

UNIVERSITE CHEIKH ANTA DIOP DE DAKAR

ECOLE SUPERIEURE POLYTECHNIQUE
CENTRE DE THIES

Gm.0072



**PROJET DE FIN D'ETUDES : en vue de l'optention du diplôme
d'ingénieur de conception en électromécanique**

THEME :

**LES PILES A COMBUSTIBLES : applications et perspectives
d'applications, étude du couplage photovoltaïque de la pile à
membrane échangeuse de protons**

PRESENTE PAR :
EL HADJI ALIOU DIOP

SOUS LA DIRECTION SCIENTIFIQUE DE :
Monsieur Pape Mody NDIAYE
Professeur à l' ESP THIES

Année Universitaire 2003-2004

REMERCIEMENTS

J'aimerais exprimer ma reconnaissance à tous ceux qui m'ont aidé dans ce projet. Notamment mon encadreur qui m'a soutenu sur le plan pédagogique durant tout le long du travail, M Pape Mody NDIAYE.

Je remercie M J YVON, directeur de la recherche fondamentale au commissariat de l'énergie atomique, de la physique et des piles atomiques pour la documentation si importante qu'il a voulu mettre à nos dispositions.

Je remercie également M Banda NDoye pour sa collaboration dans le bilan énergétique qui m'a permis par ces conseils de mieux comprendre la méthodologie de calcul utilisée.

Je remercie particulièrement M Mbaye DIOP qui m'a aidé intégralement pour l'impression et la reliure de ce présent document.

Je remercie également remercié tous mes promotionnaires qui de près ou de loin ont contribué dans la mise en œuvre de ce rapport.

SOMMAIRE

Le but de ce travail est d'étudier en détail les piles à combustible et d'apporter une réponse face au problème de couplage de la pile à membrane échangeuse de protons avec un électrolyseur photovoltaïque de l'eau.

Ce travail est une étude de faisabilité technico- économique qui permettrait à la communauté scientifique de conclure sur le couplage de la pile à membrane avec un électrolyseur photovoltaïque de l'eau. Il devrait aussi éclairer les chercheurs sénégalais des piles à combustible.

Le projet fait appel à des méthodes exhaustives mais aussi à des hypothèses simplificatrices pour combler les manques de précisions liés à la nature générale du travail. La documentation de l'Internet constitue 80 % de nos sources, complétées par quelques rapports de l'institut français du pétrole, de l'association française de l'hydrogène et des rapports des centres nationaux de recherches scientifiques des pays comme la France, Angleterre, USA, Canada et Japon. Sur le plan économique, un comparatif de plusieurs devis nous permet de choisir des prix moyens des divers équipements ainsi que leurs durées de vie.

Le couplage photovoltaïque- électrolyseur -pile à combustible n'est de loin pas rentable économiquement d'après notre étude. Cette étude montre qu'il est coûteux d'utiliser un tel système pour la production d'électricité. Cependant les avantages liés à la non pollution des piles à combustibles restent confirmés. La possibilité technique de concevoir ce système autonome est aussi illustrée avec l'application de la plomberie industrielle.

Sur le plan économique, la production d'électricité par couplage photovoltaïque- électrolyseur-pile à combustible, n'est aucunement rentable. Le photovoltaïque classique utilisé avec des batteries de stockage est de loin plus rentable quelque soit les difficultés rencontrées. Ceci est justifié par le fait qu'au Sénégal le coût du KWh de notre installation est très cher par rapport à celui de la SENELEC. Ceux qui rêvaient de ce projet n'ont finalement qu'un seul argument, la non pollution. Ce qui n'est pas une nouveauté car l'éolienne et le photovoltaïque peuvent nous amener à ces résultats. En effet ce rapport donne deux réponses : une favorable sur la plan technique et une autre négative sur le volet économique.

TABLE DES MATIERES

INRODUCTION.....	1
I.-DEFINITION ET CARACTERISTIQUE DES PILES A COMBUSTIBLES.....	2
a)Définition et caractéristique.....	2
b) Historique des piles à combustible.....	3
II- ETUDE GLOBALE DES PILES A COMBUSTIBLES.....	4
1) Les piles électrochimiques classiques.....	4
1-1)La pile DANIELL.....	4
2)les piles à combustible.....	6
2-1) Notions chimiques de base.....	7
2-2) Principe de fonctionnement des piles à combustible.....	8
2-3) Pile alcaline (AFC).....	10
2-4)Pile à membrane échangeuse de protons (PEMFC).....	11
2-5)Pile à méthanol direct (DMFC).....	14
2-6) Pile à acide phosphorique (PAFC).....	17
2-7) Pile à carbonate fondu (MCFC).....	18
2-8)Pile à oxyde solide (SOFC).....	23
III APPLICATIONS ET PERSPECTIVES D'APPLICATIONS DES PILES A COMBUSTIBLES.....	28
III-1 Pile alcaline (AFC).....	29
III-2 Pile à membrane échangeuse de protons (PEMFC).....	30
III-3 Pile à méthanol direct (DMFC).....	32
III-4 Les piles à acide phosphorique (PAFC).....	33
III-5 Les piles à carbonate fondu (MCFC).....	33
III-6 les piles à oxyde solide (SOFC).....	33
IV- ETUDE DE PERSPECTIVE D'APPLICATION : COUPLAGE PHOTOVOLTAIQUE ET PILE A COMBUSTIBLE (PEMFC).....	34
IV- 1 Position du problème.....	34
IV- 2 Résolution du problème.....	35 à 51
• Production de l'hydrogène.....	35
• Stockage de l'hydrogène.....	37
• Transport de l'hydrogène.....	38
• Bilan énergétique et étude économique.....	41

- Données sur les éléments de l'installation.....41 à 46
- Coût du KWh de l'installation.....46 à 51

CONCLUSION..... 52

LISTE DES ANNEXES

ANNEX 1 : Photo de Nebus de Mercedes-benz.

ANNEX 2 : Photo de IRISBUS de IVECO.

ANNEX 3 : Image de deux bus à pile a combustible dont CITARO.

ANNEX 4 : Calendrier des de sortie des bus à pile à combustible.

ANNEX 5 : Application des DMFC sur la téléphonie mobile.

ANNEX 6 : Voiture équipé de pile à combustible.

ANNEX 7 : Propriété de l'hydrogène.

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : vue externe d'une pile à combustible de type à membrane.....	3
Figure 2 : Pile Daniell, schéma de fonctionnement.....	6
Figure 3 : Principe de fonctionnement d'une cellule de pile à combustible à électrolyte acide avec hydrogène et oxygène comme consommables.....	9
Figure 4 : Schéma général d'une pile à combustible de type PEMFC.....	12
Figure 5 : Schéma détaillée d'une pile PEMFC.....	12
Figure 6 : Schéma de principe de la pile DMFC.....	17
Figure 7 : Reformage externe.....	21
Figure 8 : Reformage interne.....	22
Figure 9 : cellule élémentaire de la technologie tubulaire des SOFC.....	24
Figure 10 : Technologie tubulaire.....	24
Figure 11 : Technologie plane.....	25
Figure 12: Pile de Sulzer Hexis.....	26
Figure 13 : représentation sommaire d'un électrolyseur à eau.....	36
Figure 14 : Représentation du circuit de transport de l'hydrogène.....	38
Figure 15 : Représentation des parties de l'installation.....	42
Figure 16 : Représentation détaillée du générateur photovoltaïque.....	45

INTRODUCTION

Depuis la révolution industrielle, la production énergétique internationale ne cesse d'augmenter afin de pouvoir satisfaire les besoins immenses dans ce domaine. Cependant si cela est considéré comme un exploit chez certains, ailleurs cela est un échec, en tout cas sur le plan qualitatif. En effet, généralement cette production énergétique quantitative se fait avec des dégagements de gaz à effet de serre qui constitue des menaces sérieuses pour la santé publique par destruction de la couche d'ozone. Face à cette situation, de grands organismes de recherche tels que l'institut français du pétrole (IFP), les centres nationaux de recherche scientifique (CNRS), les universités américaines et européennes, etc..., ont commencé à exploiter les systèmes de génération d'énergie qui ne polluent pas la nature. C'est ainsi que des recherches importantes se sont organisées dans le domaine du photovoltaïque, de l'éolienne, mais aussi dans celui des piles à combustible. Une pile à combustible est un système électrochimique qui transforme l'oxygène et l'hydrogène en électricité et en eau. Mais si l'oxygène est disponible dans l'air (21% d'un volume d'air), l'hydrogène par contre n'existe pas à l'état naturel. Il semble alors que les piles à combustible ont un problème d'approvisionnement en hydrogène. Mais puisque les chercheurs estiment que l'hydrogène produit pour la médecine et la chimie est trop chère, il est donc indispensable de trouver d'autres sources d'approvisionnement en hydrogène. C'est dans ce contexte que plusieurs axes de recherches ont soupçonné la possibilité de production de l'hydrogène par électrolyse de l'eau avec un courant photovoltaïque pour enfin utiliser ce gaz pour alimenter la pile à membrane échangeuse de protons. Cependant aucune étude approfondie n'est faite dans ce domaine afin de pouvoir juger de la rentabilité de cette méthode.

Nous nous proposons de faire une étude de faisabilité technique montrant les possibilités de réalisation à grande échelle de cette illusion, mais aussi une étude économique pour estimer les coûts d'un tel projet. Mais avant cela nous devons expliquer en détails les principes de fonctionnement des différents types de pile à combustible avant de faire un travail d'étude sur la pile à membrane échangeuse de protons.

A la fin du rapport, les différents types de pile à combustible devraient être bien compris en profondeur. On devra aussi être fixé par rapport aux possibilités technico-économiques du couplage : pile à membrane-électrolyseur- photovoltaïque.

Une méthode exhaustive nous permettra d'approcher les résultats visés tout en faisant des hypothèses simplificatrices nécessaires à la résolution de certains problèmes liés à une absence de précision du cahier des charges.

Après l'étude des différents types de piles à combustibles, les données de l'électrochimie, du photovoltaïque et de la plomberie industrielle vont constituer nos éléments de base sur lesquels notre réflexion devra trouver les possibilités de liaisons fiables.

I. DEFINITION ET CARACTERISTIQUES DES PILES A COMBUSTIBLE

a) Définition et caractéristiques

Une pile à combustible est un générateur qui convertit directement l'énergie interne d'un combustible en énergie électrique, en utilisant un procédé électrochimique contrôlé au lieu d'une réaction thermique de combustion, dont le travail mécanique engendré est ensuite converti en électricité. Les rendements théoriques attendus sont très élevés, et les sous produits sont très peu polluants. Ces arguments, généralement admis par l'ensemble de la communauté scientifique, en font une alternative très probable au moteur thermique (essence, diesel), pour la plupart de ses applications.

Elle met en jeu, sans les mélanger, un combustible (hydrogène, méthanol, monoxyde de carbone ...) et un comburant (généralement de l'oxygène pris dans l'air). Elle est composée de l'assemblage de cellules élémentaires, qui comportent une électrode cathodique (alimentée en comburant) et une autre anodique (alimentée en combustible). Ces deux électrodes, qui canalisent les électrons, plongent dans un électrolyte intermédiaire, solide ou liquide suivant le type de pile.

On peut voir dans la figure ci dessous l'image d'une petite pile à combustible, avec quelques cellules en série, les tuyaux d'alimentation et d'évacuation des fluides (combustible, comburant et liquide de rejet), ainsi que le système d'assemblage (plaques et tirants).

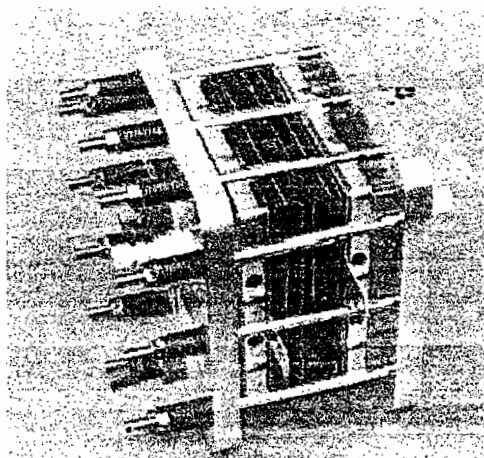


Figure 1 : Vue externe d'une pile à combustible

la figure 1 est tiré de www.clubpac.net.

La pile à combustible est caractérisée par le fait que les réactifs sont renouvelés en permanence ainsi que les produits. Dans une pile classique, les matériaux constituant les électrodes sont consommables. Avec le temps, en fonction de l'usage, ils se dégradent (oxydation de l'anode et réduction de la cathode) pour finalement rendre le processus inactif : la pile est usée. Dans une pile à combustible, la structure (électrodes, électrolyte et sites réactifs) ne se détériore pas, et reste globalement presque invariante dans le temps, avec certaines exceptions. Il reste donc à fournir en permanence des réactifs (combustible et comburant) et à évacuer les produits de la réaction (eau, chaleur et électricité). Pour l'évacuation de la chaleur certaines piles sont munies de système de convection forcée (dynamo et ventilo).

b) Historique des piles à combustible

L'anglais Sir William Robert GROVE est considéré comme l'inventeur des piles à combustible. Depuis longtemps il exerçait sa fonction de juge et travaillait déjà sur les batteries électriques. Mais, en réalité, ce fut **Christian Friedrich Schönbein** qui, en 1838, le premier observa le principe des piles. Dans son expérience, il utilisait un tube en U avec deux électrodes en platine. Grâce à un courant électrique, il parvint à obtenir de l'hydrogène et de l'oxygène: c'est ce que l'on appelle l'**électrolyse de l'eau**. Mais en coupant ce courant, il constata que ces gaz donnaient lieu à un courant électrique de sens inverse au premier dans certaines conditions énergétiques.

Cependant, en 1839 les deux hommes se sont rencontrés lors d'un meeting à Birmingham et ont pu correspondre au profil de **William Robert Grove**. En effet, dans la même année M. Grove réalisa sa célèbre expérience avec une pile à combustible: il s'agissait d'une cellule hydrogène oxygène avec des électrodes de platine poreux et de l'acide sulfurique comme électrolyte. Ce fut donc Grove, et non Schönbein, qui revendiqua la découverte en 1845.

Cependant, la principale matière première énergétique étant, au siècle dernier, le charbon, on songea rapidement à mettre au point des piles dont il serait le combustible. Dès 1855, de nouveaux concepts, à haute température, utilisant des électrolytes fondus, furent mis au point. Les résultats furent modestes, et, en 1939, le bilan du premier siècle de recherches était plutôt pessimiste, malgré les potentialités indéniables de la filière. Après 1945, trois groupes de recherche, aux Etats Unis, en Allemagne et en URSS reprirent les études sur les principaux types de générateurs, en apportant les améliorations technologiques nécessaires à un développement industriel. Ces travaux ont débouché sur les concepts actuels, notamment

chez Siemens et Prattand Wittney (aujourd'hui dans le même groupe que International Fuel Cell).

Les premières applications commerciales des piles à combustible furent les programmes spatiaux du début des années 60, GEMINI, APPOLLO, Spacelab...pour lesquels furent développées des piles à membranes (General Electric), et des piles alcalines (Pratt and Wittney).

Depuis les années 1970, de nombreux efforts de recherche ont été entrepris par de très grosses entreprises industrielles, très souvent aidés par des fonds publics, dans le cadre de programmes de recherche pour la protection de l'environnement.

Mi 1998, l'offre commerciale devient de plus en plus importante, et si certaines filières semblent, dans l'état actuel de nos connaissances, proches de la maturité économique, d'autres, très prometteuses, ont encore à résoudre des problèmes technologiques pour devenir compétitives, fiables et sûres.

II. ETUDE GLOBALE DES PILES A COMBUSTIBLE

Pour éviter des confusions, disons toute suite que les piles à combustible sont différentes des piles électrochimiques classiques. Cependant nous verrons qu'elles ont en réalité un fonctionnement électrochimique. Essayons de parler des autres types de pile avant d'exposer les piles à combustibles pour mieux mettre en exergue leurs différences.

1) Les piles électrochimiques classiques

Pour la plupart des résultats de nos enquêtes nous remarquons des confusions notoires entre ces piles et celles à combustible. Etudions sommairement la pile classique de base la plus répandue.

1-1) La pile DANIELL

La pile Daniell est constituée de deux compartiments appelés demi piles. Chaque demi pile représentant un couple un rédox. Une demi pile formée d'une lame de cuivre plongeant dans une solution de sulfate de cuivre II et une autre demi pile comprenant une lame de zinc plongeant dans une solution de sulfate de zinc.

Les deux demi piles sont reliées par un pont salin dit pont de jonction ou pont électrolytique.

- Transformation à l'électrode de zinc, l'anode (pole négatif)

La solution de sulfate de zinc oxyde le zinc en électrons et en ions zinc deux plus.

Les électrons quittent l'électrode de zinc pour circuler dans les conducteurs métalliques. Les ions zinc sont libérés dans la solution de sulfate de zinc. Le zinc est ainsi donc oxydé suivant la réaction suivante :



Le potentiel normal associé à cette réaction $E^\circ (\text{Zn}^{2+} / \text{Zn}) = -0.76 \text{ V}$

La solution s'enrichit en ions Zn^{2+} et la masse de la lame de zinc diminue. Ce qui limite la durée de vie de la pile de façon interne.

○ Transformation à l'électrode de cuivre, la cathode (pôle positif)

Au niveau de l'électrode de cuivre arrivent les électrons du circuit extérieur qui vont réagir avec les ions cuivre (II) de la solution aqueuse de sulfate de cuivre.

Les ions cuivre (II) sont donc réduits suivant la réaction : $\text{Cu}^{2+} + 2\text{e}^- \longrightarrow \text{Cu}$

Le potentiel normal associé à cette réaction est la suivante $E^\circ (\text{Cu}^{2+} / \text{Cu}) = 0.34 \text{ V}$

La solution s'appauvrit en ions Cu^{2+} et la masse de la lame de cuivre augmente.

○ Bilan des transformations dans la pile

Les ions cuivre (II) ont capté des électrons au zinc par l'intermédiaire du circuit électrique. Cette circulation d'électron donne naissance à un courant électrique.

Il y a autant d'ions Zn^{2+} formés que d'ions Cu^{2+} consommés. L'équation bilan d'oxydoréduction est donc la somme des deux réactions écrites ci haut. C'est-à-dire :



La force électromotrice E de la pile est donnée par application successive de la NERST.

$$E = E^\circ(\text{Cu}^{2+} / \text{Cu}) - E^\circ(\text{Zn}^{2+} / \text{Zn}) + 0.06/2 \log([\text{Cu}^{2+}] / [\text{Zn}^{2+}]) \quad \text{à } 25^\circ \text{ C.}$$

○ Le pont salin

Le pont salin permet d'assurer deux fonctions essentiellement à savoir la **liaison chimique** entre les deux compartiments de la pile, mais aussi la **neutralité électrique** entre les deux solutions. Par exemple dans le cas du KCl les ions K^+ et Cl^- vont combler respectivement la consommation et la production de charges positives. Cette compensation peut se faire aussi par migration des ions sulfates.

Pour mieux voir tous ces détails nous vous invitons à observer la figure suivante.

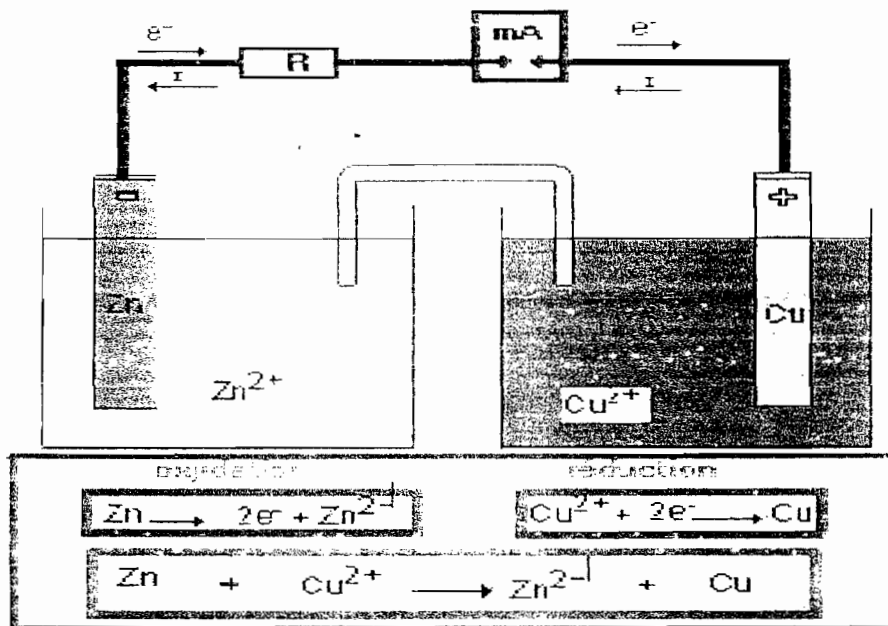


Figure 2 Pile Daniell, schémas de fonctionnement (tiré de www.recochimie.fr)

2) Les piles à combustible

Les piles à combustible comme les piles classiques transforment l'énergie chimique en énergie électrique. Mais dans les piles à combustible c'est plutôt une réaction de combustion qui constitue le noyau du système, avec l'hydrogène comme combustible et l'oxygène comme comburant. Ceci confère à la pile à combustible la particularité d'avoir une durée de

vie relativement infinie par rapport aux piles classiques. Il suffit donc de lui injecter directement ou indirectement de l'hydrogène et de l'oxygène pour récupérer un courant électrique et de l'eau pure. Dans le cas indirect nous aurons l'occasion d'illustrer la transformation de l'eau en hydrogène et oxygène : électrolyse de l'eau. Nous montrerons aussi que la réaction d'électrolyse de l'eau est celle qui est utilisée dans les piles à combustible mais dans le sens inverse.

Dans une centrale électrique de type thermique on transforme l'eau en vapeur qu'on utilise pour faire tourner une turbine. celle-ci tourne un alternateur qui produit enfin du courant électrique. Cela constitue déjà un nombre important d'intermédiaires entre l'eau et le courant électrique. Les piles à combustibles constituent donc un chemin plus rapide qui transforme directement l'hydrogène et l'oxygène gaz en courant électrique.

Actuellement, il existe six types de piles à combustible qu'on peut lister immédiatement :

- **AFC** (Alkaline fuel Cell), pile alcaline.
- **PEMFC** (Polymer Exchange Membran Fuel Cell), pile à membrane échangeuse de protons.
- **DMFC** (Direct Methanol Fuel Cell), pile à méthanol direct.
- **PAFC** (Phosphoric Acid Fuel Cell), pile à acide phosphorique.
- **MCFC** (Molten carbonate Fuel Cell), pile à carbonate fondu.
- **SOFc** (Solid Oxid Fuel Cell), Pile à oxyde solide.

Nous savons maintenant qu'il existe plusieurs types de pile à combustible qui utilisent directement ou indirectement de l'hydrogène et de l'oxygène pour produire de l'électricité selon un procédé électrochimique. Essayons d'explicitier le fonctionnement de chaque pile à combustible. Mais avant cela essayons d'asseoir d'abord les notions chimiques de base qui régissent ces piles à combustible.

2-1) Notions chimiques de base

L'étude des réactions chimiques produisant de l'électricité d'une part, et celles des mutations chimiques qu'on peut faire avec de l'électricité d'autre part, constituent une branche de la chimie dite électrochimie. Cependant cette branche s'appuie sur la thermodynamique et sur des notions chimiques de bases qu'on se propose d'en voir quelques.

a) Electrode

On appelle ici électrode un métal plongeant dans une solution chimique. L'électrode qui libère les électrons est dite anode ou pôle négative, celle qui reçoit ces électrons est appelée cathode ou pôle positive.

b) Electrolyte

Les solutions dans lesquelles plongent les électrodes sont dites électrolytes. Mais pour plus de précision on appelle électrolyte toute solution aqueuse conductrice de courant électrique. Par exemple une solution aqueuse de sodium est un électrolyte, par contre celle de sucre ne l'est pas.

c) Pile ou accumulateur

Une pile est un système électrochimique constitué par la jonction de deux électrodes plongeant dans un ou deux électrolytes.

d) Couple rédox

Certains éléments chimiques ou ions peuvent dans certaines conditions physiques ou chimiques s'oxyder en libérant des électrons, ou inversement se réduire en captant des électrons. Ainsi le réactif de départ et le produit d'arrivée constituent un couple d'oxydoréduction ou oxydant réducteur. Ces deux réactions, oxydation et réduction, ont lieu souvent simultanément car le temps de décalage est très négligeable.

2-2) Principe de fonctionnement des piles à combustible

Une pile à combustible est un assemblage de cellules élémentaires, en nombre suffisant pour assurer la production électrochimique d'électricité dans des conditions de tension et courant voulues. De ce fait pour le principe de fonctionnement l'étude de la cellule élémentaire peut suffire.

- **La cellule élémentaire**

Chaque cellule est constituée de deux compartiments symétriques alimentés chacun par un gaz réactif. Les deux électrodes, séparées par l'électrolyte, complètent le dispositif.

De façon générale, le fonctionnement électrochimique d'une cellule unitaire de pile à

combustible peut se schématiser sous la forme donnée dans la figure suivante dans le cas par exemple d'une pile acide à hydrogène et oxygène.

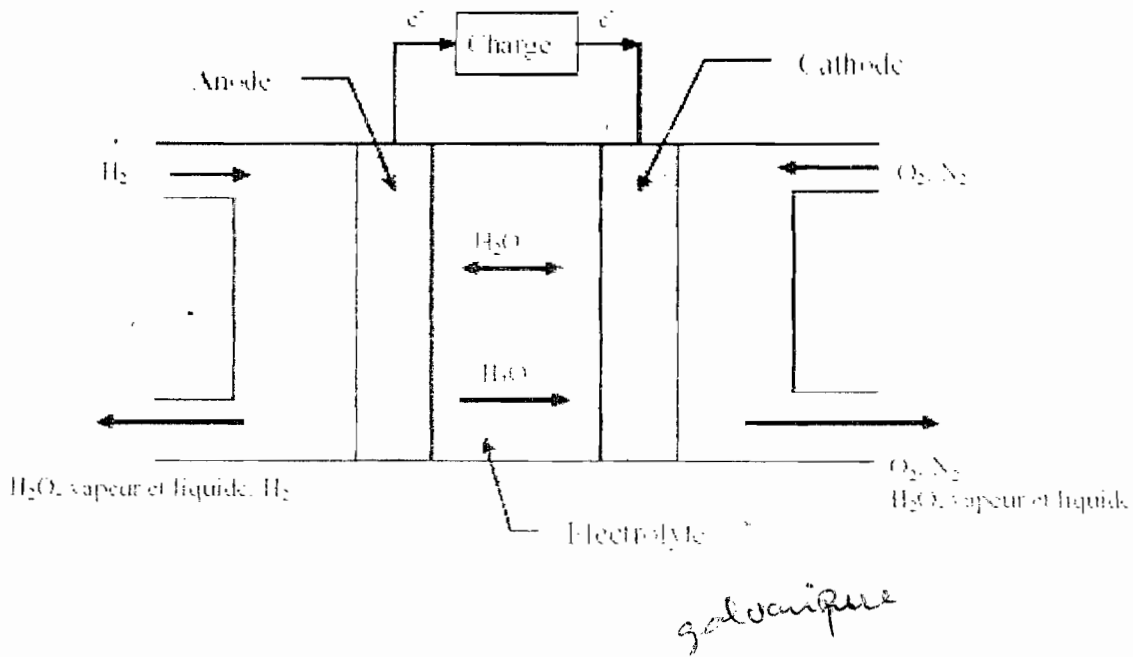
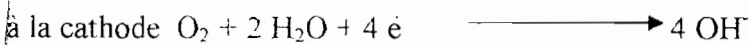
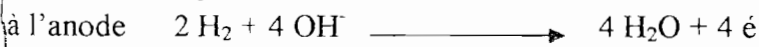


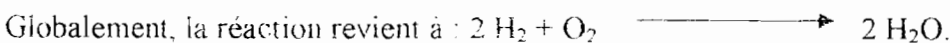
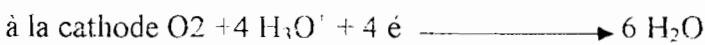
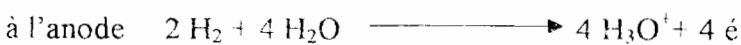
Figure3. Principe de fonctionnement d'une cellule ~~de pile~~ à combustible à électrolyte acide avec H₂ et O₂ comme consommables. (tiré de www.pac.app.fr)

Pour les piles de haut rendement fonctionnant à basse température, le combustible le plus employé est l'hydrogène sous forme gazeuse. Suivant la nature de l'électrolyte, acide ou basique, l'eau formée par oxydation de l'hydrogène est produite à l'anode ou à la cathode.

○ Pour une **pile alcaline**, on a :



○ Pour une **pile acide**, le cas de notre exemple précédent on a :



Les exceptions viennent des piles à très hautes températures, pour lesquelles on peut éventuellement remplacer l'hydrogène par du monoxyde de carbone (CO), pour produire du CO₂.

Le passage des ions (H⁺, OH⁻, CO₃²⁻, O²⁻...) se fait au travers de l'électrolyte, sous une forme plus ou moins hydratée. Les électrons sont collectés par l'anode et rejoignent la cathode en traversant la charge qui peut être par exemple un moteur électrique.

Dans le cas de la réaction la plus généralement utilisée, on produit donc, à partir d'hydrogène et d'oxygène, de l'eau, de l'électricité et de la chaleur. On peut considérer que le processus s'apparente à la réaction inverse de l'électrolyse de l'eau.

Chaque cellule élémentaire d'une pile à combustible comprend deux électrodes, en général poreuses, et chargées en catalyseur plus ou moins noble qui coûtent cher.

- L'anode est alimentée en combustible (hydrogène, ...),
- La cathode est alimentée en comburant (oxygène, ...).

Cette alimentation se fait par des canaux spéciaux, qui se chargent d'acheminer les gaz réactifs aux électrodes, éventuellement, les sous produits des réactions sont aussi évacués par d'autres canaux.

Les électrodes sont séparées par un électrolyte, solide ou liquide, dont le rôle est de permettre la migration des ions de l'une à l'autre, sous l'effet du champ électrique créé. Certains de ces électrolytes ne sont efficaces c'est-à-dire plus conductrice d'ions qu'à hautes températures, et nécessitent donc un préchauffage externe avant toute production d'électricité. Ce qui n'est pas sans augmenter les coûts d'exploitation de telles piles à combustible.

Une partie de la difficulté de la conception des piles à combustibles est liée à la création de zones actives, qui doivent mettre en présence à la fois le gaz réactif, les électrons, les protons et le catalyseur. Cette condition est remplie si l'électrolyte recouvre le catalyseur qui est le plus souvent du platine, et le gaz diffuse à travers les électrodes poreuses. Il faut donc assurer le transport de chacune des phases jusqu'au triple contact : gaz, électrolyte, métal. Pour mieux appréhender ce fonctionnement général essayons de voir de plus près la composition de chacun des six types de pile à combustible.

2-3) Pile alcaline (AFC)

Bien que parmi les plus anciennement développées, et utilisées dans les programmes spatiaux de la NASA, les piles alcalines ont été mises à l'écart depuis quelques années au profit du développement des autres types de piles. Elles travaillent en moyenne température, aux environs de 100 à 120 °C, à pression atmosphérique, mais peuvent supporter jusqu'à 230 °C à

plus forte pression. Elles nécessitent la présence de catalyseurs nobles à la cathode, mais peuvent s'en passer à l'anode où le nickel est suffisant.

- **L'électrolyte**

Ces piles utilisent de la potasse sous forme aqueuse (KOH) comme électrolyte. Elles doivent être alimentées en gaz réactifs ne contenant ni CO qui empoisonnent les catalyseurs à base de platine, ni CO₂, pour éviter tout problème de consommation de l'électrolyte par précipitation de carbonates.

- **Les électrodes**

Ces piles nécessitent la présence de catalyseurs nobles à la cathode, mais peuvent s'en passer à l'anode où le nickel est suffisant. En fait, elles n'ont pas pu bénéficier pleinement des développements récents, qui sont principalement financés pour les applications de transport, ce qui n'est pas favorable, a priori, aux systèmes contenant un électrolyte liquide

Pendant, leur coût et leur poids plus faibles que ceux des piles à solutions acides laissent de bonnes potentialités d'applications statiques.

2-4) Pile à membrane échangeuse de protons (PEMFC)

C'est une pile à faible température de fonctionnement qui commence aux environs de 25 °C jusqu'à 80°C. Elle se nomme aussi en anglais : SPEFC (Solid Polymer Electrolyte Fuel Cell) ou encore IEMFC (Ion Exchange Membrane Fuel Cell). Cette type de pile qui la plus célèbre grâce à ses avantages multiples est constituée de : un électrolyte qui est la membrane ici, des électrodes, des plaques de diffusion (backing) et des plaques bipolaires. Pour mieux comprendre ce type de pile en détail, observons les schémas suivants.

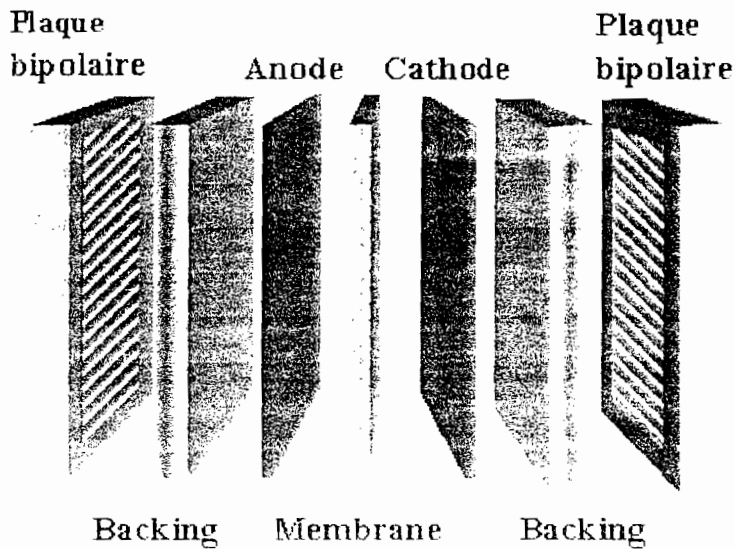


Figure4 : Schéma générale d'une pile PEMFC (Tiré www.clubpac.net)

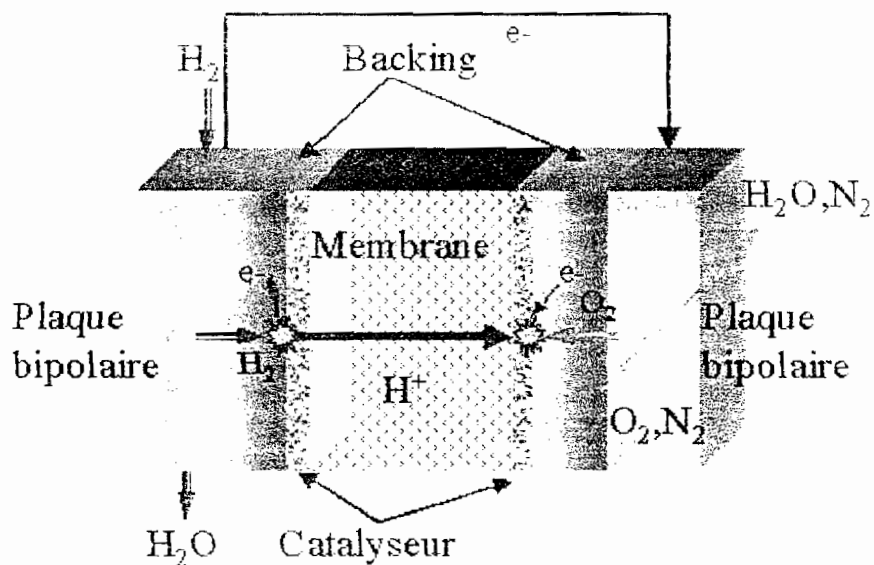


Figure 5: schéma détaillé d'une pile PEMFC (tiré de www.clubpac.net)

- L'électrolyte

L'électrolyte est ici une membrane polymère ionique de type acide, en général il s'agit d'une membrane perfluorée sur laquelle sont greffés des groupements acides sulfonates. Le modèle le plus répandu de ces membranes est le nafion, fabriquée par la firme Du Pont de Nemours. Ce type de membrane retient les ions négatifs et laisse passer les ions H^+ (protons) qui sont

alors mobiles et libres de se transporter en tant que charge positive à travers la membrane, de l'anode vers la cathode. Ce mouvement de charge ainsi décrit est interne à la pile.

Si l'anode et la cathode sont reliées par un fil électrique par l'intermédiaire d'un ampèremètre, ce dernier mesurera un courant électrique qui serait l'équivalent d'un mouvement d'électrons dans ce circuit extérieure à la pile.

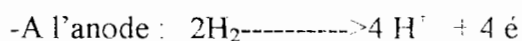
Cependant la conductivité ionique de la membrane dépend de la température. La membrane doit toujours rester saturée d'eau pour un meilleur déplacement des protons

La membrane doit interdire le passage de l'oxygène et de l'azote mais aussi celui des électrons.

Des études du Club PAC (club pile à combustible) montrent que ces membranes ont des durées de vie de 3500 à 4500 heures pour un fonctionnement entre 25 et 90 ° C

- **Les électrodes**

Elles permettent de dissocier l'hydrogène et de transférer les protons vers l'électrolyte. Les électrodes sont généralement à base de platine en fines particules sur du charbon noir actif de telle sorte que la teneur en platine est de 0.1 à 1mg/cm². Ainsi la platine catalyse les réactions anodique et cathodique



- **Les backings (plaques de diffusion)**

Elles sont conductrices et poreuses. En entourant les électrodes, ils permettent la diffusion des gaz jusqu'à celles-ci d'une part, ensuite le transfert des électrons de l'anode vers la cathode d'autre part.

- **Les plaques bipolaires**

Elles sont souvent en graphite et servent à gérer la distribution des gaz, hydrogène et oxygène, et l'évacuation de l'eau issus du fonctionnement de la pile à combustible. Ces plaques sont placées sur les parties les plus extérieures de la pile.

2-5) Pile à méthanol direct (DMFC)

Les DMFC sont des types de pile spéciales, car à la différence des autres piles alimentées en hydrogène, elles sont **alimentées directement en méthanol**. En effet le méthanol et l'hydrogène sont avec le glycol, l'ammoniac et l'hydrazine les rares réactifs qui ont des caractéristiques d'oxydation suffisamment intéressantes pour pouvoir être utilisés dans les piles à combustible fonctionnant à basse ou moyenne température. C'est un type de pile relativement nouveau, ce qui fait que de nombreuses et significatives améliorations ont déjà été réalisées ces dernières années au niveau du cœur de pile : densité, puissance, rendement et durée de vie.

L'avantage décisif par rapport aux PEMFC est le fait qu'elles fonctionnent directement au méthanol, un carburant certes toxique, mais liquide à température normale, actuellement produit à partir de gaz naturel. Sa production est également possible à partir de pétrole, du charbon ou de la biomasse. Le méthanol a aussi l'avantage d'être plus vendu. D'ailleurs il bénéficie en Europe des infrastructures existantes de l'essence pour sa commercialisation. Ainsi les voitures qui utilisent cette pile ne changeront pas de localité d'approvisionnement.

- **L'électrolyte**

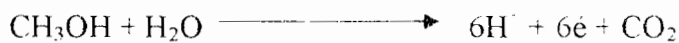
L'électrolyte de ce type de pile est de type acide, soit une **membrane polymère**, soit un électrolyte liquide. Avec un électrolyte alcalin, le CO_2 produit par l'oxydation du méthanol réagirait avec les ions hydroxyde. Ce qui crée une consommation de l'électrolyte par précipitation de carbonate. De ce fait les constructeurs utilisent surtout des membranes de même nature que celle des piles PEMFC.

Un autre problème vient de l'infiltration du méthanol à travers la membrane vers la cathode et son oxydation avec l'oxygène en dioxyde de carbone et eau (sans fournir de courant). Ce phénomène est dit **cross over** et c'est une perte de combustible estimée à 10%. Une solution pourrait venir d'une membrane plus étanche au méthanol tout en ayant une conductivité ionique acceptable. Si des progrès importants ont été faits permettant de réduire considérablement l'infiltration du méthanol, ils ont pour conséquence une augmentation de la

résistance des membranes et une hausse des coûts de fabrication. Energy Vision Inc. (EVI, ex Energy Ventures), un des fabricants de DMFC, a développé une technologie pour récupérer le méthanol et éviter cette réaction. Ceci est réalisé grâce à un électrolyte circulant qui permet ainsi d'assurer le contrôle des concentrations des produits, du pH, de l'humidité et de la température de la pile. EVI travaille également à la réduction de la quantité de catalyseur dans les électrodes.

- **Les électrodes**

A l'anode : le combustible étant un **mélange d'eau et de méthanol**, il réagit directement à l'anode selon :



La température d'ébullition du méthanol à la pression atmosphérique est assez basse (65°C), cela nécessite donc une température de fonctionnement autour de $60\text{-}70^\circ\text{C}$ (pour éviter une pression de vapeur trop élevée).

Le mécanisme réactionnel est beaucoup plus complexe. En effet elle donne naissance parallèlement à des produits poison pour le platine tels que PtCOH et PtCO . Ainsi pour neutraliser ces poisons de platine on fait appel au ruthénium selon un procédé de réactions successives.

A cette réaction électrochimique (le bilan écrit ci haut) correspond un potentiel anodique $E_a = -0,016 \text{ V}$.

A la cathode, l'oxygène de l'air réagit selon la réaction suivante :



Le potentiel cathodique est: $E_c = 1,23 \text{ V}$. Au total, la réaction est:



Cela correspond à une force électromotrice (fém) de $1,214 \text{ V}$ dans les conditions standards (à 25°C sous 1 bar). Théoriquement, on pourrait atteindre un rendement de $91,7 \%$. Cependant ce rendement est limité par :

- d'une part, par le fait que la réaction d'oxydation n'est pas toujours complète, ce qui constitue une réduction de rendement de façon interne.
- d'autre part, les potentiels d'électrode pratiques sont très différents des valeurs théoriques en raison des chutes de tensions importantes (autour de 0,3V à l'anode et 0,4V à la cathode). A cela s'ajoute aussi l'empoisonnement des électrodes par les produits intermédiaires des réactions qui ne sont pas évitable à 100%.

Tout ceci fait que le rendement pratique est en moyenne faible et tourne autour de 50%.

Au niveau des électrodes, les seuls catalyseurs suffisamment actifs pour oxyder le méthanol et stables à 60°C sont essentiellement des alliages métalliques à base de platine (Pt-Sn, Pt-Re, Pt-Ru). Le même problème de coût qu'avec les PEMFC se pose donc, d'autant plus que les densités surfaciques de courant sont faibles (50 à 250 ^{mA} mW/cm^2) et que les quantités de platine sont importantes ($2 \text{ mg}/\text{cm}^2$) en raison de la plus faible réactivité du méthanol en comparaison à l'hydrogène. Des travaux sont donc réalisés sur de nouveaux alliages à base de platine et de nouvelles structures pour les électrodes, par exemple Institute of Transportation Studies, (University of California-Davis) est mené un projet "Catalysts for Direct Methanol Fuel Cells". Un autre axe de recherche est la baisse de la température de fonctionnement à des valeurs plus basses.

Essayons de voir plus clairement le fonctionnement dans ce schéma.

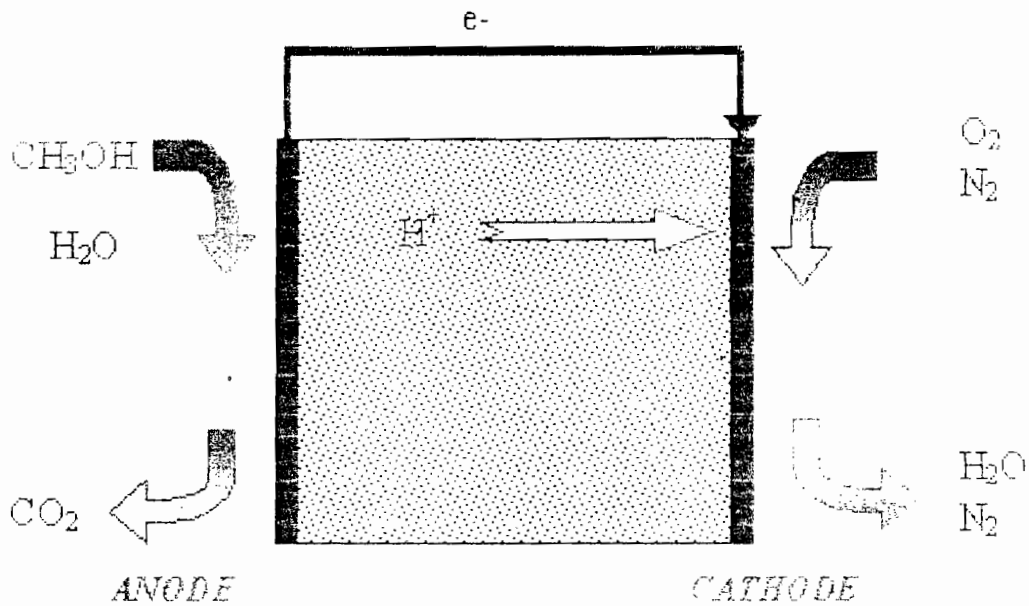


Figure 6 : schéma de principe de la pile DMFC (tire de [www.pile-au-methanol](http://www.pile-au-methanol.com))

2-6) Pile à acide phosphorique (PAFC)

Ces types de pile sont caractérisés par :

- **Electrolyte**

L'électrolyte de ces piles est de l'acide phosphorique H_3PO_4 . Ici l'électrolyte est contenu dans une matrice poreuse. Un des avantages de l'acide phosphorique est qu'il ne réagit pas avec le CO_2 , d'où la possibilité d'utiliser de gaz issus de reformage contenant donc du CO_2 .

Cependant ces piles exigent d'être maintenues à des températures supérieures à 42°C même à l'arrêt pour éviter la solidification de l'acide phosphorique ($T_s(\text{H}_3\text{PO}_4)=42^\circ\text{C}$).

La température de fonctionnement étant entre 180°C et 210°C , il faudrait nécessairement un système de régulation par eau ou par air par exemple, pour éviter l'évaporation de l'électrolyte qui entraînerait la diminution de l'électrolyte au cours du temps.

- **Les électrodes**

Elles sont réalisées en charbon actif et sont recouvert de platine. Ce qui permet la catalyse des réactions suivantes :



- **Plaques d'interconnexion**

Ces plaques ont une épaisseur de 1.5 à 2 mm qui permettent l'interconnexion électrique et l'alimentation en gaz des électrodes. Ces plaques sont nervurées ou rainurées avec des orientations de forme qui permettent la bonne circulation des gaz ainsi que des électrons. Elles sont réalisées par moulage de fibre de carbone lié par une résine phénolique.

Ces piles ont un rendement de 40% environ. Ce rendement diminue avec le temps à cause de la corrosion des électrodes par l'acide phosphorique mais aussi à cause de l'évaporation de l'électrolyte.

L'intérêt de ces piles est la chaleur produite qui est à une température de 85 °C environ.

2-7) Pile à carbonate fondu (MCFC)

Les MCFC (Molten Carbonate Fuel Cell) ou piles à carbonates fondus font partie avec les piles à oxyde solide (SOFC) des piles à haute température de fonctionnement. Leur développement a commencé plus récemment, elles sont donc considérées comme des piles de seconde génération.

- **L'électrolyte**

L'électrolyte de ces piles est un mélange eutectique de carbonates de lithium et de potassium ($\text{Li}_2\text{CO}_3/\text{K}_2\text{CO}_3$, 62% - 38%). Ces composés ont des propriétés très intéressantes telles que une bonne conductivité ionique entre 600 et 700°C, un point de fusion assez bas et leur non toxicité. La température de fonctionnement se situe entre 600 et 660°C. Les carbonates sont maintenus dans une matrice en aluminate de lithium (Li AlO_2). Son épaisseur est de l'ordre de 400 nm. A la différence des PAFC où l'électrolyte était maintenu par une matrice en

polymère, de tels matériaux n'existent pas à ce niveau de température. Il est nécessaire d'avoir une interface électrode électrolyte stable. Pour baisser la température de l'électrolyte. Un des problèmes de ce type d'électrolyte est la corrosion des électrodes mais aussi son évaporation qui le diminue dans le temps.

- **Les électrodes**

Dans ce type de pile, les ions traversant l'électrolyte sont les ions carbonates CO_3^{2-} .

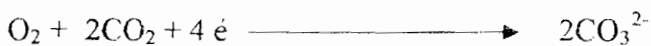
A l'anode, la réaction d'oxydation est la suivante :



Dans le cas où l'hydrogène est produit par reformage à partir d'un autre dérivé hydrocarboné, du monoxyde de carbone est aussi présent dans le reformat, cette réaction prend alors la forme suivante:



A la cathode, la réaction effectuée est la suivante :



La réaction bilan devient donc (dans le cas de l'hydrogène à l'anode):



Les ions carbonates ainsi que le CO_2 prennent part aux réactions et ne constituent pas des poisons de platine. Par ailleurs, le CO_2 produit à l'anode doit être transporté vers la cathode pour y être utilisé. On utilise principalement deux méthodes pour utiliser tout le CO_2 à la cathode.

- Brûler les gaz de la cathode avec un excès d'air,
- Utiliser un "product exchange device" pour séparer le CO_2 de l'anode des excès d'hydrogène et le transférer à la cathode.

La f.e.m. de la pile dépend donc d'une part des concentrations en oxygène, hydrogène et eau, mais aussi des concentrations en CO_2 à l'anode et à la cathode.

Les MCFC n'ont pas le problème de l'empoisonnement par le CO, mais elles ne supportent pas davantage que les autres piles le soufre qui est un grand facteur corrosif. Par ailleurs, on peut assister à des réactions parasites comme la réaction méthanisation par exemple, si on travaille à une pression supérieure à la pression atmosphérique. Cette réaction est la suivante :



Cette réaction consomme du combustible inutilement, d'où le nom de réaction parasite.

Les électrodes sont du type poreux à gaz. En raison du niveau de la température, il n'est plus nécessaire d'utiliser du platine ou d'autres métaux précieux. On utilise généralement du nickel: **à l'anode**, le nickel est sous forme réduite et généralement mélangé avec 2 à 10 % de chrome; **à la cathode**, il est sous forme oxydée et mélangé avec des ions lithium.

- **Les plaques de connexion**

À côté des électrodes se trouvent des plaques d'interconnexion dont les canaux permettent le contact des gaz avec les électrodes. Ces canaux se trouvent sur les deux faces des plaques et sont croisés. Ici encore, elles assument le double rôle de connexion électrique et de distribution des gaz jusqu'aux électrodes. Elles peuvent être réalisées avec divers aciers inoxydables ou d'alliages à base de nickel. Entre ces plaques se trouvent des joints d'étanchéité. Un des problèmes des MCFC réside dans la corrosion de ces plaques ou dans le manque d'étanchéité des joints.

- **Le reformage**

En général, le reformage qui permet d'obtenir le mélange d'hydrogène et de monoxyde de carbone alimentant la pile est externe. Dans le cas de la MCFC, on peut également avoir d'autres configurations, par exemple celle du reformage interne qui est particulièrement utilisé pour les piles à haute température de fonctionnement. Avec la technique du reformage interne, on utilise la chaleur produite dans la pile pour déclencher les réactions électrochimiques.

Nous remarquons que dans le reformage on ajout de l'eau au méthane. Cela est fait pour éviter la formation de carbone graphite qui en plus du noircissement des surfaces auxquelles il est en contact, constitue une masse solide pouvant boucher la sortie du reformeur.

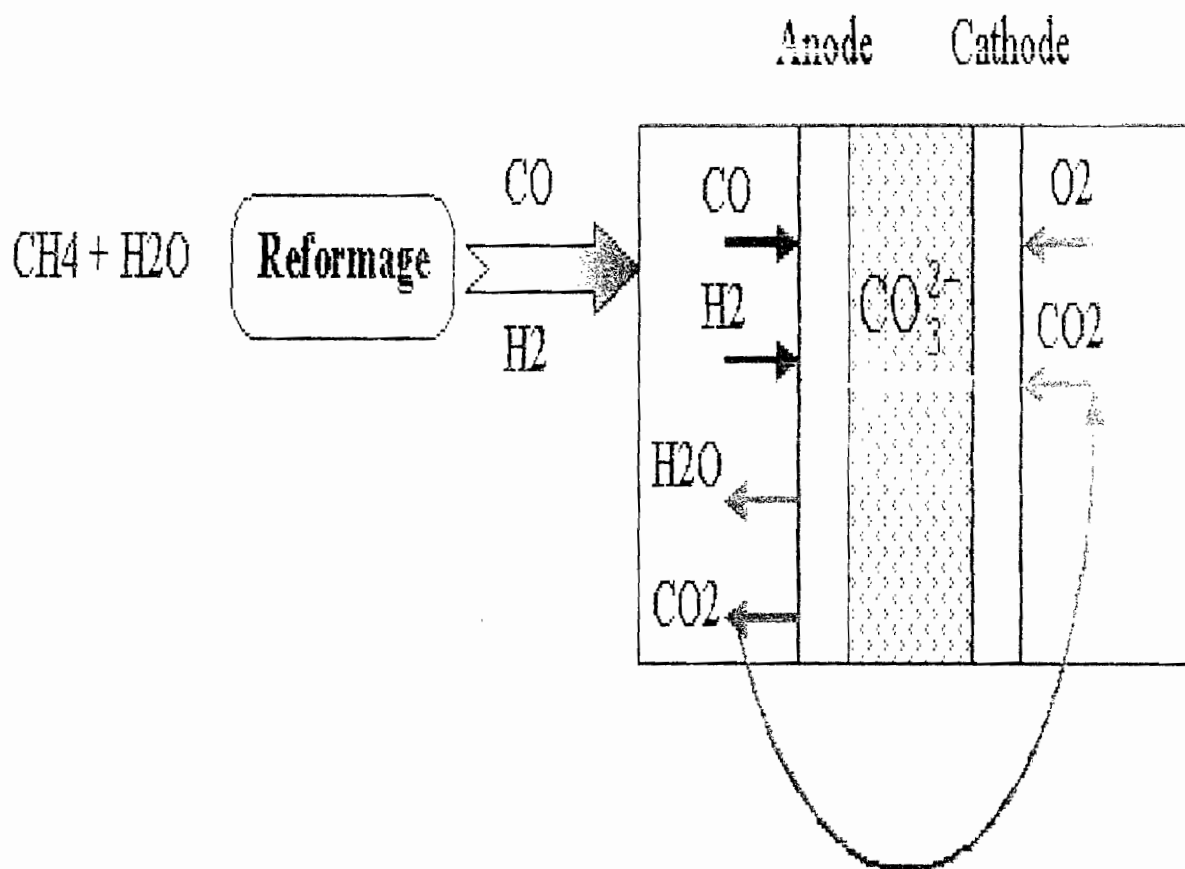


Figure7 : Reformage externe (tiré de

www.pileacombustible.fr.st)

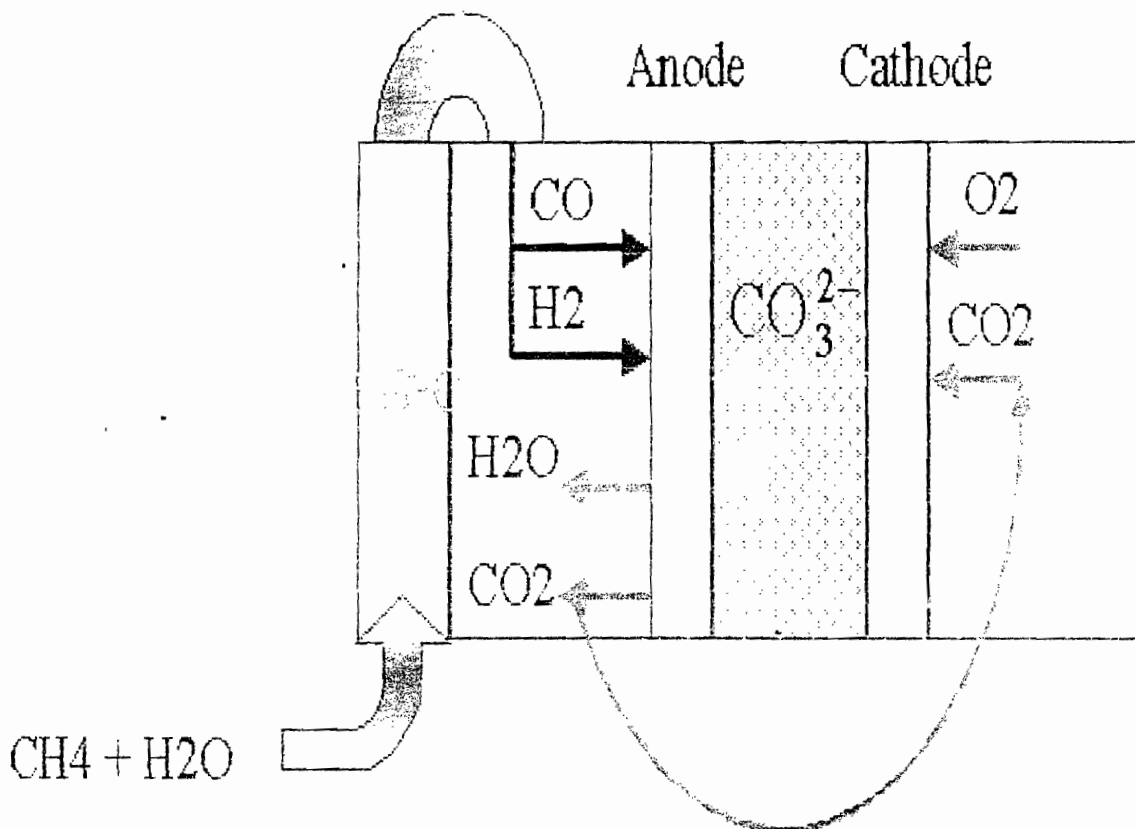


Figure 8 : Reformage interne (tiré de www.pileacombustible.fr.st)

Par rapport aux autres piles, les MCFC ont de **nombreux avantages**, en particulier.

- un rendement électrique élevé (60%).
- l'utilisation de la chaleur produite pour de la cogénération, voir le reformage interne ou un couplage avec une turbine,
- la possibilité d'utiliser des carburants comme le méthane, le méthanol, l'éthanol ou le charbon gazéifié...
- l'utilisation de métaux non précieux pour les électrodes.

Les **difficultés** majeures de ce type de pile sont d'ordre technologique. En fonctionnant dans un milieu très corrosif à température assez élevée, ce type de pile rencontre des problèmes de corrosion de l'oxyde de nickel par l'électrolyte. Des métaux plus résistants sont recherchés pour remplacer l'oxyde de nickel. Il se pose également des problèmes d'étanchéité des cellules sur ce type de pile.

2-8) Pile à oxyde solide (SOFC)

Les piles à oxyde solide sont également des piles à haute température, tout comme les MCFC. Elles sont potentiellement plus intéressantes par leur rendement électrique élevé (50 % à 70 %), une moindre sensibilité au type de combustible, le remplacement des métaux précieux aux électrodes par d'autres moins chers, l'utilisation de la chaleur produite. Mais ces hautes températures apportent toujours comme nous l'avons vu précédemment, de nouvelles exigences pour les matériaux de la pile.

- **Différentiels types de technologie des piles à oxyde solide**

En fonction de la géométrie on trouve plusieurs technologies dans ces piles.

- **la technologie cylindrique**

Développée par Westinghouse, un tube en zircone poreuse sert de support à la cathode, l'électrolyte, et l'anode, qui l'entourent sous forme de couches circulaires. L'air passe à l'intérieur du tube support tandis que le combustible passe à l'extérieur de la structure dont une partie est oxydée et l'autre est mélangée avec l'air sortant pour être réchauffé. Les tubes sont placés en parallèle et connectés par des plaques de nickel et ont une longueur de 1,5 m pour un diamètre de 22 mm.

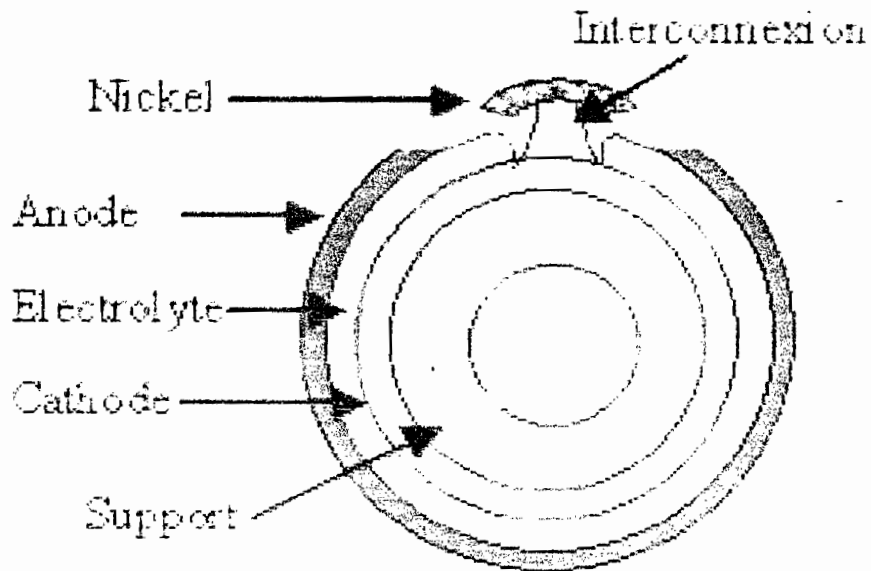


Figure 9 : Cellule élémentaire de la technologie tubulaire SOFC

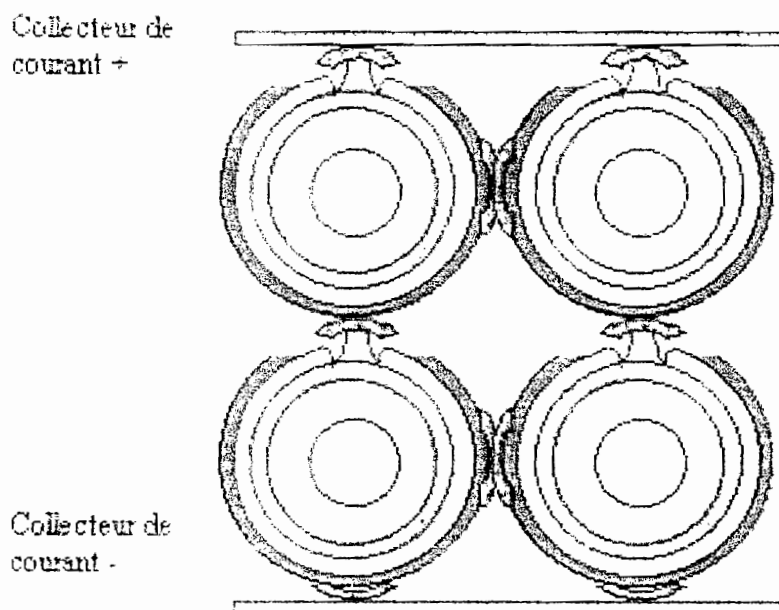


Figure 10 : Technologie tubulaire

Figures 9, 10 11 sont tirées de www.veill.reseupaco.org

- la **technologie plane**

Développée par certaines entreprises telles que Siemens. Cette technologie donne une structure plus compacte et beaucoup plus simple. La cellule élémentaire est constituée par les électrodes entourant l'électrolyte. Chaque cellule élémentaire est reliée aux autres par des plaques bipolaires et séparée des autres par des joints d'étanchéité. Le problème essentiel de ce type de structure vient de l'étanchéité des cellules.

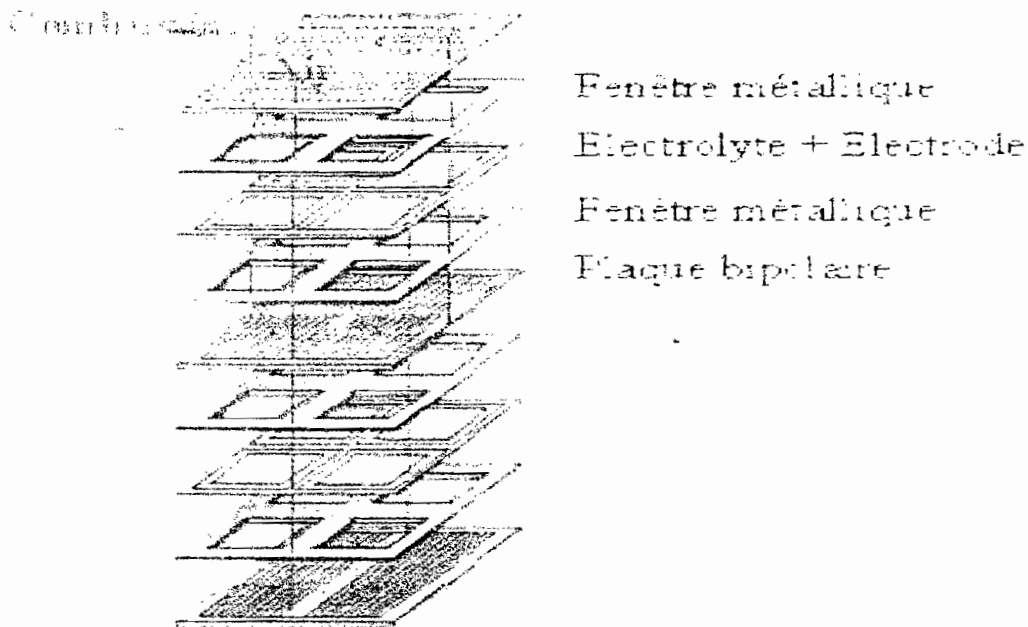


Figure 11 : Technologie plane

- la **technologie de la société Sulzer Hexis**

Elle est un peu le composé des deux premières technologies car ces SOFC sont planes et circulaires. Chaque cellule comporte un électrolyte entouré de ses électrodes et est séparée des autres par des échangeurs qui jouent aussi le rôle d'interconnexion. Sulzer développe des piles de petite puissance (1 kW).

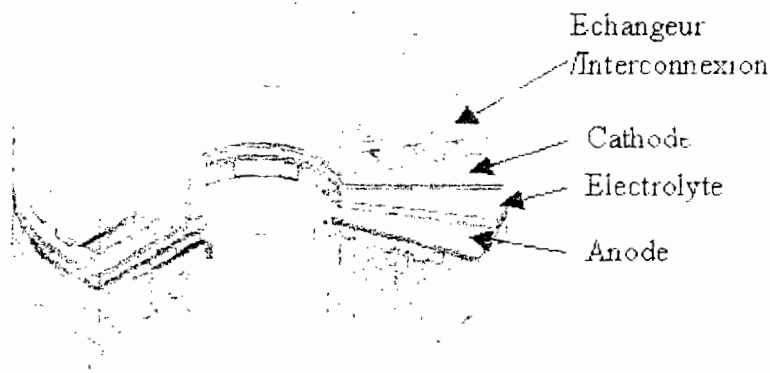


Figure 12 : Pile de Sulzer Hexis(www.sulzerpac.fr)

o la technologie monolithique

Elle est plus récente et développée par Argonne National Laboratory. L'anode et la cathode sont sous forme de couches plissées, séparés par des joints d'étanchéité et l'électrolyte. Le flux du comburant et du combustible peut être parallèles ou croisés. Par rapport à la configuration tubulaire, de plus hautes densités de puissance sont possibles. On bénéficie ici d'un début de miniaturisation. L'état actuel de la technologie de cette pile ne nous permet pas d'y faire un développement.

De manière générale, les matériaux utilisés doivent être stables chimiquement à la fois dans des atmosphères réductrices ou oxydantes, mais aussi entre eux. De plus, vu le niveau de température qui est relativement élevé, il est nécessaire que les composants aient des coefficients de dilatation identique pour harmoniser les contraintes mécaniques s'exerçant sur les matériaux.

• L'électrolyte

Les SOFC ont un électrolyte solide qui doit être un bon conducteur ionique pour les ions O^{2-} qui diffusent à travers l'électrolyte. Ce qui justifie le choix d'une température de fonctionnement élevée, entre 800 et 1000°C imposée par l'électrolyte, car la conductivité ionique augmente avec la température. Il doit aussi ne pas conduire les électrons et avoir une bonne résistance mécanique et chimique. On a donc choisi pour l'électrolyte des céramiques, le plus souvent, il s'agit de zircon stabilisée à l'yttrium de formule $(ZrO_2)_{1-x}(Y_2O_3)_x$. En effet,

pour améliorer les propriétés de conductivité ionique et mécaniques des zircons ZrO_2 , on les dope avec des ions Y^{3+} , voire Ca^{3+} , Sc^{3+} , Ln^{3+} créant ainsi des lacunes électroniques et permettant la mobilité des ions oxygène.

Le problème des zircons est la baisse de leur conductivité avec le temps. On cherche donc à développer de nouveaux matériaux: on peut ainsi trouver des composés avec Ce à la place de Zr et Sc, Ca ou Ln à la place de Y, des gallanates de lanthanide. On espère pouvoir baisser la température de fonctionnement grâce à ces nouveaux matériaux. En fait, les recherches sont faites pour développer une SOFC fonctionnant à une température plus basse: $700^\circ C$, ce qui permettrait de diminuer les contraintes sur les matériaux.

- **Les électrodes**

Dans ce type de pile, on a seulement deux phases: solide et gazeuse, ce qui supprime du coup les problèmes liés à la gestion des trois phases, étanchéité, corrosion etc... Les électrodes sont de type poreux pour permettre un accès rapide des gaz aux lieux d'oxydoréduction. Les ions traversant l'électrolyte sont les ions oxygène: O^{2-} .

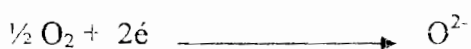
A l'anode, la réaction d'oxydation est:



Comme pour les MCFC, on peut utiliser un combustible autre que l'hydrogène: méthane, méthanol, charbon gazéifié, essence..., qui après reformage seront sous forme d'un mélange contenant essentiellement H_2 et CO . Dans ce dernier cas la réaction avec le CO prend la forme suivante:



A la cathode, la réaction électrochimique devient:



L'anode est très souvent un cermet (céramique métallique) à base de nickel dispersé sur de la zircone stabilisée.

A la cathode, le catalyseur est un système d'oxydes à base de terre rare et d'un métal de transition. Le plus souvent, on utilise du manganite de lanthane souvent dopé au strontium: $(\text{LaSr})\text{MnO}_3$. Mais en raison des écarts entre la dilatation de l'électrode et celle de l'électrolyte, on remplace La par Ca. De plus, il peut se former des couches de passivation: pour y remédier, on remplace Sr par Ca.

Parmi les facteurs influençant le fonctionnement des SOFC: la pression permet de diminuer les surtensions; une baisse de la température fait également diminuer la conductivité ionique de l'électrolyte et agit donc négativement.

- **Les plaques bipolaires**

Les plaques bipolaires (ou inter connecteurs) doivent à la fois permettre de collecter le courant (conductivité électronique) et de séparer carburant et combustible (étanchéité). En raison du niveau de température élevé, elles doivent avoir une bonne résistance en milieu oxydant et réducteur. On utilise des chromites de lanthane dopé aux strontium ou au calcium, où l'on insère parfois en plus du nickel ou du cobalt. Pour les configurations planes, on utilise des matériaux métalliques à base de chrome avec Y, La, Zr.

- **Le reformage interne**

Le combustible arrivant à l'anode doit être à base de H_2 et CO , mais à la base, les SOFC peuvent fonctionner avec de nombreux carburants: méthane, carburants liquides, charbon, ... La haute température de fonctionnement des SOFC permet de réaliser un reformage interne du carburant utilisé (par exemple, le méthane). A ce niveau de température, on choisit en général la technique de **vaporeformage**, réaction endothermique imposant des températures de l'ordre de 800°C . Cela permet de produire le mélange de CO et de H_2 nécessaire à la pile. En revanche, on tente d'éviter les réactions formant du C graphite en fonctionnant avec une forte pression partielle en eau. Cette réaction nécessite des catalyseurs tels que Ru, Rh, Ni..., qui sont répartis sur toute l'anode. On utilise plutôt le Nickel en raison de son coût plus supportable. Par rapport à l'utilisation d'un reformeur externe, le reformage interne offre l'avantage d'une très grande compacité du système, le tout dans un seul bloc, mais aussi plus économique

III. APPLICATIONS ET PERSPECTIVES D'APPLICATIONS DES PILES A COMBUSTIBLES

Les piles à combustibles sont de plus en plus impliquées dans des diverses applications. Les domaines d'applications sont nombreuses mais on peut citer les plus récentes notamment dans les domaines spatiaux, automobiles et stationnaires.

III – 1 Pile alcaline (AFC)

Ces piles ont diverses applications dans plusieurs domaines différents. Essayons d'en voir quelques unes ainsi des perspectives d'applications

○ Applications aérospatiales

La première pile AFC à être utilisée dans une application spatiale fut conçue par Francis Bacon dans les années 50. La puissance de la pile était de 6 kW et comprenait 40 cellules avec des électrodes en Nickel à l'anode et en oxyde de Nickel dopé au Lithium à la cathode. Elle fonctionnait sous pression, 50 bar, et à des températures élevées (200°C).

D'autres piles AFC furent utilisées dans les programmes spatiaux de la NASA. Elles fonctionnaient sous des conditions relativement exigeantes: une température de plus de 200°C pour une pression de 3,3 bar. Ces piles ont été utilisées pour des missions lunaires, les missions Skylab et Apollo Soyouz. Dès 1974, des piles de 12 kW furent développées fonctionnant à des températures proches de 90°C sous une pression de 4 bars. Ces dernières piles ont des performances bien supérieures en termes de puissance. Dans leur utilisation comme générateur d'électricité à bord des véhicules spatiaux et dans les sous-marins, elles utilisent un électrolyte liquide avec une solution d'hydroxyde de potassium circulant entre l'hydrogène et l'oxygène ou l'air.

○ Applications automobiles

Le constructeur anglais **ZeTek Power Corporation** (ex Elenco), produit ce type de piles pour un taxi électrique utilisant des batteries de 70kW. C'est donc un véhicule zéro émission pouvant être inséré dans le transport intra urbain sans menace de pollution.

Ce constructeur a aussi construit des prototypes de petits bateaux et des camionnettes avec des modules de 2,5 à 10 kW.

D'ailleurs ce constructeur est l'auteur d'un procédé d'élimination du CO₂ avec une fibre en composite de carbone dont la surface peut absorber le CO₂ par accumulation sélective du gaz

avant qu'il ne pénètre dans la pile. Ce dispositif peut aussi être employé pour éliminer le CO_2 de l'hydrogène obtenu par reformage d'autres carburants comme le gaz naturel. L'un des facteurs de ces applications, est que les plaques d'interconnexion de ce type de pile sont en nickel ou en acier inoxydable et peuvent résister à la corrosion.

On peut citer d'autres entreprises qui travaillent dans l'application automobile de ces piles à combustible.

Par exemple Astris Inc. a développé un véhicule de golf avec des batteries alimentées en hydrogène gazeux, d'une puissance de 3,6 kW.

La firme Electric Auto Corporation qui est devenu maintenant Apollo Energy Systems, Inc., s'intéresse aussi aux piles ou batteries dans des véhicules électriques du type véhicule de golf, de proximité.

○ Applications stationnaires

Ces piles pourraient être utilisées dans des applications de secours (militaire, alimentation pour des centres informatiques). L'entreprise Greenvolt développe des piles AFC de faible puissance dans une approche modulaire avec des batteries de 3 à 5 kW.

Les piles AFC peuvent trouver des débouchés dans des applications exigeantes et coûteuses pour des raisons environnementales, mais pas pour des applications à objet économique dans le domaine automobile ou stationnaire.

III – 2 Pile à membrane échangeuse de protons (PEMFC)

Au début ces types de piles étaient développés pour des applications spatiales uniquement. Ainsi en 1963, la firme General Electric (GE) présenta un module de 1 kW. Ces travaux furent poursuivis au milieu des années 80 avec United Technologies Corporation (UTC) pour toujours le domaine spatial.

C'est Siemens qui développa des PEMFC pour les sous marins (avec une licence GE). Mais le véritable démarrage de ces application à eut lieu avec Ballard Power Systems en 1983, sur la base d'une membrane de DOW Chemical.

○ Applications automobiles

Les PEMFC sont particulièrement adaptées aux applications automobiles par:

- leur faible température de fonctionnement,
- leur simplicité de fabrication,
- leur adéquation avec la nécessité de nombreux démarrages,
- leur meilleure réactivité,
- leur bon rendement aux puissances inférieures à la puissance nominale.

Ces piles peuvent être utilisées comme système principal d'alimentation d'énergie pour un moteur électrique responsable du mouvement du véhicule ou bien comme alimentation d'entités secondaire, par exemple servomoteur d'asservissement, climatisation de véhicule, etc....

De nombreux prototypes de véhicules existent avec une pile de type PEMFC au cœur. Daimler Chrysler et Ballard sont les plus avancées dans ce domaine ; en 1994, elles construisent en collaboration leur premier véhicule **NECAR** (New Electric Car). Après cela ont suivi les autres prototypes NECAR II, III, IV qui fonctionnent avec de l'hydrogène et de l'air. Parallèlement, elles développent des bus. En 1997, elle présente le **NEBUS** (New Electric Bus) fonctionnant avec hydrogène plus air. Ces bus ont été introduits dans les grandes villes du monde pour des besoins de test et de publicité, en Californie, à Tokyo,...

Actuellement plusieurs sociétés du domaine automobile ont déjà réalisé des prototypes de véhicule muni d'une pile à combustible. Parmi ces nombreuses organisations on peut citer : Renault, General Motors, Opel, Volkswagen, Toyota, Nissan, Ford, etc....

○ Applications stationnaires

Dans ces applications stationnaires, on trouve d'abord les applications domestiques avec des petites puissances de l'ordre de 1 à 5 kW. Certains constructeurs comptent sur un marché de 4% des habitations individuelles aux USA. Le constructeur allemand Vaillant compte sur un marché dont les besoins seront estimés à 100.000 PEMFC par an à partir de 2010. Cependant ces prévisions de la demande sont souvent faussées par le manque de données fiables sur la rentabilité future de ces piles et aussi sur la diminution des coûts d'acquisitions et d'installation.

A côté de ces applications de petite taille viennent celles de cogénération pour les communes, jusqu'à la cogénération de moyenne puissance jusque 1 MW. Pour les PEMFC de cette taille, les premières installations en test (250 kW à Berlin) sont toujours en étude.

- **Applications portables**

On ne peut pas oublier les nombreuses applications dans les nouvelles technologies de petites dimensions : téléphone, agenda électronique, calculatrice, etc.... Les PEMFC ont un avenir dans cette voie mais le conditionnement du combustible reste à développer suffisamment.

III-3 Pile à méthanol direct (DMFC)

Aujourd'hui plusieurs entreprises travaillent sur le remplacement des rechargeurs de téléphone portable, des batteries d'ordinateur, et des piles classique couramment utilisées, par les piles à méthanol direct. Il s'agit de trouver essentiellement les moyens d'incorporer la quantité de méthanol nécessaire pour assurer l'autonomie voulue selon le besoin.

Les avantages peuvent être importantes mais il faudrait penser au rechargement en méthanol à la fin de l'autonomie. Car acheter une pile chère pour la jeter quelque temps après n'est pas économique.

- **Les applications de l'automobile**

Les DMFC sont utilisées comme alimentation électrique secondaire ou APU (Auxiliary Power Unit) pour les dispositifs de climatisation ou de chauffage par exemple. De plus ces types de piles sont aussi utilisés pour la traction des petits véhicules. Dans ce dernier cas la pile alimente une machine électrique à courant continu qui gère la traction de la voiture.

- **Les applications stationnaires**

On utilise ces piles dans les habitations comme source d'énergie électrique. Ceux sont les militaires américains qui sont les premiers à l'expérimenter dans leurs campements.

Citons quelques entreprises qui travaillent dans ces différentes applications : Energy Vision Inc (EVI), Mechanical Technology Medis, Dupont, H Power Corporation et Manhattan Scientific Inc.

Cependant ces applications restent freinées par le rendement faible de ces piles mais aussi par l'émission de CO₂ qu'il faudra transformer avant leur rejet dans l'atmosphère.

III- 4 Les piles à acide phosphorique (PAFC)

Ce type de pile est une technologie fortement mûrie d'autant plus que le fonctionnement pendant 40 000 heures est prouvé plusieurs fois dans le monde.

Ces piles ont essentiellement des applications stationnaires. Actuellement plus de 350 unités de 200 KW sont déjà testées dans divers domaines.

Les deux installations les plus grandes avec ces PAFC ont été réalisées au Japon : la centrale de 11MW qui a fonctionné continuellement de 1991 à 1997, réalisée par Toshiba IFC (International fuel Cell) et la centrale de 5 MW de Fuji Electric.

Aux USA 30 unités de PAFC de 20 à 200 KW fournissent chaleur et électricité aux bâtiments de l'armée. Ainsi ces piles produisent de la chaleur avec des températures allant jusqu'à 85 °C avec un rendement thermique de 44%.

III -5 Les piles à carbonate fondu (MCFC)

Ces piles sont principalement employées dans des applications stationnaires soit comme centrale électrique soit pour la cogénération.

Ces piles pouvant produire de la chaleur avec des températures allant de 40 à 200 °C qu'on utilise soit pour alimenter des turboalternateurs soit pour le chauffage domestique ou autre besoin thermique.

En Californie précisément à Santa Clara une installation de 2MW a fonctionné pendant 400heures. Par contre des installations de 100 et 250KW ont fonctionné pour la cogénération respectivement à Milan et à Iberdola en Espagne.

III-6 les piles à oxyde solide (SOFC)

Ces piles ont plusieurs applications dans différent domaine.

- **Applications stationnaires**

De même qu'avec la pile précédente, ici la vapeur produite peut tourner des turboalternateurs ou peut être utilisé dans un but de chauffage. Cette pile est particulièrement développée par Sulzer Hexis qui vise des applications industrielles ou domestiques. A part cela le reste des applications est dans le domaine automobile.

○ **Applications automobiles**

Ces piles sont aussi utilisées dans l'automobile que pour l'alimentation secondaire en électricité. Donc utilisation comme APU. De plus ces piles peuvent consommer de l'essence qui sera simplement reformé.

Ces applications et perspectives d'applications nous permettent de connaître le niveau de développement des piles à combustible dans le monde. Mais pour mieux valoriser ces résultats essayons d'étudier une perspective d'application de la pile à membrane échangeuse de protons (PEMFC). Il s'agira d'étudier les possibilités de couplage avec le solaire photovoltaïque par l'intermédiaire d'un électrolyseur d'eau. Nous ferons une étude technico-économique.

IV - ETUDE DE PERSPECTIVE D'APPLICATION : COUPLAGE PHOTOVOLTAÏQUE ET PILE A COMBUSTIBLE (PEMFC)

IV -1 POSITION DU PROBLEME

Depuis très longtemps on sait que les piles à combustibles malgré leurs multiples avantages ont souvent un problème d'alimentation en combustible ou en source de combustible. En effet selon les types de piles le coût du combustible peut être chère.

Particulièrement dans le cas des piles à membrane échangeuses de protons, l'hydrogène qui est utilisé comme combustible n'est pas gratuit. Il est vendu à des prix élevés selon la phase liquide ou gazeuse ou selon la pression. Un litre de gaz hydrogène à deux bars peut coûter facilement 200 000 FCFA selon les prix de Air Liquide

A partir de ce moment il s'avère intéressant de penser à des moyens économiques de production d'hydrogène. C'est dans cet optique que plusieurs organismes de recherches, notamment IFP (institut français du pétrole), NASA (national aeronotic and space administration), les CNRS (centres nationaux de recherche scientifique), sont entrain

d'étudier la production d'hydrogène par électrolyse de l'eau avec le courant photovoltaïque pour ensuite utiliser l'hydrogène dans la pile à membrane. Cependant jusqu'à nos jours ce système est considéré comme une perspective d'application bien vraie que la société High-tech déclare être avancé sur ce sujet. Mais l'évaluation des possibilités économiques et techniques qui devraient faire de ce projet une application tarde à se faire de façon claire et nette, en tout cas au niveau de la communauté scientifique. Essayons d'évaluer ce système mixte photopile, électrolyseur et PEMFC c'est-à-dire, étude de faisabilité technique et économique.

IV-2 RESOLUTION DU PROBLEME

Dans une telle résolution nous serons amenés à suivre les points suivants :

- production d'hydrogène
- stockage de l'hydrogène
- transport de l'hydrogène
- bilan énergétique et étude économique.

Essayons de détailler en suivant ce plan ci haut.

- **Production d'hydrogène**

Il s'agit de la fameuse expérience de la classe de seconde : l'électrolyse de l'eau. Cependant nous remarquons que c'est n'est pas la seule façon de production d'hydrogène car le vaporeformage est plus utilisé en milieu industriel. Donc c'est seulement dans l'étude d'un système composé pile à combustible et solaire photovoltaïque qu'on s'impose l'électrolyse de l'eau comme procédé de production de l'hydrogène. Rappelons le principe qui est très simple.

Si on fait passer un courant continu dans une solution aqueuse de 5 à 20 % de base (NaOH ou KOH) ou d'acide (H₂SO₄ par exemple), l'apport thermoélectrique du courant permet dans des conditions catalytiques données la réaction $2 \text{H}_2\text{O} \longrightarrow 2 \text{H}_2 + \text{O}_2$: électrolyse de l'eau. Nous remarquons que les additifs basique ou acide n'ont pour but que pour rendre la solution conductrice ou électrolytique.

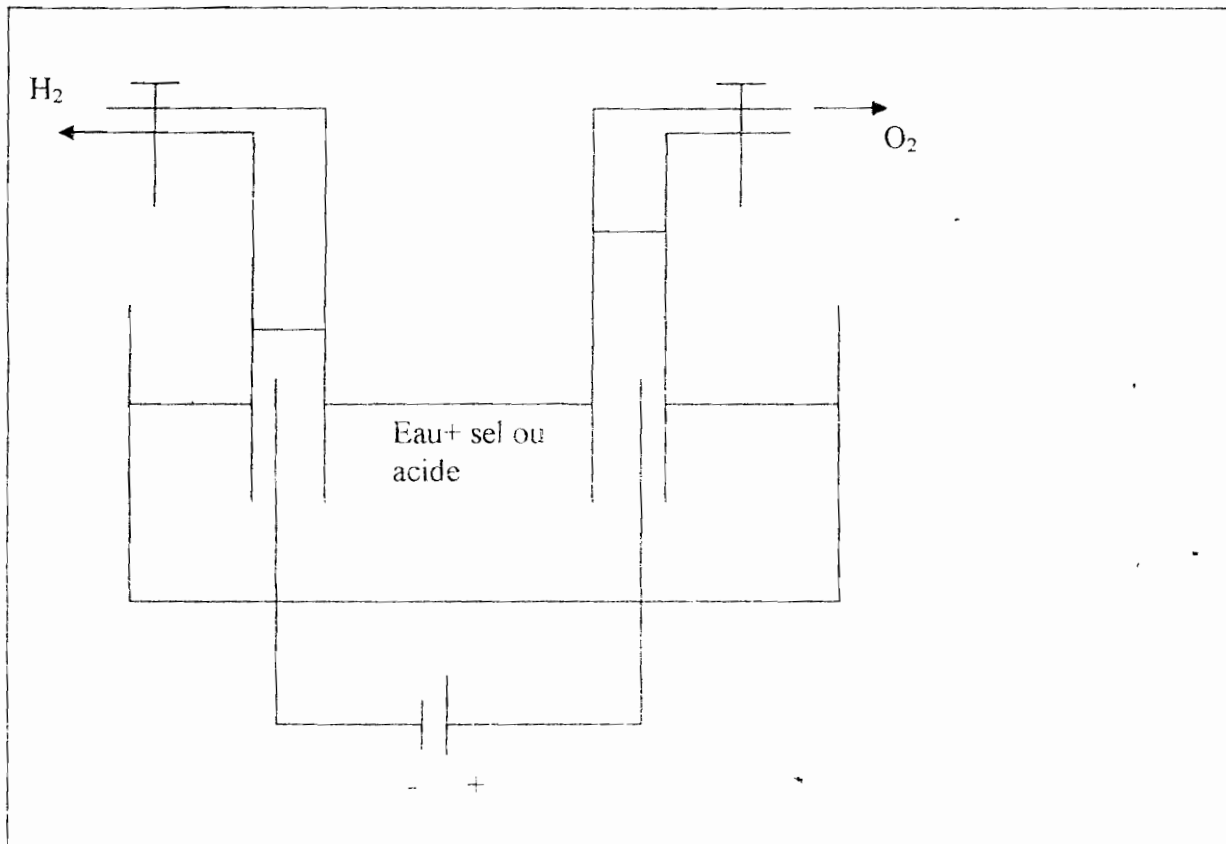


Figure 13 : Représentation sommaire d'un électrolyseur à eau

Rappelons la reconnaissance des gaz : hydrogène et oxygène.

L'hydrogène est recueilli à la cathode, l'électrode négative, il est reconnu par le fait qu'il brûle au contact d'une flamme pour donner que de la vapeur d'eau.

L'oxygène par contre se dégage à l'anode, l'électrode positive, il entretient vivement la combustion et peut même rallumer une allumette incandescente.

Ce même procédé est utilisé au niveau des électrolyseurs industriels qui sont utilisés dans l'unique but de produire de l'hydrogène en quantités intéressantes. Illustrons ces électrolyseurs industriels par quelques exemples.

Exemples :

Voici quelques électrolyseurs industriels fabriqués par VANDENBORRE s.a de STUART ENERGY COMPANY.

IMET série 300, 1 à 3 Nm³/h de H₂.

IMET série 1000, 3 à 60 Nm³/h de H₂.

P_{max} = 25 bar avec pureté en H₂ = 99%.

Puissance consommée = 4.2Kw/Nm³ pour les deux séries.

Nous remarquons que ces électrolyseurs industriels sont munis en interne d'un collecteur et d'un système de compression. Ce qui permet d'avoir en sortie de l'hydrogène à la pression voulu de l'utilisateur.

Pour les séries 300 et 1000 de la marque IMET, la pression maximale disponible est de 25 bars. Ainsi selon les besoins et en fonction des dimensions des conduites de transport et des réservoirs de stockage on peut régler la pression de sortie entre 1 et 25 bars.

• Stockage de l'hydrogène

Dans la résolution de notre problème le stockage de l'hydrogène constitue une substitution aux batteries d'accumulation dans une installation photovoltaïque classique. C'est-à-dire, quand la production d'hydrogène est arrêté pendant la nuit, par défaut de courant photovoltaïque, l'hydrogène stocké alimente la pile à combustible.

Cependant le stockage de l'hydrogène pose un certain nombre de problèmes, notamment celui de pression, une des raisons pour lesquelles nous avons choisi un générateur d'hydrogène sous pression (1 à 25 bars).

Les pressions de stockage les plus courants ne dépassent pas : 350 bars pour des réservoirs en acier ou en titane et 150 bars pour des contenants en plastique renforcée.

Notons que ces pressions relativement élevées sont utilisées que pour permettre le transport de l'hydrogène par détente ou expansion vers la pile à combustible. Sinon la pile à membrane échangeuse de protons est alimentée en gaz à la pression atmosphérique et à la température de 25 °C.

• Transport de l'hydrogène

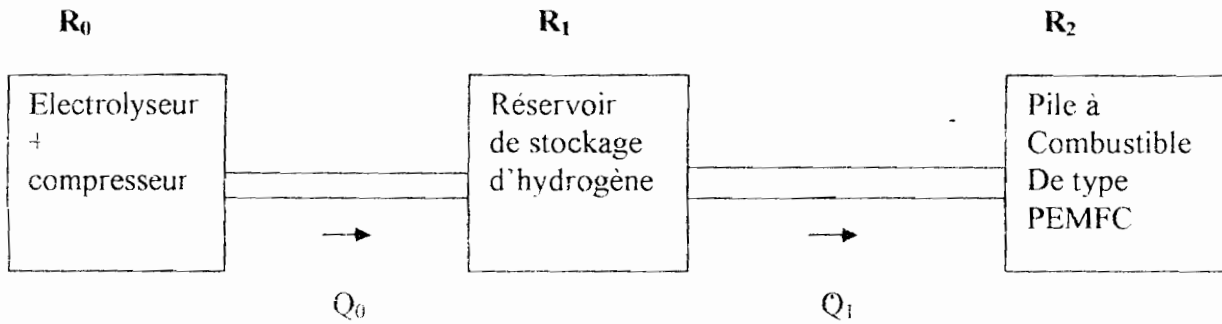


Figure 14 : Représentation du circuit de transport de l'hydrogène.

Nous considérons le générateur d'hydrogène comme un réservoir sous pression d'hydrogène (R_0) car constamment la pression et le volume de H_2 dans le collecteur du générateur est constant. Cela est d'autant plus vrai que le débit de H_2 est constant donc ce qui est généré est égale à ce qui sort. En vertu de tout ceci on peut considérer qu'on est dans les conditions de stagnation à tout moment. Pour mieux étudier ce système d'alimentation en hydrogène, considérons tous les cas possibles. Ainsi selon les heures de fonctionnement trois cas sont possibles. Nommons le réservoir R_1 et la pile à combustible R_2 .

$$\text{-Cas1 : } R_0 \longrightarrow R_1 \longrightarrow R_2$$

Dans ce cas le générateur alimente le réservoir mais en même temps ce dernier approvisionne la pile à combustible.

$$\text{-Cas2 : } R_0 \longrightarrow R_1$$

Dans ce cas le générateur alimente le réservoir R_1 alors que R_1 ne débite pas car la pile à combustible ne produit pas de l'électricité.

$$\text{-Cas3 : } R_1 \longrightarrow R_2$$

Dans ce cas seule le réservoir R_1 alimente la pile à combustible R_2 , par exemple pendant la nuit ou le générateur ne fonctionne pas par absence de courant photovoltaïque.

Cependant pour mieux résoudre notre problème il serait bien d'utiliser des hypothèses simplificatrices. Ainsi pour le cas 1 on peut simplifier jusqu'à avoir un cas identiquement valable aux cas 2 et 3.

--Cas1 : $R_0 R_1 R_2$

$Q_0 \gg Q_1$, ce qui permet d'assimiler le cas $R_0 R_1 R_2$ au cas $R_0 R_1$

--Cas2 : $R_0 R_1$, gardons ce cas intact.

--Cas3 : $R_1 R_2$, de même gardons ce cas intact aussi.

En résumé nous pouvons maintenant considérer que tous les cas 1, 2, 3 se résument en un cas unique RR' .

En vertu de ces hypothèses simplificatrices on peut ainsi dimensionner les conduites de transport de l'hydrogène tout appliquant la même technique.

Selon la disposition des différentes entités dans l'espace de l'installation, on peut être amené à déterminer les longueurs maximales des conduites de gaz. Ces longueurs maximales sont celle qu'on peut attendre sans risque de perte critique de pression qui occasionnerait l'immobilisation de l'hydrogène. Tel fait rendrait impossible le transport de l'hydrogène vers la destination finale, la pile à combustible.

Ainsi donc seules les immobilisations forcées de gaz devraient être possibles. Dans ces cas du système de régulation ou d'accumulation par soupapes protégées l'installation des surpressions, système qui ne fera pas l'objet de notre étude.

D'après les études thermodynamiques réalisées sur l'hydrogène, ce gaz peut être considéré comme parfait. Ceci nous permet de considérer l'écoulement de l'hydrogène comme celui d'un **gaz parfait avec friction**. Mais puisque dans notre cas les conduites sont relativement courtes, donc faible temps de contact entre fluide et paroi de conduite, donc échanges thermiques négligeables, on peut en plus considérer l'écoulement comme **adiabatique**. En effet l'échauffement due à l'augmentation de l'enthalpie par suite à la croissance de la pression n'a pas le temps de se perdre dans les canalisations.

On a physiquement $H = U + PV$, quand P augmente, H augmente.

De ces considérations de plomberie industrielle on peut se permettre d'appliquer la formule suivante pour déterminer la longueur de chaque conduite. Dans le cas simple de R vers R' on a pour la conduite de liaison.

$$\frac{fl}{D} = \frac{1}{K} \left(\frac{1}{M^2} - \frac{1}{M'^2} \right) + \frac{K+1}{2K} \ln \left(\frac{M}{M'} \right)^2 \frac{(K-1)M'^2 + 2}{(K-1)M^2 + 2} \quad (a)$$

f : coefficient de friction de la conduite qui dépend du matériau.

l : longueur de la conduite.

D : diamètre de la conduite.

M : nombre de Mach à l'entrée de la conduite.

M' : nombre de Mach à la sortie de la conduite.

$K = C_p/C_v = 1.41$ pour l'hydrogène

Par définition $M = v/c = v / (KRT)^{1/2}$ avec $K = 1.41$ et $R = R^*/P_M = 8314/2.02 = 4115.84$ s.i.

R est la constante du gaz hydrogène, P_M est le poids moléculaire ou masse molaire de l'hydrogène.

$R^* = 8.314$ s.i.

v : vitesse du fluide (de l'hydrogène) dans la conduite.

T : température du fluide.

$Q_{H_2} = v * S$ ce qui permet de tirer $v = Q_{H_2}/S$ avec

S : section de la conduite ($\pi D^2/4$).

Q_{H_2} : débit d'hydrogène à la sortie du générateur.

Donc on peut dire d'après ces relations que :

$$M = \frac{Q_{H_2} / S}{\sqrt{KRT}}$$

En remplaçant S par son expression et après réarrangement on trouve :

$$M = \frac{4 * Q_{H_2}}{\pi * D^2 \sqrt{KRT}} \quad (b)$$

Pour déterminer la longueur maximale de la conduite qu'on ne peut dépasser sans risque de perte critique de pression, il suffit prendre $M^2=1$. Ce qui nous donne :

$$L_{\max} = \frac{D}{f} \left[\frac{1}{K} \left(\frac{1}{M} - 1 \right) + \frac{K+1}{2K} \ln \left[\frac{M^2 * (K+1)}{(K-1) * M^2 + 2} \right] \right] \quad (c)$$

Ainsi toutes les longueurs de conduite $L < L_{\max}$ seront utilisables pour transporter l'hydrogene. C'est donc la vitesse de consommation de l'hydrogene dans la pile à combustible qui fixera le débit d'hydrogene dans la conduite d'alimentation de la pile. De même les dimensions du réservoir et le débit d'hydrogene à la sortie du générateur fixeront la vitesse du fluide dans la conduite d'amené du réservoir.

• Bilan énergétique et étude économique

La valorisation de cette étude dépendra en grande partie du coût financier de l'installation. Essayons donc de déterminer ces coûts. Pour se faire nous déterminerons les prix, durées de vie et temps de fonctionnement de toutes les composantes pertinentes de l'installation. Les autres éléments de l'installation seront pris en compte dans les divers. Remontons donc le sens énergétique de l'installation suivante.

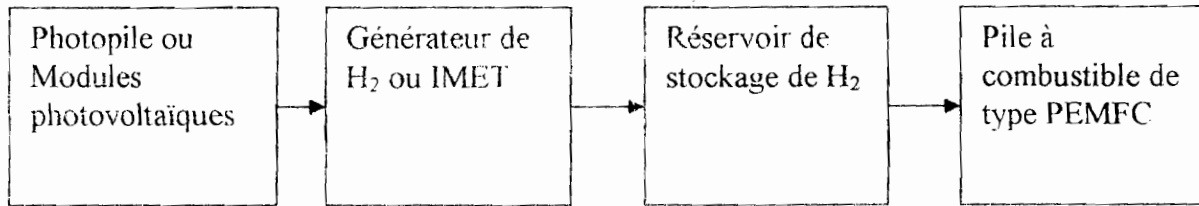


Figure 15 : Représentation des parties de l'installation

DONNES SUR LA PILE A COMBUSTIBLE PEMFC

Nous choisissons une pile de 200 W du constructeur Américain STUART ENERGY COMPAGNY. Par suite les données technico-économiques de cette pile sont les suivantes.

Débit d'alimentation de la pile en hydrogène : $Q_{H_2} = 0.132 \text{ Nm}^3/\text{h}$

Pression d'alimentation en hydrogène : pression atmosphérique au minimum, au moins égale à 1 atm.

Tension de sortie de la pile à combustible choisie entre : 0, 12, 24, 48, 110V.

Prix de la pile de 200W : d'après un prix moyen de 3 600 FCFA/W nous déduisons le prix de **720 000 FCFA**.

Durée de vie de la pile à combustible de type PEMFC : 40 000 heures.

Durée de fonctionnement de la pile dans l'installation : 24h/24h

Ces durées de vie et de fonctionnement nous permette de tirer la durée d'utilisation prévue qui sera de $40\,000 \text{ h} / (24 \text{ h/jour}) = 1\,666.6$ jours soit **4.6 ans**

DONNEES DU RESERVOIR DE STOKAGE

De façon générale, le stockage de l'hydrogène est un véritable problème car pour la plupart des systèmes consommant de l'hydrogène, la production de ce gaz ne se fait pas sur place. Dès lors des méthodes sécuritaires de stockage d'hydrogène en grandes quantités s'imposent. Généralement le stockage se fait soit sous forme liquide, soit sous forme de gaz comprimé.

Dans le cas de notre installation le stockage en gaz comprimé suffit car nos besoins en hydrogène et en pression sont très peu par rapport aux besoins industriels. La compression de l'hydrogène gazeux est donc un moyen d'augmenter la quantité stockée dans un volume fixe ou réservoir. Pour cela, on utilise généralement des réservoirs de forme cylindrique en matériaux composites renforcés avec de l'aluminium.

Nous remarquons que la pression de stockage nécessaire pour l'installation correspond à la pression de remplissage du réservoir. Cette pression est aussi la pression de sortie au niveau du générateur de H_2 (IMET).

Les données du réservoir sont les suivantes

Pression maximale supportable par le réservoir : $p_{\max} = 20$ bars.

Volume de réservoir de stockage : $V = 2\text{m}^3$

La pression de stockage est étroitement liée aux distances entre réservoir et générateur puis entre réservoir et pile à combustible. Mais dans le cas d'une étude générale comme le notre, nous choisissons une valeur moyenne de 10 bars car ne disposant pas de données précises sur les autres critères. On pose donc $P_2 = 10$ bars.

Soient P_1 la pression d'hydrogène à la sortie du générateur d'hydrogène et V_2 le volume du réservoir de stockage. Si $P_1 = 5$ bars et $V_2 = 2\text{m}^3$ l'une des lois de la théorie cinétique des gaz nous permet d'écrire $P_1 V_1 = P_2 V_2$ en considérant que la température est presque constante. Ce qui permet de calculer V_1 .

$$V_1 = P_2 V_2 / P_1 = 10 * 2 / 5 = 4 \text{ m}^3$$

Cela signifie que cinq mètres cubes d'hydrogène à cinq bars peut être stocké dans un volume de deux mètres cubes à la pression de dix bars.

Durée de vie du réservoir : **20 ans**.

Durée de fonctionnement du réservoir : 24 h / 24 h.

Prix du réservoir en moyenne : **189 000 FCFA**.

DONNEES SUR LE GENERATEUR D'HYDROGENE

Comme ce type de générateur existe déjà sur des gammes aussi diversifiées nous avons préféré utiliser les résultats de la recherche scientifique pour gagner du temps mais aussi pour valoriser ces électrolyseurs industriels.

Les données liées au constructeur étant déjà fournies dans la partie précédente, on se contentera de ne parler que des données qui nous intéresseront pour la suite.

Type de générateur : IMET (Inorganic Membrane Electrolysis Technology)

Débit de production de H_2 : $1 \text{ Nm}^3/\text{h}$. On rappelle que le normal mètre cube est le mètre cube ramené aux conditions de pressions atmosphérique.

Pression de sortie du générateur de l'hydrogène : 1 à 25 bars.

Durée de vie du générateur IMET : 20 000 heures.

Durée de fonctionnement par jour : $4 \text{ h} / 24 \text{ h}$, car $0.132 \text{ Nm}^3/\text{h} * 24 \text{ h} = 3.168 \text{ Nm}^3$ qui est inférieure à 4 Nm^3 . Ainsi pour produire un volume de 4 Nm^3 le générateur de H_2 a besoin de 4 heures de temps.

Prix du générateur : **259 400 FCFA**.

D'après les durées de vie et de fonctionnement on peut tirer la durée d'utilisation qui sera $20\,000 \text{ h} / (4 \text{ h} / \text{jour}) = 5\,000 \text{ jours}$ soit **13.7 ans**.

Consommation électrique du générateur d'hydrogène : $4.2 \text{ kWh} / \text{Nm}^3$ soit un total $4.2 \text{ kWh} / \text{Nm}^3 * 4 = 16.8 \text{ kWh} / \text{jour}$.

Tension d'alimentation en électricité : 48 V.

DONNEES SUR LE GENERATEUR PHOTOVOLTAIQUE

Ce générateur photovoltaïque est constitué essentiellement de modules photovoltaïques qui forment des panneaux solaires ou champ photovoltaïque. Pour des raisons économiques nous choisissons des modules de 36 Wc, 12 V. On rappelle que le watt crête correspond 4 Wh par jour. Donc $36 \text{ Wc} = 144 \text{ Wh}$ par jour.

Les besoins en électricité étant 16 800 Wh /jour, le nombre de module nécessaire sera $16\ 800 / 144 = 116.7$ soit 117 modules. Mais pour alimenter correctement la charge sous 48 V nous majorons à 120 modules. Ainsi l'installation aura 30 branches en parallèles de 4 modules. Schématisons cela pour mieux voir.

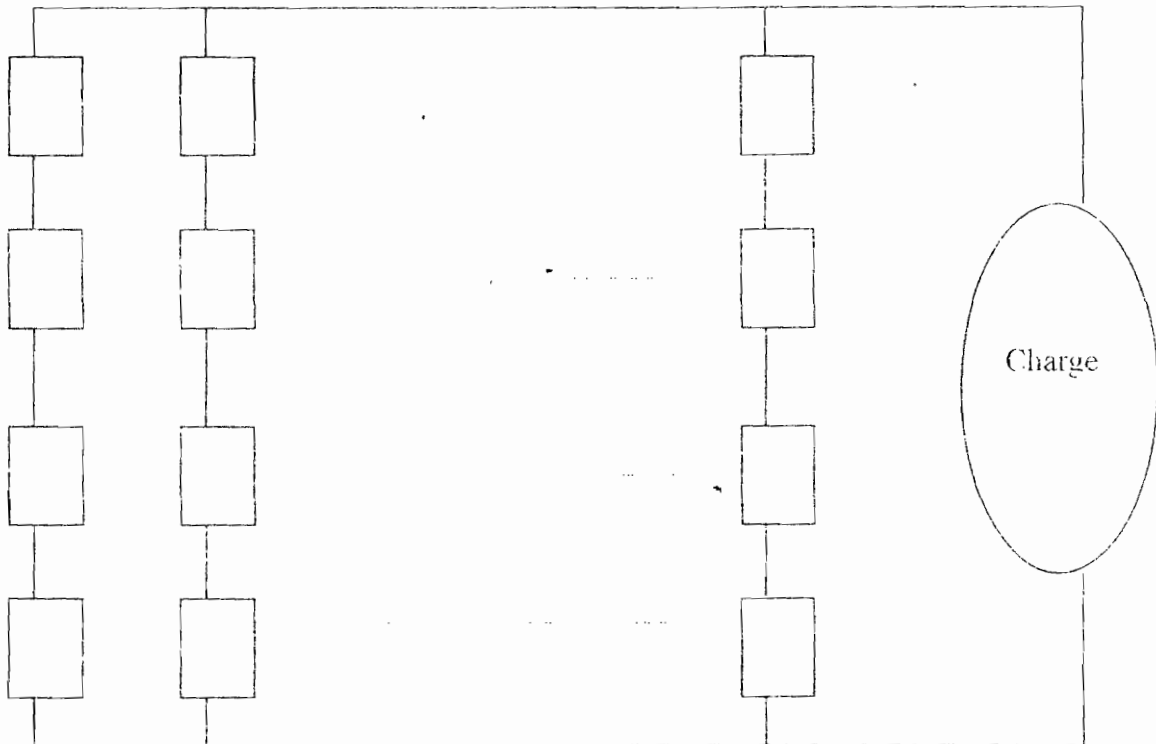


Figure 16 : Représentation détaillée du générateur photovoltaïque

Avec la charge qui représente le générateur d'hydrogène, les rectangles pour les modules et enfin les pointillés symbolisent le reste des 30 branches en parallèle. Chaque branche donne 48 V car chaque module génère 12 V.

Les durées de vie et d'utilisation des modules photovoltaïques sont généralement estimées à 20 ans dans plusieurs installations solaires.

Le prix unitaire de ce type de module étant 129 600 FCFA, le prix global moyens du générateur photovoltaïque est donc 15 552 000 FCFA.

DONNEES SUR LES CONDUITES

Nous aurons principalement deux conduites liant respectivement le réservoir au générateur d'hydrogène et à la pile à combustible. La deuxième conduite (C2) est relativement courte et peut donc être approximée à 1 m avec un diamètre de 20 cm. Tandis que la première conduite (C1) peut être plus ou moins longue selon les dispositions de nos équipements. Cela nous permet d'estimer cette dernière conduite à 10 m de longueur et 2 cm de diamètre.

Donc nous aurons au total une conduite équivalente de 11 m avec un diamètre de 2 cm

Prix par mètre de ce type de conduite avec protection extérieur à l'aluminium égale à 11 429 FCFA /m.

Prix total de la longueur équivalente de ce même type de conduite : 125 719 FCFA.

Durée de fonctionnement des conduites : 24 h /24 h.

Durée de vie prévue de ces conduites : 20 ans.

Durée d'utilisation des conduites : égale à la durée de vie prévue des conduites (20 ans).

REMARQUE 1

Dans le cas d'une application pratique les longueurs des conduites ne peuvent être approximées arbitrairement. Il faudrait donc déterminer les longueurs maximales à ne pas dépasser pour permettre le transport du gaz. Cette détermination se fera avec les formules des pages 44 et 45 du document.

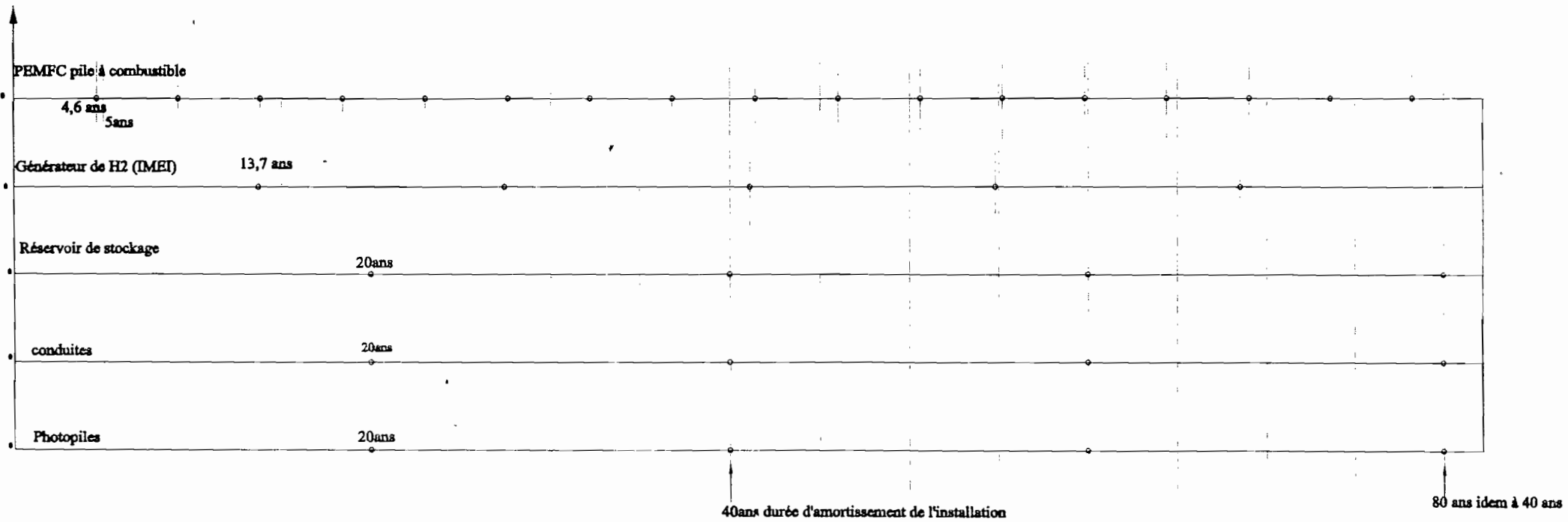
DETERMINATION DU COUT GLOBAL DE L'INSTALLATION (CG)

Pour se faire nous chercher en premier lieu la durée sur laquelle on devrait amortir notre installation. En effet chaque composante pertinente de notre système à sa propre durée de vie, de même son propre part d'importance. Dans ce cas de figure les résultats de l'analyse financière des moyens de production proposent d'amortir sur une durée commune d'amortissement de l'installation qui sera déterminée par une approche graphique.

Il s'agit de trouver la combinaison des durées d'amortissements partiels dans le temps qui donnent une date à la quelle toutes les composantes pertinentes de l'installation valent zéro.

C'est donc cette date qui sera la durée d'amortissement commune de notre installation.

Mettons en œuvre cette méthode afin de trouver la durée d'amortissement de l'installation.



Détermination de la durée d'amortissement de l'installation

Après l'application de cette méthode, nous trouvons une durée d'amortissement globale de l'installation de 40 ans. Déterminons ainsi les valeurs de chaque composante pertinente par an.

En 40 ans on changera :

- ✓ 9 fois de pile à combustible, ce qui une valeur annuelle de $10 * 720\ 000 / 40 = 180\ 000$ FCA / an.
- ✓ 3 fois de générateur d'hydrogène, ce qui correspond à une valeur annuelle de $4 * 259\ 400 / 40 = 25\ 940$ FCFA / an.
- ✓ 2 fois de réservoir de stockage d'hydrogène, ce qui est équivalent à une valeur annuelle de $3 * 189\ 000 / 40 = 14\ 175$ FCFA / an.
- ✓ 2 fois de conduite, ce qui est égale à une valeur annuelle de $3 * 125\ 719 / 40 = 9\ 428.92$ FCFA / an.
- ✓ 2 fois de panneaux solaires, soit une valeur annuelle de $3 * 15\ 552\ 000 / 40 = 1\ 166\ 400$ FCFA / an.

REMARQUE 2

Pour donner une meilleure fiabilité à l'installation et sécuriser le système des risques de fuite d'hydrogène pouvant former avec l'air des mélanges détonants, nous optons pour une maintenance systématique. C'est-à-dire, après la durée d'amortissement, chaque équipement est remplacé systématiquement qu'il y ait panne ou pas.

L'ensemble des valeurs annuelles calculées ci haut nous permet d'évaluer les coûts fixes de l'installation.

Soit CI les coûts d'investissement fixes annuels, on peut écrire que :

$$CI = 180\ 000 \text{ FCFA / an} + 25\ 940 \text{ FCFA / an} + 14\ 175 \text{ FCFA / an} + 9\ 428.92 \text{ FCFA / an} + 1\ 166\ 400 \text{ FCFA / an} = 1\ 395\ 943.92 \text{ FCFA / an}.$$

Soit CE les coûts d'exploitation qui englobent la maintenance, le contrôle et l'alimentation en eau sont généralement estimés à 10 % du coût d'investissement d'après les rapports des CNRS européens. Ainsi après calcul on trouve :

$$CE = 139\,594.392 \text{ FCFA /an.}$$

REMARQUE 3

L'alimentation en eau de l'électrolyseur se fait avec de l'eau distillée pour mieux protéger les électrodes. De plus la pile à combustible produit de l'eau pure qui pourra être utilisée, dans l'électrolyseur après ajout de quelques gouttes d'acide ou de base

Si on se base sur une durée de récupération des investissements de 5 ans, on aura :

$$CG = 5*CI + CE * \sum_{t=0}^4 (1 + \tau)^t$$

Le τ est le taux annuel d'actualisation qui est compté pour 9% dans des projet de ce genre.

Pour tenir compte des besoins d'ondulation du courant continu produit par la pile à combustible et des frais divers on majore les coûts fixes de 10%. L'application numérique s'exprime donc de la façon suivante :

$$CG_{\text{ corrigé}} = 5* 1\,395\,943.92 + 0.1*5*1\,395\,943.92 + 139\,594.392 * \sum_{t=0}^4 (1 + 0.09)^t =$$

$$8\,513\,123.599 \text{ FCFA}$$

Ce coût correspond à un fonctionnement de 5 ans soit une production théorique en énergie électrique égale à $4\,800 \text{ Wh} * 365 * 5 = 8\,760\,000 \text{ Wh} = 8\,760 \text{ KWh}$.

Si on suppose une fiabilité d'installation de 98%, on aura une production énergétique pratique de 8 584.8 KWh dans les 5 ans.

On peut ainsi estimer le coût du kilowattheure à 8 513 123.599 FCFA / 8 584.8KWh soit 991.65 FCFA /KWh.

REMARQUE 4

Ce coût est le minimum à considérer car selon l'utilisation de l'électricité produite, on peut être amené à employer un transformateur pour élever la tension après ondulation à la fréquence de 50Hz. D'autre part on peut avoir des coûts additionnels liés aux taxes.

CONCLUSION

L'option sur une étude générale avec des hypothèses simplificatrices nous a permis d'étudier le couplage d'une pile à combustible de type PEMFC avec le photovoltaïque par l'intermédiaire d'un électrolyseur à eau. Ce projet montre utilise des concepts de la plomberie industrielle, la base d'énergies renouvelables ainsi que certaines notions de base de la chimie. Plusieurs dimensions et prix sont donnés en valeur moyenne et sont souvent estimer pour un marché Sénégalais.

De l'étude sort une meilleure compréhension des piles à combustible qui jusqu'ici étaient mal connu. Il met en évidence une étude de faisabilité qui pourrait guider un futur concepteur d'une telle installation. Cependant pour un pays comme le Sénégal, la conception d'un tel n'à pas encore sa raison d'être. En effet le coût du kWh, 991.65 FCFA, n'est de loin compétitif. Ce qui pourrait constitué un avantage n'est pas pour le moment une priorité en Afrique, c'est-à-dire l'argument environnemental. Néanmoins ce projet constitue la participation de l'Afrique sur le domaine des piles à combustible.

RECOMMANDATIONS

1. Diffuser ce travail pour permettre la compréhension des piles à combustible.
2. Continuer la recherche dans ce domaine en essayant de trouver une alternance au platine qui rend chère le prix de certaines piles à combustibles.
3. Acheter au moins une pile à combustible pour permettre une perception visuelle aux étudiants et chercheurs.
4. Diffuser les résultats de notre travail dans l'échelle internationale sous forme de participation africaine dans le domaine des piles à combustible.

ANNEXE 1



Le NeBus (Now emission) de Mercedes-Benz

Un autobus équipé d'une pile à combustible est un autobus électrique dont l'énergie est produite directement à bord du véhicule, à la demande, ce qui ne nécessite pas l'utilisation de batteries encombrantes et à l'autonomie limitée, ni de moteur thermique lourdes et polluante.

L'énergie électrique est produite par la pile à combustible, à partir de l'énergie dégagée par la combinaison d'hydrogène et d'oxygène.

Cette pile est alimentée par des bouteilles stockant l'hydrogène. Ce dispositif (pile + bouteilles) est monté sur le pavillon du bus.

L'utilisation de la pile à combustible ne dégage que de la vapeur d'eau. C'est donc un mode de propulsion particulièrement écologique.

ANNEXE 2

Les autobus à la pile à combustible

Actuellement, trois constructeurs proposent, à titre expérimental, des autobus "pile à combustible".

Voici la liste des modèles :

Mercedes

O 405N (NeBus)

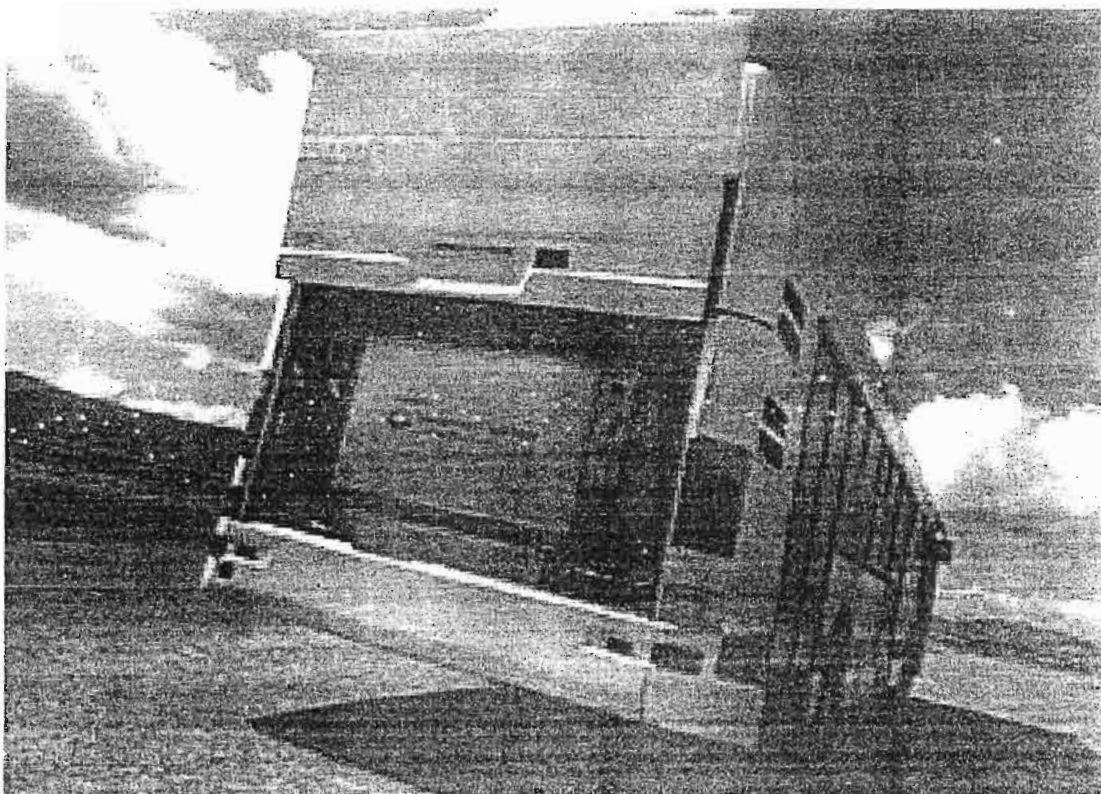
Citaro, pile à combustible de 2^{ème} génération

MAN / Neoplan

NJ. 263 Bz

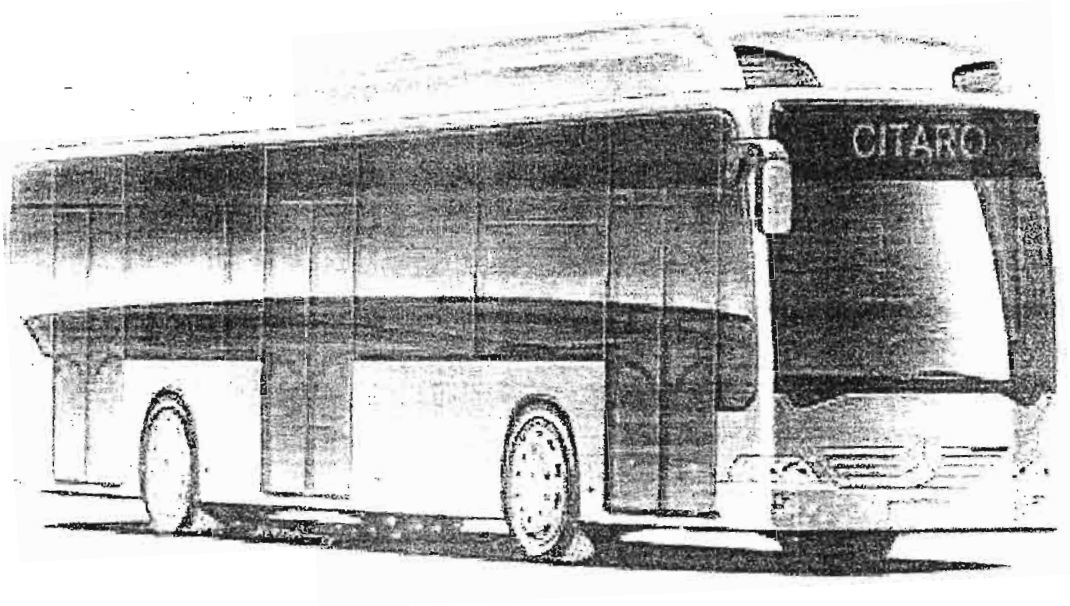
IVECO

IRISBUS

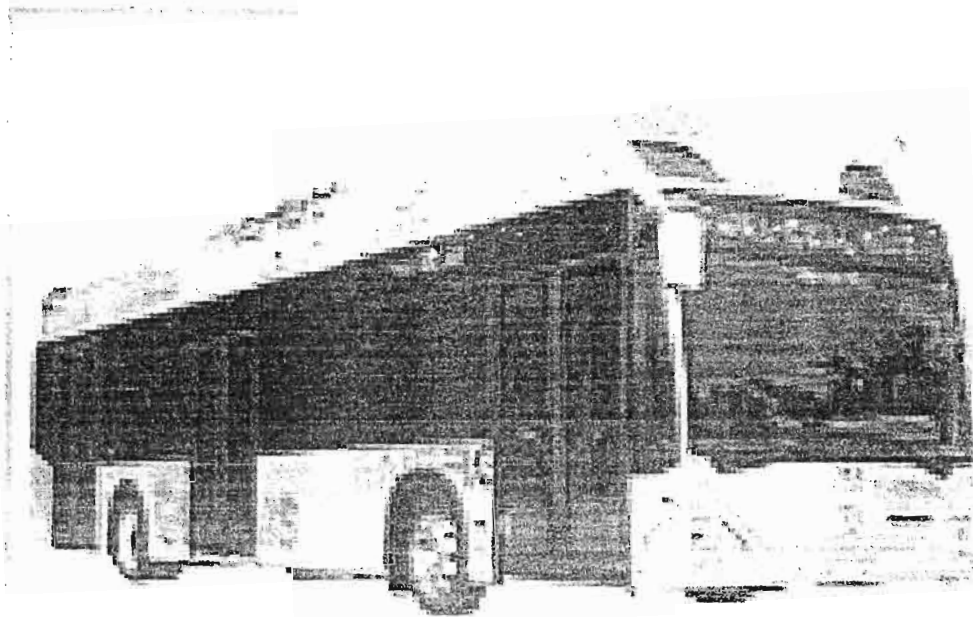


ANNEXE 3

30 autobus Citaro mus par une pile à combustible entreront en service dans 10 villes européennes à partir de 2002.



L'arrivée de bus munis d'une pile à combustible dans un réseau nécessite bien évidemment quelques aménagements pour l'alimentation et la maintenance de ces bus.



ANNEXE 4

Calendrier

- 1997* : premier prototype d'autobus équipé d'une pile à combustible : le Nebus (No Emission Bus) de Mercedes, réalisé à partir d'un Q 405 N.
- fin 2000* : premiers tests du prototype Citaro pile à combustible
- juin 2001* : CityClass équipé d'une PAC de 60 kW, fabriquée par IFC à Turin (ATM)
- fin 2002 / début 2003* : sortie d'un bus équipé d'une pile à combustible par Irisbus
- début 2003* : expérimentation par la RATP d'un Cristalis propulsé par une pile Air Liquide / Nuvera de 60 kW, associée à une transmission électrique (par roues motorisées).
- fin 2002 / été 2003* : livraison de 30 Citaro dans 10 villes européennes (3 bus par réseau), bus en service probatoire pour deux ans minimum.
- 2007 ou 2008* : La pile à combustible est compétitive sur le marché des autobus. Le bus pile à combustible n'est pas plus cher qu'un trolleybus.
- 2010* : Le surcoût de la pile à combustible est inférieur à 10% par rapport à un bus diesel.

ANNEXE 5



Technologie de Energy Visions Inc.

Voici une des applications portables des piles à méthanol direct. On injecte ici du méthanol pour faire la recharge électrique du téléphone.

ANNEXE 6



General Motors (GM) et Opel ont relevé le défi de la pile à combustible : ils ont osé mettre sur pied un véritable marathon qui à traversé tout l'Europe avec cette nouvelle technologie : le 24 avril 2000 de Hammerfest à Lisbonne.

GM et Opel vont ainsi pouvoir tester la résistance et la fiabilité au quotidien de leurs véhicules à propulsion par pile à combustible alimentée par hydrogène. Au cours de ce voyage au long cours, le prototype Hydrogen3, véhicule à pile à combustible hydrogène sur une base de Zafira, va devoir parcourir une distance d'environ 10.000 km au travers de 14 pays.

ANNEXE 7

Propriétés de l'hydrogène

Masse atomique	1,0079 g/mol
Température de solidification	14 K
Température d'ébullition	20,3 K
Densité liquide à (20,3 K)	70.79 kg/m ³
Densité gazeuse à (20,3 K)	1.34 kg/Nm ³
Densité gazeuse à (273 K)	0.08988 kg/Nm ³
PCI (Pouvoir calorifique inférieur)	120 MJ/kg
PCS (Pouvoir calorifique supérieur)	142 MJ/kg
Energie d'évaporation	445 kJ/kg
Energie de liquéfaction	14112 kJ/kg
Cp (20°C)	14,3 kJ/kg K
Cv (20°C)	10,3 kJ/kg K
Température d'auto inflammation dans l'air	858 K
Température de flamme dans l'air	2318 K
Limites d'inflammabilité dans l'air	4-75 (%vol)
Limites de détonabilité dans l'air	13-65 (%vol)
Energie d'inflammation	0,020 mJ

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1]. Eléments de chimie moderne : Jean- Paul Gravel, Gordon G. Hall, Samuel Madras, édition McGraw-Hill, Montréal.
- [2]. Cours de chimie physique : Paul Arnaud, édition Dunood.
- [3]. Cours de chimie physique : Aphonse TINE, Faculté des sciences et techniques.
- [4]. Electrotechnique, cours: Théodore WILDI
- [5]. Cours de plomberie industrielle et applications : Paul DEMBA, ESP THIES
- [6]. Cours d'énergies nouvelles et renouvelables : Pape Mody NDIAYE, ESP, THIES
- [7]. Cours de chimie de l'ingénieur, Sanna FATY. ESP THIES

REFERENCES ELECTRONIQUES

www.anso.free.fr , Ecole Nationale Supérieure des Arts et Métiers de Paris.

www.clubpac.net, association européenne des chercheurs dans le domaine des piles à combustible.

www.pile-au-methanol.com, Centre Nationale de Recherche scientifique de France.

www.veill.reseaupaco.org, organisation de chercheurs dans le domaine des piles à combustible.

[http:// www.ballard.com](http://www.ballard.com)

[http:// www.fetc.doe.gov](http://www.fetc.doe.gov)

[http:// www.fuelcell.kosone.com](http://www.fuelcell.kosone.com)

[http:// www.nfcrc.uci.edu](http://www.nfcrc.uci.edu)

[http:// www.aerovironment.com](http://www.aerovironment.com)

[http:// www.eaev.org](http://www.eaev.org)

[http:// www.evri.org](http://www.evri.org)

[http:// www.toyota.com](http://www.toyota.com)

www.opex-bpsolar.com/site/photovoltaique-htm

www.decision-consult.com/fra/prod-fc-htm

www.afh2.org/archive/fiche-323.pdf