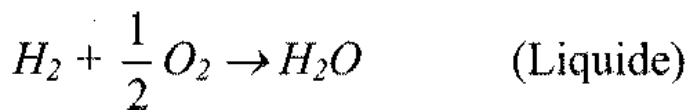
où si



l'on obtient

$$\Delta H = -241,83 \frac{\text{kJ}}{\text{mole}}$$

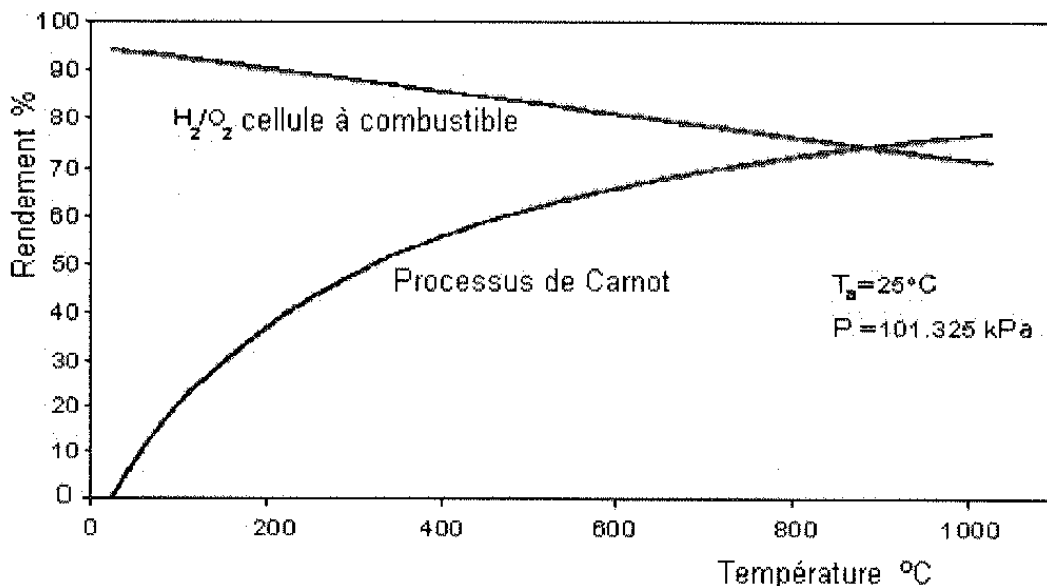
En revanche, si l'eau produite sort sous une forme liquide, la réaction est :



$$\Delta H = -285,84 \frac{\text{kJ}}{\text{mole}}$$

La différence entre ces deux valeurs est la chaleur latente (molaire) de l'eau de vaporisation.

Le graphique suivant montre le rendement du processus de Carnot comparé au cours du rendement $\eta_{rév}$ d'une cellule à combustible en fonction de la température.



Comparaison entre l'efficacité théorique d'une cellule à combustible et un processus de Carnot.

Une autre façon d'exprimer le rendement électrique (pour un processus irréversible) d'une cellule à combustible est, si l'on utilise W_{el} et LHV :

$$\eta_e = \frac{W_{el}}{LHV} = \frac{W_{el} / nF}{LHV / nF} = \frac{E}{E_{LHV}}$$

qui est proportionnel à la tension de la cellule ; le terme E_{LHV} est simplement un "équivalent électrique" du pouvoir calorifique du combustible.

Ce rendement est lié fondamentalement à la combustion incomplète du combustible.

La différence entre les deux tensions E et E_{re} , et donc le rendement électrique réel, dépend :

- *des pertes d'énergie dues à des processus de catalyse ayant lieu sur les électrodes (facteur important en cas de bas courants) ;*
- *des pertes d'énergie dues à la mineure diffusion des gaz vers les électrodes (facteur important en cas de courants élevés) ;*
- *pertes ohmiques dues aux résistances électriques de l'électrolyte et des collecteurs.*

Une autre définition fréquente est le "rendement faradique", à savoir :

$$\eta_f = \frac{I}{I_{th}}$$

où I est le courant de cellule et I_{th} le courant théorique que l'on devrait avoir si tous les réactifs introduits subissaient une réaction complète.

On calcule l'efficacité globale d'une cellule à combustible à l'aide de la formule :

$$\eta = \eta_e \cdot \eta_f$$

Si l'on considère aussi les accessoires, comme les pompes, les ventilateurs et les compresseurs, on devra introduire le rendement du système $\eta_{sist.}$ et l'expression du rendement global deviendra :

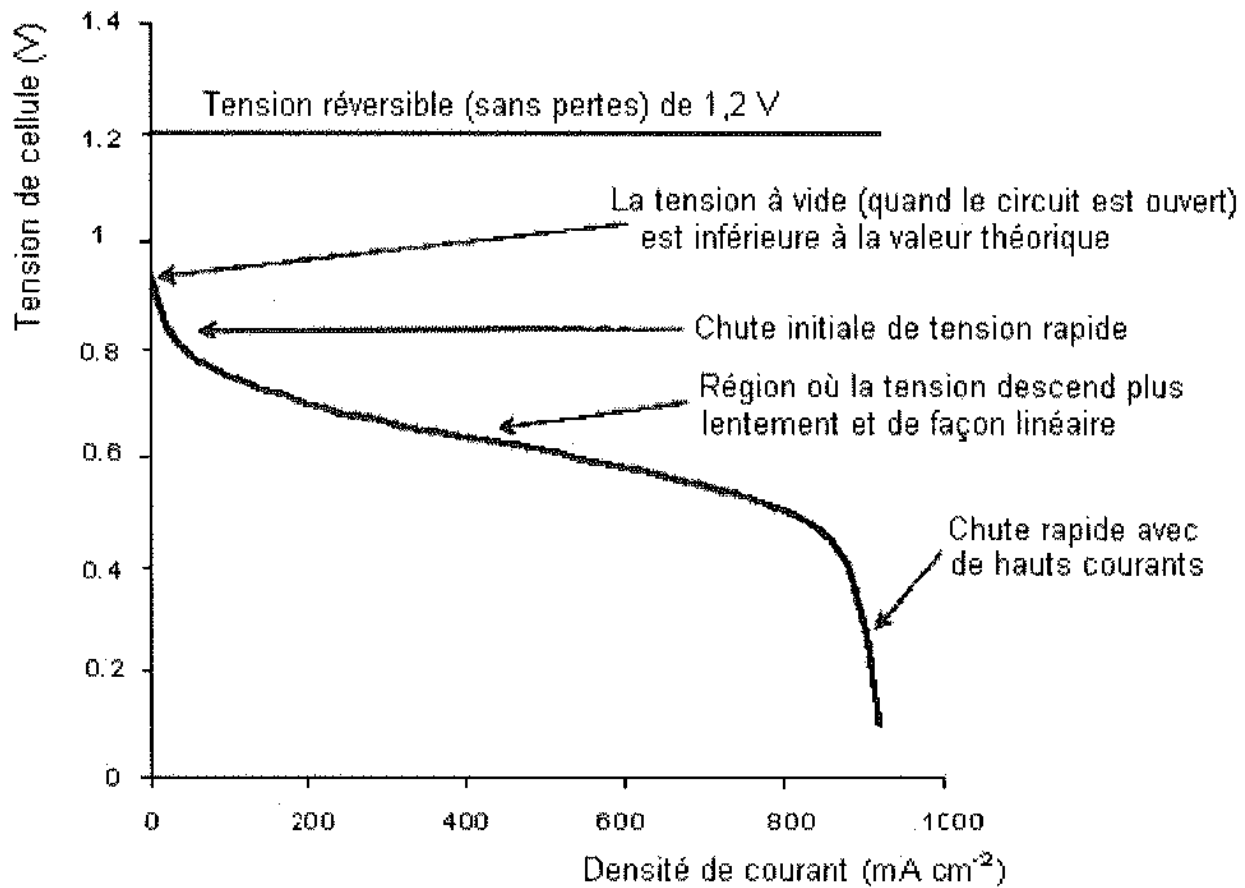
$$\eta = \eta_u \cdot \eta_f \cdot \eta_{sist.}$$

Thermodynamique irréversible

Comme toute machine transformant une forme d'énergie en une autre forme, les générateurs chimiques-électriques – lorsqu'ils doivent fournir de la puissance (c'est-à-dire lorsqu'ils doivent produire de l'énergie en un temps fini) – sont affectés eux aussi par des facteurs d'irréversibilité qui les empêchent d'atteindre le rendement réalisable en condition de réversibilité.

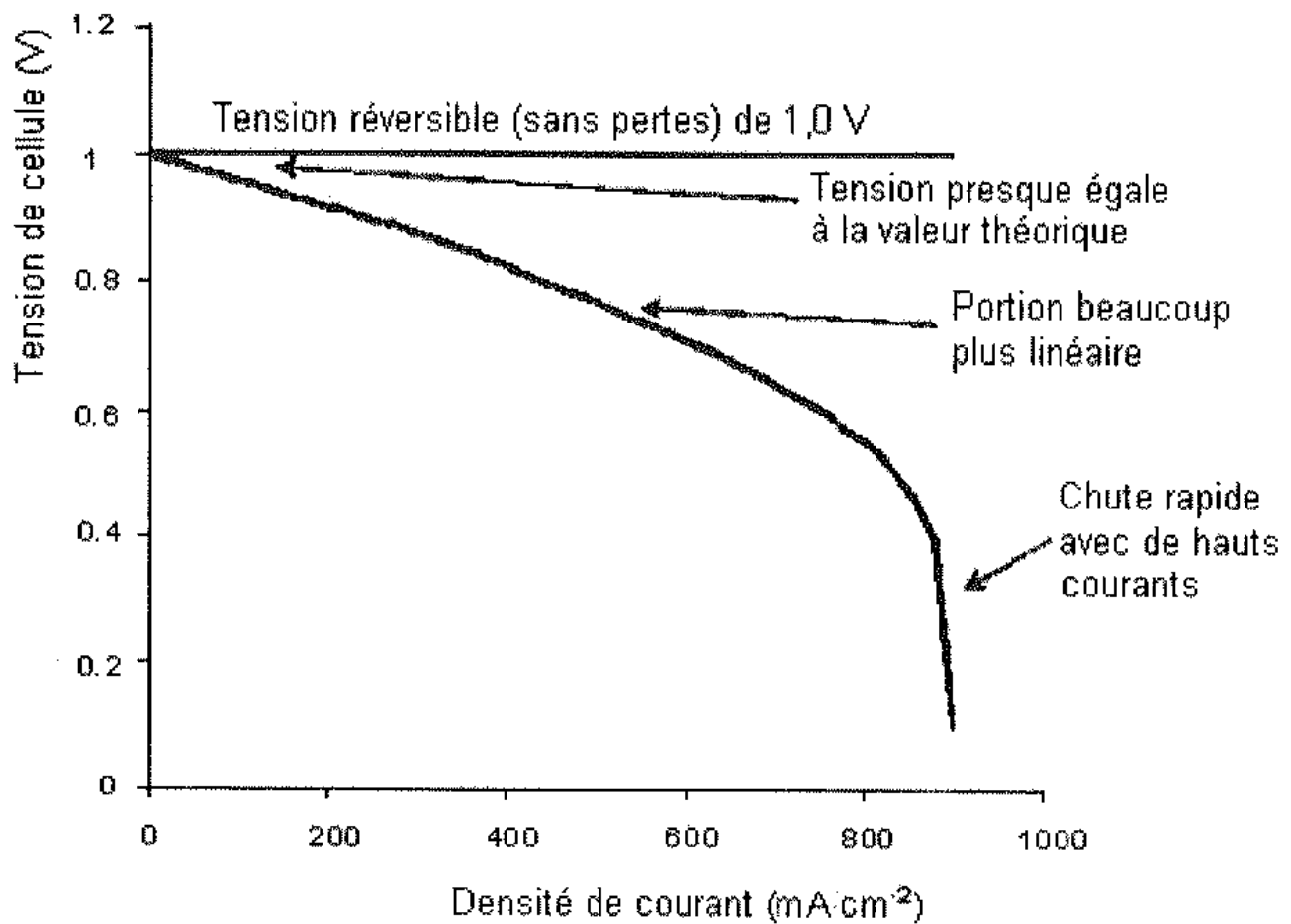
Les principales caractéristiques de la courbe peuvent se résumer ainsi :

- la tension à vide (c'est-à-dire, quand le circuit est ouvert) est inférieure à la valeur théorique ;
- on a dans la portion initiale une chute de tension rapide ;
- avec des charges moyennes, la tension descend plus lentement et de façon linéaire ;
- quand la densité de courant est élevée, la tension descend rapidement.



Graphique représentant le cours de la tension dans une cellule à combustible typique à basse température

Si une cellule à combustible travaille à de hautes températures, la forme de la courbe change.



Graphique représentant le cours de la tension dans une cellule travaillant à une température d'environ 800°C.

Les principaux points sont :

- la tension à vide est égale, ou presque, à la valeur théorique ;
- la chute de tension initiale est très faible et la courbe est beaucoup plus linéaire ;
- avec de hautes densités de courant, la tension descend plus rapidement.

En comparant les deux courbes, on pourra remarquer que la tension réversible (sans pertes) est plus basse pour les hautes températures, mais les tensions opérationnelles sont généralement plus hautes parce que les pertes et les facteurs d'irréversibilité sont plus faibles.

On analysera par la suite les pertes principales dites polarisations, se décomposant en :

1. polarisation ohmique ;
2. polarisation par concentration ;
3. polarisation d'activation.

Polarisation ohmique

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, selon la loi d'Ohm :

$$\Delta V_{Ohm} = R \cdot I$$

Pour être plus précis et pour donner à cette loi une validité générale, on introduit la densité de courant i exprimée en $[mA \cdot cm^{-2}]$ et la résistance r correspondant à un cm^2 de cellule, c'est-à-dire $[K\Omega \cdot cm^2]$

$$\Delta V_{Ohm} = r \cdot i$$

Pour réduire ces pertes on doit suivre les règles suivantes :

- emploi d'électrodes ayant une conductivité la plus élevée possible ;
- adoption d'un bon projet et matériaux appropriés pour les plats bipolaires ;
- la strate de la membrane de l'électrolyte doit être la plus fine possible, même si l'on ne peut pas aller au-delà d'une certaine limite car elle doit constituer le support des électrodes et rendre la structure plus robuste.

Polarisation par concentration

Ces pertes sont dues au gradient de concentration des ions se formant à proximité des électrodes quand le système n'est pas en équilibre, c'est-à-dire quand on a la circulation d'un courant.

Ces pertes sont nulles en circuit ouvert et obligent les électrodes à se porter à un potentiel différent du potentiel théorique proposé dans les textes.

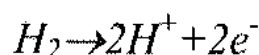
Parmi les processus favorisant ces pertes, on doit mentionner la lente diffusion de la phase gazeuse dans les pores des électrodes et la diffusion des réactifs dans l'électrolyte jusqu'à la zone des réactions chimiques. Il s'en ensuit une ultérieure diminution de tension ΔV_{conc} .

Plus la concentration des substances réactives est basse, plus le surpotentiel de diffusion est élevé.

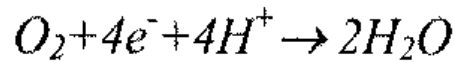
Polarisation d'activation

On a vu lorsque que le courant débité est nul qu'un courant I_o sort de chaque électrode et qu'en valeur absolue ce courant est égal à un courant retournant ensuite à l'électrode. La quantité de courant I_o n'est pas sans intérêt, car plus sa valeur est élevée, plus la cinétique de la réaction est rapide. Le courant net est obtenu grâce à une augmentation du courant de sortie par rapport au courant d'équilibre et à une diminution correspondante du courant de retour (ceci est spéculaire dans les deux électrodes). On devra considérer que ces chutes de tension ont lieu tant sur l'électrode négative que sur l'électrode positive et se distribuent sur toute la cellule, mais de façon prépondérante à l'intérieur de l'électrolyte.

Par exemple, dans les cellules PEM, l'hydrogène arrivant sous une forme gazeuse à l'électrode poreuse et imprégnée d'un électrocatalyseur, est transformé par ce dernier en une forme atomique et est ionisé, avec libération de deux électrons allant vers le circuit externe, selon la loi :



Les ions H^+ passent dans l'électrolyte et trouvent au niveau de la cathode l'oxygène gazeux ayant traversé une autre strate d'électrocatalyseur et ayant pour but de mener à terme la réaction :



Les deux réactions électrochimiques doivent vaincre une barrière de potentiel qui est d'autant plus haute que le développement du processus est plus lent. Par processus, on entend ici l'absorption des réactifs à la surface, ou la libération des électrons, ou autre.

Ces chutes (anodique et cathodique) sont dites "chutes d'activation". La chute d'activation est liée au courant, dans la partie centrale de la caractéristique externe, par une relation du type équation de Tafel :

$$\Delta V_{att} = \frac{RT}{\alpha n F} \cdot \ln \frac{i}{i_0}$$

où α est le coefficient de transport et i_0 la densité de courant d'échange ; en général, on peut écrire aussi cette expression comme suit :

$$\Delta V_{att} = a + b \ln(i)$$

où b est la pente de Tafel correspondant, dans le cas d'une réaction électrochimique, à environ 100 mV/décade à la température ambiante.

Applications

- La pile et son utilisation
- Exercices
- Conclusions

La pile :

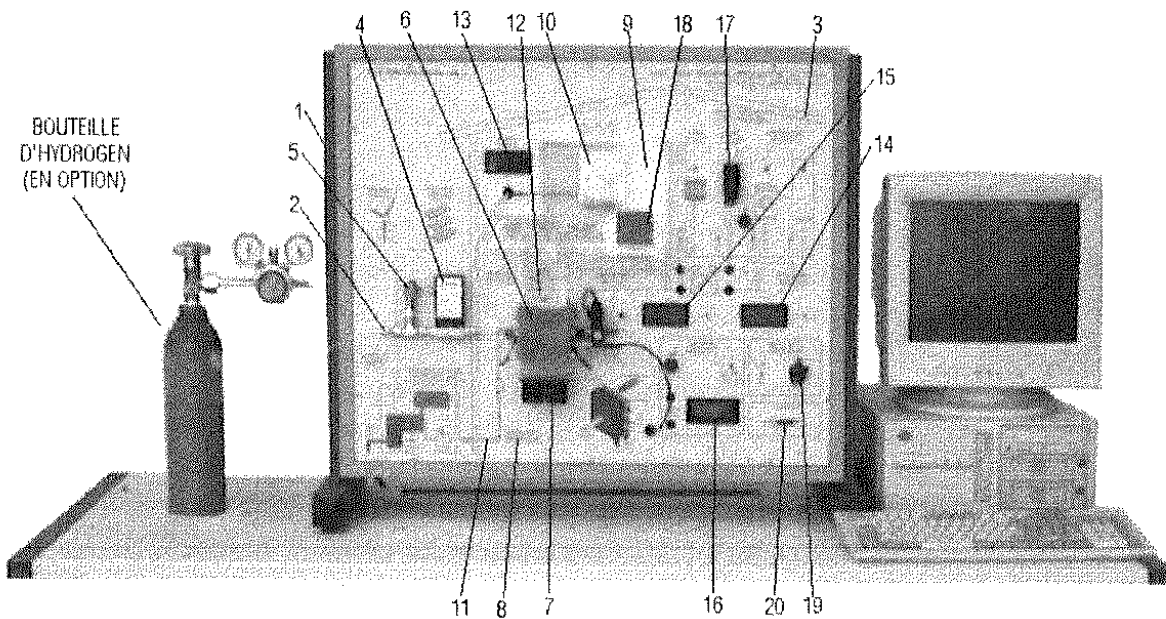


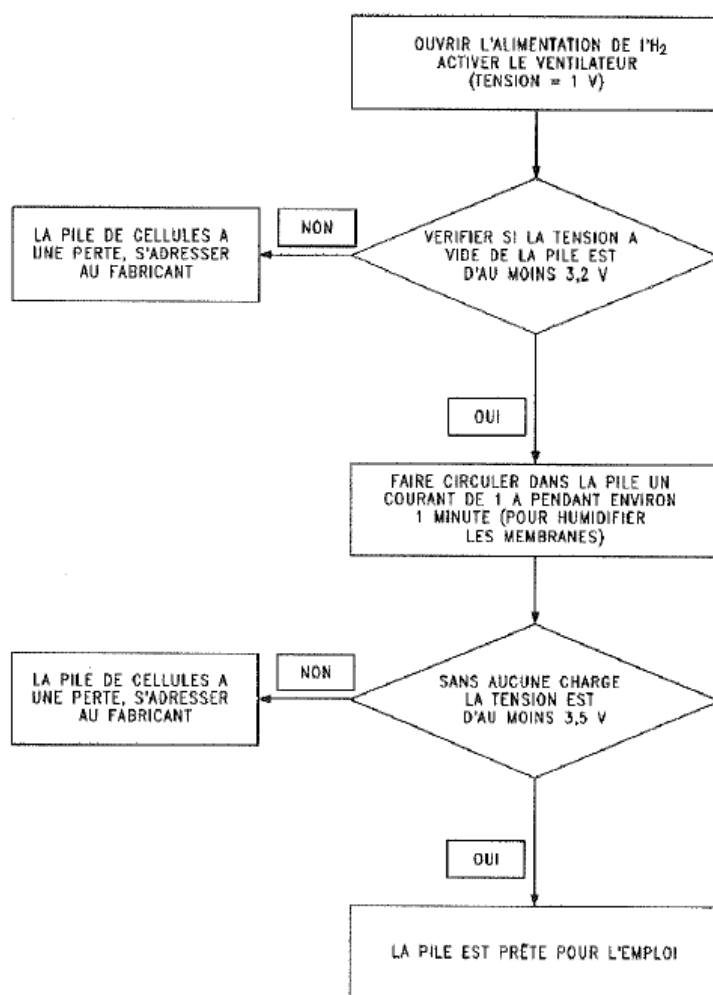
Fig. 1.1 - Système pour l'étude des cellules PEM mod. FCBA/EV

1. Alimentation électrique
2. Alimentation en hydrogène
3. Panneau synoptique
4. Débitmètre
5. Vanne de décharge de l'hydrogène
6. Pile de cellules ST20
7. Ventilateur
8. Voie d'introduction de l'air
9. Local chauffé
10. Thermostat ambiant
11. Sonde de vitesse de l'air à fil chaud
12. Sonde de température et d'humidité de l'air
13. Thermomètre
14. Ampèremètre
15. Voltmètre
16. Afficheur du ventilateur
17. Utilisateurs électriques
18. Radiateur électrique
19. Rhéostat
20. Connexion Ordinateur – RS232
21. Générateur électrochimique d'hydrogène mod. HG (en option)

Le Fonctionnement :

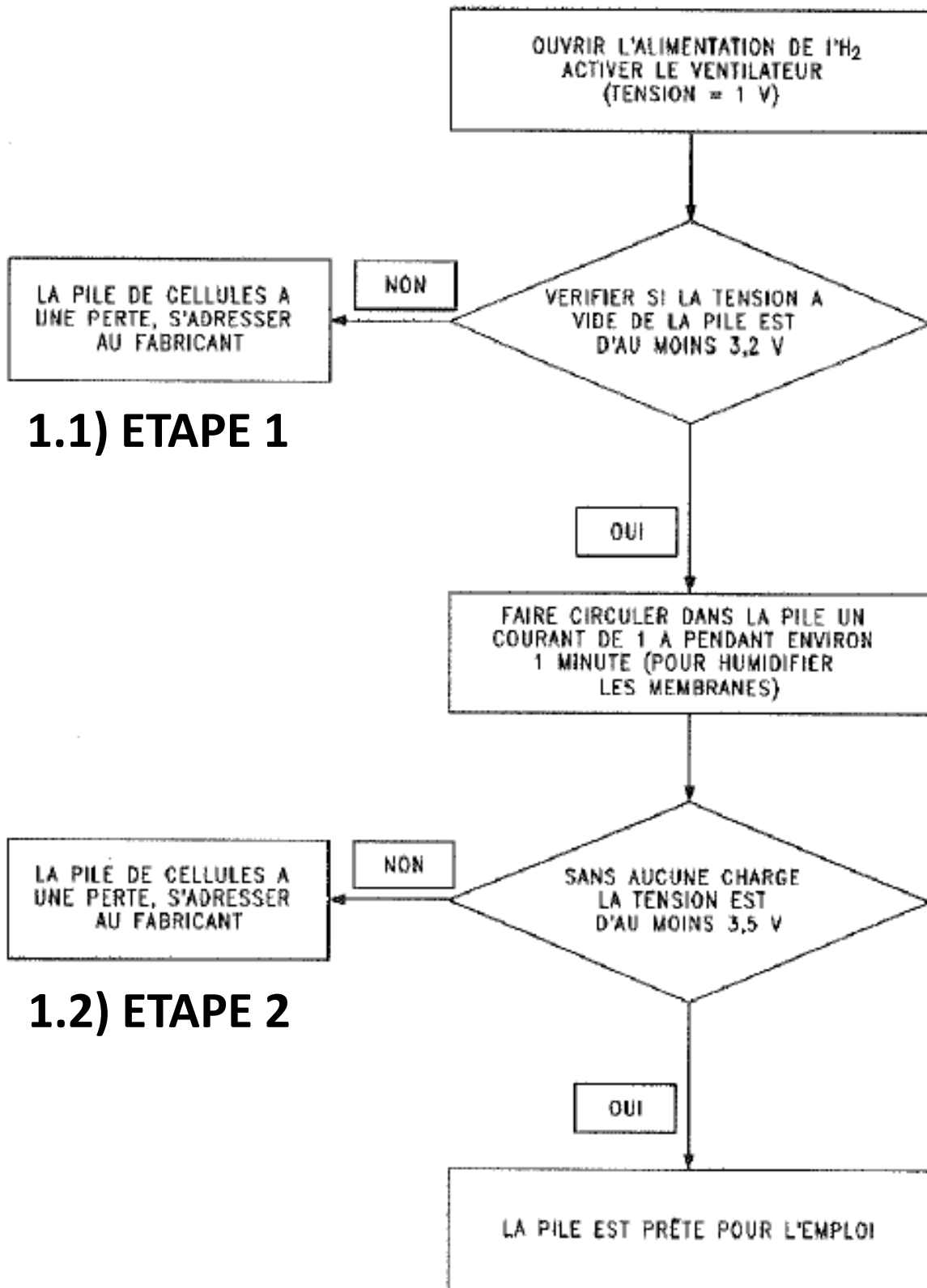
Le système FCBA/EV est construit pour des applications expérimentales et didactiques ; il ne devra donc jamais être utilisé à d'autres fins. On ne devra jamais toucher les composants, surtout les cellules, car ceci pourrait entraîner des pertes d'hydrogène dans le milieu ambiant.

Pour la mise en service du banc et chaque fois que l'on met en marche le système, on doit suivre les instructions indiquées dans la liste de contrôle (*check-list*) montrée à la fig.



Liste de contrôle (*check list*)

1) FAIRE LA CHECK LIST PRESENTEE CI-APRES



2) EXERCICES

DETERMINATION DES COURBES CARACTERISTIQUES DU SYSTEME

Exercice n° 1

Détermination de la courbe caractéristique de la cellule à combustible dans les conditions "dead-end".

PARTIE A

Objectif

Tracer la courbe caractéristique de la cellule à combustible (tension-courant) dans les conditions "dead-end", avec évaluation de celle-ci, en fonction de la densité de courant.

Instruments et équipements

On a effectué les mesures en utilisant les équipements du banc FCBA/EV.

On varie la charge en intervenant sur un rhéostat toroïdal à secteurs.

La fig. 1 montre les connexions électriques entre les instruments.

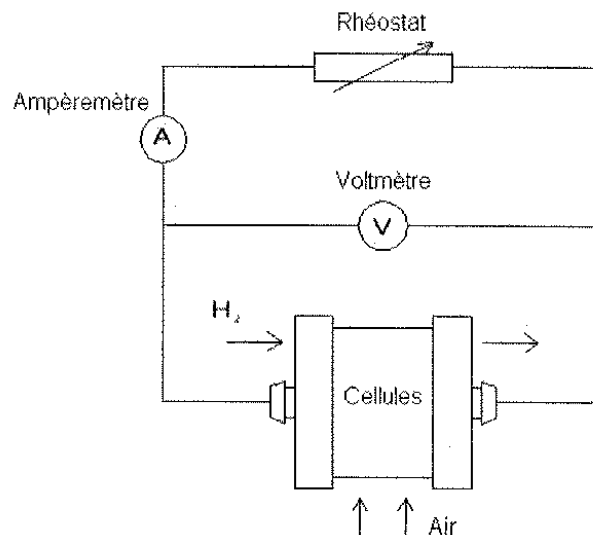


Fig. 1 - Schéma de la disposition des instruments pour l'essai

2) EXERCICES

DETERMINATION DES COURBES CARACTERISTIQUES DU SYSTEME

Exercice n° 1 Détermination de la courbe caractéristique de la cellule à combustible dans les conditions "dead-end".

PARTIE A

Objectif

Tracer la courbe caractéristique de la cellule à combustible (tension-courant) dans les conditions "dead-end", avec évaluation de celle-ci, en fonction de la densité de courant.

Procédure et conditions de fonctionnement

Pour garantir l'obtention de courbes caractéristiques réelles, on doit avant tout contrôler si les membranes sont correctement humidifiées ; ceci ne s'obtient qu'après une période de préchauffage d'environ 10-15 minutes. Lors de cette phase, procéder comme suit :

- activer l'électrovanne de purge pendant 1 seconde ;
- alimenter la cellule en hydrogène (ne jamais dépasser la pression de 2 bars absolus pour l'hydrogène) et appuyer sur le bouton de l'électrovanne de purge pendant quelques secondes afin de réaliser l'opération de purge pour éliminer les impuretés de la cellule ;
- fermer l'électrovanne ;
- effectuer les vérifications prévues dans la *check-list*
- si les vérifications donnent des résultats positifs, effectuer le réchauffement des cellules qui durera environ 10-15 mn. ; pour cela procéder comme suit :
 - o avec le rhéostat de mise en marche, imposer un courant de 1 A ;
 - o avec le variateur de tension du ventilateur, imposer une tension de 1 V ;
 - o avec le réducteur de pression, imposer une pression de l'hydrogène comprise entre 1,3 et 1,9 bars absolus.

Ne continuer l'expérience que si, et seulement si :

- la température de la pile ne dépasse pas les 30 °C ;
- la tension hors charge dépasse va au-delà de 3,5 V.

2) EXERCICES

DETERMINATION DES COURBES CARACTERISTIQUES DU SYSTEME

Exercice n° 1 Détermination de la courbe caractéristique de la cellule à combustible dans les conditions "dead-end".

PARTIE A

Objectif

Tracer la courbe caractéristique de la cellule à combustible (tension-courant) dans les conditions "dead-end", avec évaluation de celle-ci, en fonction de la densité de courant.

Ensuite, 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 ;
- régler l'alimentation du ventilateur à 6 V, en effectuant la commande à partir de l'ordinateur ou du panneau de commande ;
- imposer la valeur de pression d'hydrogène désirée. Si on emploie la bouteille, utiliser le réducteur (200 bars – 1,5 bars) ; si l'on emploie le générateur d'hydrogène HG/EV, imposer ce dernier sur la valeur de pression maximale désirée, comme indiqué dans les instructions opérationnelles des équipements fournis avec le banc, puis régler le réducteur de pression fourni de façon à garantir une pression toujours constante et inférieure à 2 bars absolus ;
- déconnecter la charge de la cellule, attendre environ 1 minute, puis annoter la valeur de tension sans charge ;
- à l'aide du rhéostat, augmenter la charge électrique, en partant de 0,2 A et annoter la valeur de tension lue après avoir attendu pendant 1 minute environ que le système s'équilibre ;
- procéder ainsi par paliers comme indiqué dans le tableau en attendant toujours 1 minute entre une mesure et l'autre ;
- 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 4 A.

Le tableau est à rendre lors du CR

2) EXERCICES

DETERMINATION DES COURBES CARACTERISTIQUES DU SYSTEME

Exercice n° 1 Détermination de la courbe caractéristique de la cellule à combustible dans les conditions "dead-end".

PARTIE A

Objectif

Tracer la courbe caractéristique de la cellule à combustible (tension-courant) dans les conditions "dead-end", avec évaluation de celle-ci, en fonction de la densité de courant.

N.B. : Arrêter les mesures si

- la tension de la pile descend en dessous de 1,6 V, ou si
- la température de la pile mesurée à l'aide de la sonde PTC dépasse les 45 °C.

N.B. : Si la procédure est effectuée sans ordinateur, se rappeler que l'on doit effectuer la purge de l'hydrogène comme indiqué au chapitre précédent. Si la purge s'effectue automatiquement avec un courant supérieur à 2 A, pour effectuer la mesure, attendre environ 1 minute après l'ouverture de l'électrovanne.

Exemple numérique

- Alimenter avec l'hydrogène de la bouteille (utiliser un réducteur de pression pour établir et stabiliser la pression absolue d'alimentation à 1,4 bars).
- L'oxygène est fourni par un ventilateur fonctionnant à une tension de 6 V.

Le tableau est à rendre lors du CR

2) EXERCICES

DETERMINATION DES COURBES CARACTERISTIQUES DU SYSTEME

Exercice n° 1

Détermination de la courbe caractéristique du rendement de la cellule à combustible dans les conditions "dead-end" (Cas A)

PARTIE B

Objectif

Détermination de la courbe caractéristique de la cellule à combustible (rendement - densité de courant) dans les conditions "dead-end", avec le ventilateur alimenté de l'extérieur.

Instruments et équipements fournis

On a réalisé les mesures en utilisant les équipements du banc FCBA/EV.

On varie la charge en intervenant sur un rhéostat toroïdal à secteurs.

Sur la base des données PARTIE A dans des essais réalisées dans les conditions "dead-end" et avec le ventilateur alimenté par le réseau électrique, on calcule le rendement de la cellule.

VOIR THEORIE POUR LE rendement !

Variation l'intensité par paliers de 0,5 A

Le tableau correspondant est à rendre lors du CR

Les courbes de rendement sont à rendre lors du CR

2) EXERCICES

DETERMINATION DES COURBES CARACTERISTIQUES DU SYSTEME

Exercice n° 2

Détermination de la courbe caractéristique de la cellule à combustible dans les conditions "dead-end" en fonction des conditions du milieu ambiant

Objectif

Tracer la courbe caractéristique de la cellule à combustible (tension-courant) dans les conditions "dead-end", avec évaluation de celle-ci, en fonction de la densité de courant et du flux d'air.

Procédure et conditions de fonctionnement

On refait les opérations vues dans l'exercice n° 1, en variant toutefois la tension du ventilateur (en la portant par exemple à 2 V). On trouvera ainsi le débit du flux d'air et l'on pourra observer une chute de la courbe en correspondance de courants élevés due à un apport insuffisant d'oxygène fourni par le ventilateur à la réaction.

Dans ce cas aussi, on pourra remarquer l'évolution différente de la courbe lorsque l'on varie le courant débité, caractérisé par une diminution exponentielle en correspondance de bas courants, linéaire en correspondance de courants moyens et une brusque diminution lorsque les charges sont élevées.

2) EXERCICES

DETERMINATION DES COURBES CARACTERISTIQUES DU SYSTEME

Exercice n° 3

Détermination de la courbe caractéristique de la cellule à combustible dans les conditions "dead-end" en fonction des conditions du milieu ambiant

Objectif

Tracer la courbe caractéristique de la cellule combustible (tension-courant) dans les conditions "dead-end", avec évaluation de celle-ci, en fonction de la densité de courant et de la pression de l'hydrogène.

Procédure et conditions de fonctionnement

On peut refaire l'exercice n° 1, en variant toutefois la pression de l'hydrogène (en la portant par exemple à 1,8 bars absolus). On introduit ainsi un effet bénéfique en termes puissance réalisable. En effet, au fur et à mesure que la pression de l'hydrogène croît, on assiste à une légère augmentation de la tension, ceci pour une même valeur de courant. Vu la petite taille de la pile, cette augmentation n'est pas très appréciable, alors qu'elle est plus importante dans les piles de plus haute puissance où avec la pression de l'hydrogène on augmente aussi la pression de l'oxygène, ceci au moyen de compresseurs.

Noms :

Prénoms :

Groupe :

Formulaire de TP à rendre

A) Questions théoriques :

QU'EST-CE QU'UNE PILE A COMBUSTIBLE :

DEFINIR LE RENDEMENT :

B) Applications :

PARTIE A

EXERCICE 1

Exo 1	pression 1,5 bar	Tension du ventilateur 6V Ordinateur	1,5 bar, 6V							
N° de la mesure	Temp. Des cellules [°C]	Courant [A]	Tension [V]	Puissance électrique [W]	Puissance thermique [W]	Densité de courant [mA/cm ²]	Flux d'hydrogène [ml/min]	Rendement électrique	Rendement total	Rendement calculé
1								0	0	0
2										
3										
4										
5										
6										
7										
8										
9										
10										

Conclure sur le rendement dans ces conditions opératoires

PARTIE B

B) Applications :

EXERCICE 1

Tracer les rendements en fonction de la densité de Courant

B) Applications :

EXERCICE 2

Exo 1	pression 1,5 bar	Tension du ventilateur 6V Ordinateur	1,5 bar, 6V								
N° de la mesure	Temp. Des cellules [°C]	Courant [A]	Tension [V]	Puissance électrique [W]	Puissance thermique [W]	Densité de courant [mA/cm ²]	Flux d'hydrogène [ml/min]	Rendement électrique	Rendement total	Rendement calculé	
1								0	0	0	
2											
3											
4											
5											
6											
7											
8											
9											
10											

Conclure sur le rendement dans ces conditions opératoires

B) Applications :

EXERCICE 2

Tracer les rendements en fonction de la densité de Courant et comparer avec l'exercice 1

B) Applications :

EXERCICE 3

Exo 1	pression 1,5 bar	Tension du ventilateur 6V Ordinateur	1,5 bar, 6V								
N° de la mesure	Temp. Des cellules [°C]	Courant [A]	Tension [V]	Puissance électrique [W]	Puissance thermique [W]	Densité de courant [mA/cm ²]	Flux d'hydrogène [ml/min]	Rendement électrique	Rendement total	Rendement calculé	
1								0	0	0	
2											
3											
4											
5											
6											
7											
8											
9											
10											

Conclure sur le rendement dans ces conditions opératoires

B) Applications :

EXERCICE 3

Tracer les rendements en fonction de la densité de Courant et comparer avec l'exercice 1

COMPARER LES 3 COURBES DE RENDEMENTS

C) Conclusions :

QUELS SONT LES PARAMETRES IMPORTANTS
POUR LE BON RENDEMENT DE LA PILE

POURQUOI

CONCLURE

C) Conclusions :

CONCLURE

QUELS PARAMETRES AURIONS PU T ON CHANGER ?