**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIR**

**MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE**

جامعة يحيى فارس بالمدية

Université Yahia Farès de Médéa

## Mémoire de fin d'étude

## Option : Énergie renouvelable en mécanique

**Département de génie mécanique**

## THÈME

***Etude de la pile à combustible (PAC) alimente par***

***L'hydrogène***


Présenté par :

-**BABAALI Zineddine**
-**BENCHIDI Oussama**

Dirigé par :

- **Dr :N.sofi** **Encadreur**


**Année Universitaire 2021-2022**

# *REMERCIEMENTS*

*AVANT TOUT, JE REMERCIE ALLAH LE TOUT-PUISSANT DE M'AVOIR DONNE LE COURAGE, LA VOLONTE ET LA PATIENCE DE MENER A TERME CE PRESENT TRAVAIL DANS DES MEILLEURES CONDITIONS.*

*JE REMERCIE VIVEMENT EN PREMIER LIEU MON ENCADREUR MONSIEUR S. ABUDURA, QUI PAR SA COMPETENCE, SES ENCOURAGEMENTS, SES CRITIQUES CONSTRUCTIVES ET SON SOUTIEN MORAL A SU M'INFORMER, ME CONSEILLER, ET ME RENDRE DE PLUS EN PLUS AUTONOME POUR BIEN REALISER CE TRAVAIL.*

*MES REMERCIEMENTS VONT EGALEMENT A NOTRE PROMOTRICE MELLE N.SOFI POUR SON ENGAGEMENT ET SON TEMPS ET MES ENSEIGNANTS DU DEPARTEMENT GENIE ELECTRIQUE.*

*JE TIENS A REMERCIER EGALEMENT LES MEMBRES DE JUREE :* ***Y. CHIBA****,* ***R. REBHI****,* ***M. ZIRARI, R. KARA*** *d'avoir accepté d'examiner et évaluer mon modeste travail.*

# DEDICACE

***Je dédie ce modeste travail à :***

***- Mes chère parents symbole de tendresse profonde et permanente, de sacrifice et d'amour éternel, que dieu les protègent pour moi et leur accordent une bonne santé et une longue vie.***

***- Mes chères frères et sœurs***

***- Mes enseignants depuis mon enfance***

***- A tout ceux qui m'on aidé de près ou de loin a ce mémoire.***

الملخص :

**Résumé :**

**Abstarct :**

# Sommaire :

**Remerciements**

**Dédicace**

**Liste des Figure**

**Liste des tableaux**

**Introduction Générale**

***Chapitre I: Etat d'art d'hydrogène***

Introduction ..... 3
1.1Généralités d'hydrogène ..... 5
1.1.2.Propriétés del'hydrogène ..... 6
1.1.3.Nature de production de l'hydrogène: ..... 7
1.2.Brefhistorique ..... 7
1.3.Production d`hydrogène ..... 8
1.3.1Production d'hydrogène à partir de combustibles fossiles ..... 8
1.3.2Production d'hydrogène à partir de la gazéification de la biomasse: ..... 9
1.3.3.Production d'hydrogène par électrolyse: ..... 10
1.3.4.Production d'hydrogène à partir des méthodes biologiques: ..... 10
1.3.5.Production d'hydrogène à partir des alcools ..... 11
1.3.5.1.2.L'éthanol ..... 11
- Hydratation catalytique directe del'éthylène ..... 11
- Hydratation indirecte del'éthylène ..... 12
- A partir de labiomasse ..... 12

1.3.5.2.Intérêts desalcools ..... 12
1.3.5.2.1.Ladécomposition ..... 13
1.3.5.2.2.L'oxydation partielle ..... 14
1.3.5.3.Levaporeformage ..... 14
1.3.5.4.Le reformageautochrome ..... 15
- Reformage autothermique duméthanol ..... 15
- Reformage autothermique del'éthanol ..... 15

Conclusion ..... 16

**Chapitre II : Système de pile à combustible**

Introduction ..... 18

2.1Qu’est-ce une pile àcombustible ..... 18
2.2Historique des piles à combustible ..... 18
2.3.Le renouveau de la pile àcombustible ..... 19
2.4.Structure de la pile àcombustible ..... 20
2.5.Principe de fonctionnement d’une pile àcombustible ..... 22
2.6.Expression du débit d’Hydrogène etd’Oxygène ..... 24
2.7. Les différentes piles àcombustible ..... 25
2.8.Caractéristiques de technologie des pilesàcombustible ..... 31
2.9.Dimensionnement d’unstack ..... 33
2.10.Les avantages et les inconvénients de la pile àcombustible ..... 33
2.11.Les applications des piles à combustibles ..... 34
**CHAPITRE III:** ***Modélisation de pile à combustible***
Introduction : ..... 38
3.1.Modèle dynamique de la pile à combustible PEMFC : ..... 38
3.2. Modélisation des convertisseurs : ..... 40
**3.3. La machine asynchrone** ..... 43
**3.3.1 Constitution et principe de fonctionnement** ..... 43
***3.3.1.1. Définition*** ..... 43
***3.3.1.2. Constitution*** ..... 43
***3.3.1.3. Principe de fonctionnement*** **:** ..... 44
***3.3.1.4. Caractéristiques mécaniques*** **:** ..... 45
***3.3.1.4.1. Représentation schématique*** **:** ..... 47
**3.3.2. Modélisation de la machine asynchrone :** ..... 48
***3.3.2.1. Equations électriques de la machine asynchrone*** **:** ..... 48
***3.3.2.2. Equations magnétiques*** **:** ..... 48
***3.3.2.3. Equation mécanique*** **:** ..... 49
***3.3.2.4. Référentiel pourquoi ?*** ..... 50
**3.3.3. Transformation de Park :** ..... 50
***3.3.3.1 Application de la transformation de Park à la MAS*** **:** ..... 52
**3.3.4. Modèle d’état de la machine asynchrone :** ..... 54
**3.4. Modèle de la chaîne de traction :** ..... 56
**Conclusion :** ..... 62
Conclusion générale ..... 62

## Liste Des Figures

## Chapitre 01

**Figure 1.1 :** Schéma énergétique.

**Figure 1.2 :** Origine de l'hydrogène produit dans le monde en 2011.

## Chapitre 02

**Figure.2.1** Schéma de principe de conversion directe en électricité

**Figure.2.2** L'expérience de Sir William, inventeur historique de la Pile à Combustible

**Figure.2.3** Projet de Gemini.

**Figure.2.4** Catalyseur du côté cathode.

**Figure.2.5** Vue éclatée d'une pile à combustible.

**Figure.2.6** Principe de la réaction catalytique dans l'électrode volumique.

**Figure.2.7** Schéma de principe de fonctionnement d'une pile à combustible.

**Figure.2.8** Structure d'un empilement de cellule PEMFC

**Figure.2.9** Schéma de principe d'une pile à combustible PEMFC

**Figure.2.10** Principe de la pile à combustible alcaline.

**Figure.2.11** Principe de la pile à combustible à acide phosphorique.

**Figure.2.12** Principe de la pile à combustible MCFC.

**Figure.2.13** Principe de la pile à combustible SOFC.

**Figure.2.14** Equivalent électrique d'une pile à combustible.

**Figure.2.15** Influence de la polarisation sur la tension.

**Figure.2.16** Pile à combustible au méthanol Toshiba (2004), autonomie = 20h, poids = 900g.

**Figure.2.17** L'utilisation de la pile à combustible aux transports.

**Figure.2.18** Pile MCFC 250 kW baptisée CELLIA et mise en place par Dalkia dans un HLM à Paris.

## Chapitre 03

**Figure 3.1** : Modèle dynamique de la pile à combustible PEMFC.

**Figure 3.2** : montage de l'hacheur parallèle.

**Figure 3.3** : l'allure des tensions et des courants au niveau de l'hacheur

**Figure 3.4 :** représentation simplifier de l'onduleur

**Figure 3.5 :** Principe de commande de l'onduleur par MLI

**Figure 3.6 :** Association de l'onduleur à hystérésis avec la MAS

**Figure 3.7 :** Machine asynchrone à bagues

**Figure 3.8** rotor d'une machine asynchrone à cage

**Figure 3.9 :** Schéma par phase en régime permanent

**Figure 3.10** : Schéma équivalent au stator avec les fuites magnétiques totalisées au rotor

**Figure 3.11 :** couple électromagnétique en fonction du glissement
**Figure 3.12** : couple électromagnétique en fonction de la vitesse de rotation
**Figure 3.13 :** Représentation schématique du circuit rotoriques et statorique d'une machine asynchrone triphasée
**Figure 3.15** : Comportement dynamique de la MAS avec une alimentation sinusoïdale
**Figure 3.16** : modèle complet du véhicule électrique.
**Figure 3.17** : variation de vitesse en fonction de temps
**Figure 3.18** : variation de couple résistant en fonction de temps
**Figure 3.19 :** Variation de la tension de la pile à combustible en fonction du temps
**Figure 3.20 :** Variation de la puissance de la pile à combustible en fonction du temps
**Figure 3.21 :** variation du débit molaire d'hydrogène en fonction du temps
**Figure 3.22 :** variation du débit molaire d'oxygène en fonction du temps
**Figure 3.23 :** variation de la vitesse demandée et la vitesse de la MAS en fonction du temps
**Figure 3.24 :** variation du couple demandé et le couple de la MAS en fonction du temps

# Liste des Tableaux

## Chapitre 01

**Tableau 1.1:** Propriétés physico-chimiques de l'hydrogène.

## Chapitre 02

**Tab.2.01** Tableau récapitulatif des différentes technologies de piles à combustible
**Tab.2.02** Modularité d'un stack : 3 exemples de conception d'une PAC PEM de 5 kW.

## Chapitre 03

**Tableau 3.1** : Tableau des paramètres.

# Introduction Générale

# Introduction générale

Avec la pleine expansion de la demande énergétique qui ne cessera de croître dans les prochaines années. Une très grande quantité d'énergie requise pour combler ce besoin provient des ressources fossiles (hydrocarbures, charbon...) et fissiles (uranium). L'utilisation de ces sources d'´énergie engendre en outre des effets secondaires indésirables environnementale et l'épuisement, tant au niveau local par la pollution qu'au niveau global par l'émission des gaz à l'effet de serre. Il devient aujourd'hui indispensable de réduire les émissions de gaz à effet de serre (notamment de $CO_2$) pour limiter les changements climatiques. La recherche de sources alternatives d'énergie renouvelables est donc un secteur en plein essor. Non seulement ces sources doivent être renouvelables, mais il faut aussi que celles-ci soient non dommageables pourl'environnement.

Dans ce contexte, l'hydrogène est une solution prometteuse et favorable à l'environnement qui permet d'obtenir de l'électricité grâce à la pile à combustible il n'existe pas à l'état naturel, il est toujours lié à d'autres éléments chimiques, dans des molécules comme l'eau et les hydrocarbures. Effet être synthétisé à partir des énergies renouvelables. Il est particulièrement intéressant car son stockage est possible sous différents états (gaz, liquide et solide). D'autre part, il est léger et "propre". Mais il ne peut pas être utilisé directement, et nécessite la transformation d'une énergie chimique en énergie électrique. Cette production d'énergie a lieu dans une pile à combustible.

La pile à combustible est un générateur efficace d'énergie électrique à partir de l'énergie chimique, elle utilise la réaction électrochimique d'oxydoréduction entre l'hydrogène et l'oxygène pour donner del'électricité.

En fait, des recherches sur les piles à combustibles ont été faites depuis une centaine d'années. Les avantages offerts par la technologie des PAC comme l'efficacité, la protection de l'environnement et la construction modulaire, sont tels qu'elles ont suscité un intérêt permanent pour leur développement depuis1893.

Cette travail consiste à l'étude et à la modélisation d'une pile à combustible, qu'est limitéà une étude théorique et empirique de la pile qui prend en considération l'effet de la température sur la force électromotrice de la pile.

Ce mémoire est divisé on trois chapitre : Le premier chapitre, on commence par un petite généralité d'hydrogéné, il présente un définition d'hydrogène, des propriétés et des certaines caractéristiques physico-chimique d'hydrogène, a prié un brièvement historique. On termine par une étude générale sur les modes de production d'hydrogène.

Le second chapitre est consacré à l'étude bibliographique d'une nouvelle technologie. Il aborde premièrement un grade généralité sur la pile à combustible, a prié un brièvement historique par la suite une description des différents types de PAC selon le type d'électrolyte et leur température : un caractéristique électriques et chimique et leur mode de fonctionnement. Ont terminé par des avantages et des inconvénients généraux de PAC ; Cette technologie permet de convertir l'énergie d'hydrogène en électricité.

Dans le troisième chapitre nous présenterons un modèle dynamique de la pile à combustible PEMFC, avec l'intégration du modèle du reformeur ainsi que le modèle de l'onduleur. Le but est de mettre au plant un modèle globale pour la simulation ainsi que la mise en place de la structure de commande des convertisseurs statiques qui composent la chaîne.

# Chapitre I:
## *Etat d'art d'hydrogène*

## Introduction

Depuis plus d'un siècle, les combustibles fossiles ont servi de sources primaires d'énergie dans le monde. Toutefois, la consommation d'énergie provenant de diverses sources, par les pays industrialisés ou par les pays en voie de développement ne cesse de croître. Compte tenu de la demande croissante, des limitations des réserves énergétiques et de l'impact environnemental des combustibles fossiles, il n'est pas surprenant que beaucoup d'effort soient actuellement menés à la recherche des sources énergétiques alternatives à savoir l'énergie renouvelable qui peut provenir de la biomasse, du solaire, de l'hydraulique, la géothermie, et celle dite éolienne, ... etc. Ces énergies primaires constituent ce qu'on l'appelle le mix ou le bouquet énergétique (Figure I.1).

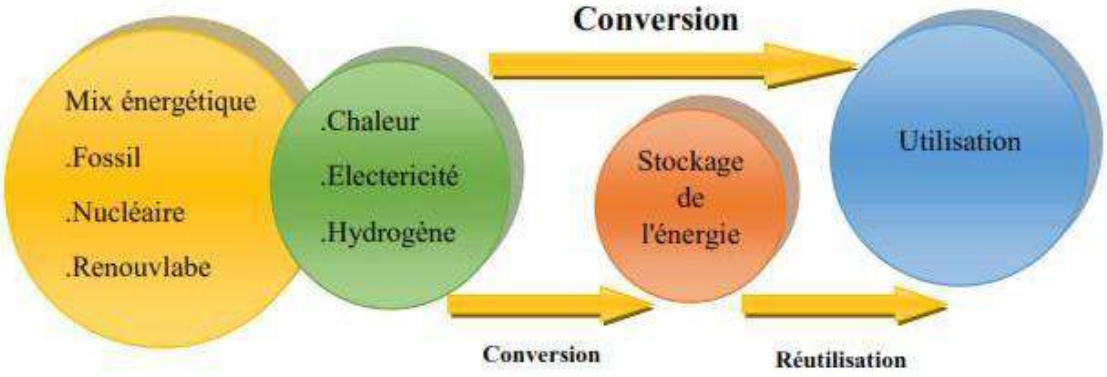



**Figure 1.1 :** Schéma énergétique.

Une variété de procédés peut être utilisée, y compris les procédés chimiques, biologiques, thermochimiques, l'électrolyse et la photolyse. Chaque technologie est à un stade de développement différent, et chacun offre des opportunités uniques, des avantages et des défis, disponibilité locale des matières premières, la maturité de la technique, les applications du marché et la demande, les problèmes politiques, et les coûts seront tous influés sur le choix et la synchronisation des diverses options de production d'hydrogène.

L'hydrogène peut être produit à partir de diverses matières premières. Il s'agit notamment de ressources fossiles, tel que le gaz naturel et le charbon, ainsi que des ressources renouvelables,

Comme l'eau et la biomasse. Cependant, la production d'hydrogène à partir de l'eau reste coûteux et les techniques pour la production d'hydrogène à partir de la biomasse, telle que la décomposition enzymatique de sucres, le vaporeformage et la gazéification des bios-huiles, offre un faible taux d'hydrogène et des exigences de traitement complexes. De nombreuses recherches ont été faites sur des molécules qui sont plus réduite que les sucres à partir des glucides extraits de la biomasse renouvelable telle que le bio-méthanol était pratiquement complètement converti en hydrogène et en dioxyde de carbone. Ces résultats suggèrent que le vaporeformage et la combinaison de l'oxydation partielle dans des réacteurs catalytiques pourraient s'avérer utile pour la productiond'hydrogène.

Les applications de l'hydrogène exigeant un degré de pureté et surtout dans le domaine du transport et automobile (pile à combustible) ainsi que dans le domaine d'électronique ($H_2$ comme gaz de balayage). Les réacteurs à membrane sont une technique prometteuse pour améliorer la production d'hydrogène. L'utilisation des membranes à base de Palladium donne des résultats remarquables en matière de conversion et de performance, en raison de la perméabilité de l'hydrogène à travers le palladium. A la lumière de ces considérations le présent travail a pour but d'étudier les deux systèmes MSR/ATR sur un catalyseur à base de Cu/ ZnO /$Al_2O$ dans un réacteur membranaire à base de palladium par voie de simulation numérique. L'étude porte aussi sur la détermination des conditions opératoires optimales conduisant aux meilleurs performances des deux procédés.

## 1.1Généralités d'hydrogène

### 1.1.1.Définition

Le nom hydrogène vient des deux mots : hydro = eau, et gène = générateur, donc le mot hydrogène signifie « générateur d'eau », c'est l'élément le plus abondant dans l'univers (Il compose 75% de la masse de toute la matière dans les étoiles et les galaxies.). L'hydrogène est un gaz diatomique, tient la première place dans la classification de Mendeleïev, il possède la plus simple structure atomique (un proton dans son noyau et un électron dans son atome), il porte les caractéristiques suivantes:

- Incolore, inodore et non toxique;
- Très inflammable dans l'air : 4% à 74,5% (20°C et 1atm);
- Brûle avec une flamme peu visible et détone facilement;
- Plus léger quelair;
- Reduction trèspuissant;

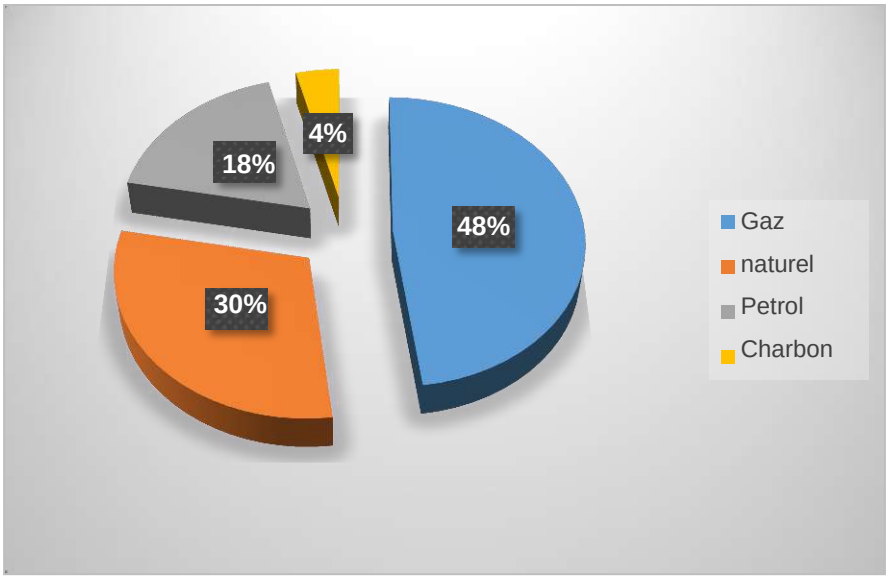



**Figure 1.2 :** Origine de l'hydrogène produit dans le monde en 2011.

## 1.1.2.Propriétés del'hydrogène

L'hydrogène est l'élément chimique le plus simple ; son isotope le plus commun est constitué seulement d'un proton et d'un électron. L'hydrogène est ainsi le plus léger atome existant. Comme il ne possède qu'un électron, il ne peut former qu'une liaison covalente : c'est un atome univalent. Les propriétés physico-chimiques de l'hydrogène sont données dans le tableauI.1.

L'élément hydrogène est extrêmement abondant sur Terre, dans l'eau des lacs, des rivières et des océans ainsi que dans les combustibles fossiles ; c'est le constituant essentiel de notre univers mais il n'existe pas à l'état libre. Le dihydrogène est la forme moléculaire de l'élément hydrogène, qui existe à l'état gazeux aux conditions normales de température et de pression. Les molécules comportent deux atomes d'hydrogène, sa formule chimique est $H_2$. Il est également appelé « molécule d'hydrogène » ou « gaz hydrogène » et, dans le langage courant, lorsqu'il n'y a pas d'ambiguïté avec l'élément chimique du même nom, il est très fréquemment désigné par hydrogène ». Le dihydrogène est un gaz incolore, inodore et non corrosif, et présente l'avantage d'être très énergétique .

**Tableau I.1:** Propriétés physico-chimiques de l'hydrogène.

| **Désignations** | **Caractéristiques** |
|---|---|
| Série chimique | Non– métaux |
| Groupe ;période ; bloc | 1 ; 1 ; s |
| Masse volumique | 0,0085 Kg / $m^3$ |
| Masse molaire | 2,016 |
| Masse atomique | 1,008 u |
| Rayon atomique | 0,59°A |
| Configuration électronique | $1s^1$ |
| Structure cristalline | Hexagonale |
| Densité gazeuse | à 273K : 0,08988Kg / $m^3$ |
| Point de fusion | -259,14°C( dihydrogène) |
| Point d'ébullition | -252,8 °C( dihydrogène) |
| Energie d'évaporation | 445 KJ/ Kg |
| Energie théorique de liquéfaction | 14112 KJ / Kg |
| Chaleur spécifique | 14,3 KJ / Kg. K |
| Electronégativité | 2,1 |
| La solubilité dans l'eau | 0,019 |
| Coefficient de diffusion dans l'air | 0,61cm /s |

### 1.1.3.Nature de production de l'hydrogène:

Ledihydrogène peut être classé dans trois catégories qui diffèrent selon sa nature de production. Le dihydrogène est alors qualifié de :

- Captif, dans le cas où il est volontairement produit sur place puis consommé par l'industriel,
- Coproduit ou sous-produit, s'il provient de procédés chimiques non dédiés à sa production,
- Marchand, s'il est produit ou acheté par les gaziers puis revendu à leurs clients.

## 1.2.Brefhistorique

- 1671 : Robert Boyle dissout des tournures de fer dans de l'acide chlorhydrique dilué et rapporte que les 'vapeurs' dégagées sont hautementinflammables.
- En 1766, le chimiste britannique Henry Cavendish parvient à isoler un gaz qui, en brûlant dans l'air, donne del'eau.
- En 1781, le chimiste français Antoine Laurent de Lavoisier donne à ce gaz le nom d'hydrogène, mot composé de deux éléments issus du grec ancien signifiant « qui engendre l'eau».
- Le 1er décembre 1783, Jacques Charles poursuivit ces travaux et découla avec un ballon gonflé à l'hydrogène et parcourut 35Km.
- 1804 : Le français Louis Joseph Gay-Lussac et l'allemand Alexander Von Humboldt démontrent conjointement que l'eau est composée d'un volume d'oxygène pour deux volumes d'hydrogène.·
- 1839 : L'anglais William R. Grove découvre le principe de la pile à combustible : il s'agit d'une réaction chimique entre l'hydrogène et l'oxygène avec production simultanée d'électricité, de chaleur et d'eau en utilisant des électrodes de platine poreux et de l'acide sulfurique commeélectrolyte.
- 1898 : James Dewar produit pour la première fois de l'hydrogèneliquide.
- 1900 : Le premier "Zeppelin" effectue son vol inaugural, remplid'hydrogène.
- 1931 : Harold Urey découvre ledeutérium.

- 1939 – 1953 : L'anglais Francis T. Bacon fait progresser les générateurs chimiques d'électricité qui permettent la réalisation du premier prototype industriel depuissance.
- Au début des années 1950, l'idée d'utiliser de l'hydrogène dans un réacteur pour la propulsiond'avion.
- 1960 : À partir de cette date, la NASA utilise la pile à combustible pour alimenter en électricité ses véhicules spatiaux (capsules Apollo et Gemini).

## 1.3.Production d`hydrogène

La production d`hydrogène représente aujourd`hui 630 milliard de $mm^3$, utilisée essentiellement pour produire l'ammoniac, le méthanol, $HNO_3$, … cette production devra fortement augmenter pour satisfaire les nouveaux besoins énergétiques

L'hydrogène peut être produit à partir de plusieurs sources différentes. Toutefois, actuellement, l'hydrogène est produit en majeure partie (97 %) à partir du reformage d'hydrocarbure .Le choix de procédé de fabrication de l'hydrogène se fait en fonction de nombreux paramètres (type d'énergie primaire disponible, pureté, débits, …). Les principales méthodes de production actuelles sont:

### 1.3.1Production d'hydrogène à partir de combustibles fossiles

Les combustibles fossiles (pétrole, gaz naturel et charbon) ont un large domaine d'application, principalement fournir de l'énergie dans divers domaines, et aussi dans les synthèses de composés organiques par processus chimiques.

- **Décomposition thermique :** C'est une opération endothermique imposant un large apport de chaleur. Dans le cas des hydrocarbures, la réaction conduit principalement à la production de l'hydrogène et du carbone solide , ainsi qu'à des sous-produits tels que le méthane, l'éthylène et certains composés aromatiques,etc.
- **Reformage catalytique :** C'est un procédé de raffinage qui a pour objectif principal de modifier la composition de coupes pétrolières légères afin d'augmenter leur indice d'octane. Ce procédé permet de produire d'importantes quantités d'hydrogène par différentes réactions chimiques misent en œuvre (déshydrogénation, isomérisation, etc.).
- **Vapocraquage :** C'est un procédé pétrochimique basé sur la pyrolyse des hydrocarbures en présence de la vapeur d'eau. Il repose principalement surl'instabilité

à haute température, des paraffines et des naphtènes, les principales réactions misent en jeu sont les réactions endothermiques suivantes : la coupure des liaisons C-C et la déshydrogénation donnant lieu à la production d'hydrogène.

- **Craquage catalytique :** C'est une opération pétrochimique qui permet de fractionner les composés lourds issus du pétrole en de petites molécules. Le méthane y est utilisé comme réactif sur des catalyseurs métalliques supportés (Ni, Co, Cu). Ce procédé présente un avantage particulier, celui d'éviter l'étape de séparation des produits gazeux, ceci est due au fait que par l'action de la température, il conduit uniquement à du carbone solide, et un hydrogène exempt de toutes traces de CO .
- **Oxydation partielle :** C'est un procédé de production d'hydrogène maîtrisé. Il se présente sous deux formes, catalytique et non catalytique et peut être appliqué à toutes les ressources naturelles contenant du carbone en proportion notable (hydrocarbure, charbon, biomasse, etc.) .La réaction mise en jeu est exothermique, quasi complète, initiée par un préchauffage des réactifs vers 300°C et réalisée à des températures allant de 1000 à1400°C.
- **Reformage autotherme :** Ce procédé est une combinaison de l'oxydation partielle non catalysée et le vaporeformage qui se produit en deux étapes. La première consiste à oxyder une partie du combustible en $CO_2$et $H_2O$ ($O_2$ pur ou air) afin de fournir la chaleur nécessaire à la seconde étape. La seconde étape est le vaporeformage (catalytique ou non catalytique) du combustible . Une unité de Water Gas Shift est généralement présente en fin de chaîne dans le but de transformer la majorité du CO en $CO_2$, et atteindre une bonneefficacité.
- **Vaporeformage des hydrocarbures :** C'est un procédé pétrochimique de production d'hydrogène qui transforme des hydrocarbures et des naphtas par la vapeur d'eau . C'est un procédé classique vu que les premiers développements du vaporeformage de l'éthane datent de1926.

### 1.3.2Production d'hydrogène à partir de la gazéification de la biomasse:

La production d'hydrogène à partir de la biomasse repose principalement sur le procédé de gazéification thermique par lequel des composés organiques tels que le bois, les produits

agricoles, les déchets urbains, se décomposent principalement en hydrogène et monoxyde de carbone. Le terme gazéification décrit le processus thermochimique se déroulant à température élevée (800-1100°C) entre la biomasse et un réactif gazeux (air, oxygène, vapeur d 'eau) pour produire un gaz de synthèse riche en CO et $H_2$. La différence par rapport à la combustion se situe dans la quantité suffisante pour conduire à l'oxygène utilisée (oxygène de l'air, oxygène de la vapeur) qui n'ait pas en quantité suffisante pour conduire à l'oxydation totale de la biomasse (combustion). Le procédé de production d'hydrogène par gazéification de la biomasse comporte quatre principales étapes :

- Production du gaz desynthèse,
- Purification du gaz de synthèse par élimination des impuretés ($H_2S$, $NH_3$,…),
- Réaction de water-glas-shift (WGS) en vue de convertir le monoxyde de Carbone contenu dans le gaz de synthèse en hydrogène en présence de la vapeurd'eau,
- Purification et production d'hydrogéné à grandepureté.

### 1.3.3.Production d'hydrogène par électrolyse:

Ce procédé repose sur le fait que l'énergie électrique permet de dissocier la molécule d'eau en deux éléments constitutifs (l'hydrogéné et l'oxygéné). La décomposition de l'eau par électrolyse s'écrit de maniéré globale :

$$H_2O \rightarrow H_2 + O_2(\Delta H = 285\text{kj/mol}) \quad (1.1)$$

Cette décomposition, nécessitant un apport d'énergie électrique, dépend essentiellement de l'enthalpie et de l'entropie de réaction. Cela correspond à un potentiel théorique de décomposition de l'ordre de 1,23 V/molécule d'eau à 298 K. en pratique, le potentiel est plutôt entre 1,7 et 2,3 V, ce qui correspond à des rendements d'électrolyse de70 à 85%. Une cellule d'électrolyse est constituée de deux électrodes (anode et cathode) et un générateur de courant continu séparé par un électrolyse (milieu conducteurionique).

L'utilisation des sources d'énergie renouvelables et propres, telles que l'hydroélectricité, l'énergie éolienne et l'énergie solaire, comme source d'électricité, présente des avantages sur le plan environnemental. Le coût de l'hydrogène produit par électrolyse est d'abord et avant tout lié à celui de l'électricité et à son mode de production .

### 1.3.4.Production d'hydrogène à partir des méthodes biologiques:

Certains microorganismes (microbes, cyanobactéries) dites photosynthétiqueproduisent

de l'hydrogène en captant de l'énergie lumineuse. Les recherches sont conduites Sur des micros algues, (Chlamydomonas, spiruline…) . Les procèdes biologiques de production de $H_2$ sont classés en quatre catégories, à savoir :

- La bio photolyse de l'eau par les algues et les cyanobactéries,
- La photo décomposition des composés organiques par les bactéries Photosynthétiques,
- La fermentation des composés organique par les bactéries,
- Le système hybride utilisant des bactéries photosynthétiques et des bactéries Anaérobique

### 1.3.5. Production d'hydrogène à partir des alcools

#### 1.3.5.1. définitions des alcools

#### 1.3.5.1.1Le méthanol

Le méthanol, également connu sous le nom d'alcool méthylique de formule $CH_3OH$ (souvent abrégé en Me OH), est le plus simple des alcools, il se présente sous la forme d'u liquide léger, volatil, incolore, inflammable, toxique avec une odeur caractéristique persistante [21]. Le chimiste allemand Matthias Pier, travaillant pour BASF a développé en1923 le premier procédé pour convertir un mélange de gaz de synthèse (le monoxyde de carbone, le dioxyde de carbone et l'hydrogène) en méthanol [17].

$$CO + 2H_2 \rightarrow CH_3OH \qquad (\Delta H = -91KJ/mol) \qquad (1.2)$$

$$CO_2 + 3H_2 \rightarrow CH_3OH + H_2O \qquad (\Delta H = -49{,}6KJ/mol) \qquad (1.3)$$

#### 1.3.5.1.2.L'éthanol

L'éthanol ou alcool éthylique, est le moins dense des alcools (0,79 à 20°C), usuellement désigné par l'abréviation Et OH et possédant la structure semi-développée de $CH_3$-$CH_2$-OH. L'éthanol peut être produit industriellement par les différentes méthodes suivantes :

- **Hydratation catalytique directe del'éthylène**

Ce procédé repose principalement sur la réaction (1.4) , cette réaction nécessite une catalyse afin d'obtenir un rendement satisfaisant à l'équilibre (7- 22 %), suivis de distillations successives pour obtenir un mélange concentré en éthanol.

$$C_2H_4 + H_2O \rightarrow C_2H_5OH \qquad (\Delta H = -43{,}4KJ/mol) \qquad (1.4)$$

- **Hydratation indirecte de l'éthylène**

Laproduction d'éthanol par hydratation indirecte de l'éthylène fait intervenir un mécanisme réactionnel complexe reposant sur deux grandes étapes : un ensemble de réactions d'estérification suivies d'hydrolyse. Ce procédé consomme des grandes quantités d'acide sulfurique et nécessite en entrée un mélange gazeux de bonne qualité.

- **A partir de la biomasse**

La production de bioéthanol à partir de la biomasse est actuellement la plus importante, vu qu'elle est respectueuse de l'environnement et nécessite des matières premières disponibles et faciles à manipuler. Sommairement, cette méthode se divise en trois étapes .

**a) L'hydrolyse de la céréale :** Cette étape consiste à hydrolyser l'amidon contenu dans les céréales afin d'obtenir du glucose. Elle est réalisée soit par des enzymes (hydrolyse enzymatique) soit par de l'acide (hydrolyse acide, nécessite que le mélange soit porté à ébullition).

**b) La fermentation du glucose :** Cette étape consiste à utiliser des levures que l'on insère dans un mélange de sucre et d'eau. Après une durée de fermentation de quelques semaines, on obtient un éthanol très dilué, inutilisable pour l'instant.

**c) La distillation :** La dernière étape de cette chaine d'opérations est mise au point pour extraire l'éthanol du mélange (éthanol + eau). L'éthanol est un composé utilisé dans divers domaines d'application.

### 1.3.5.2.Intérêts des alcools

Dans le cas des piles à combustibles, l'emploi du méthanol comme carburant est très recommandé par les chercheurs étant donné qu'il bénéficie de plusieurs méthodes de production, telles que l'extraction à partir du gaz naturel, la synthèse chimique ou principalement la fermentation de la biomasse, comme source d'énergie respectueuse de l'environnement. Par ailleurs, notre combustible présente d'autres avantages, qu'on classe comme suit :

- Aucune émission de polluants tels que No et SO,
- Molécule simple avec un rapport molaire hydrogène / carbone élevé,
- Basse concentration deCO,
- Aucune liaison C-C réduisant ainsi la formation dessous-produits,

- Basse températures de réaction (200-300°C) et pressionatmosphérique,
- Bonne miscibilité avecl'eau.

Bien que le méthanol présente de nombreux avantages dans ce domaine, il est important de noter que sa toxicité est relativement élevée et qu'il représente un inconvénient majeur lorsqu'il provient de carburants non renouvelables. De plus, l'éthanol aussi présente des avantages liés à sa manipulation, qu'on classe comme suit :

- Bonne disponibilité et bas coûts de production,
- Manipulation, transport et stockage faciles,
- Produit non-toxique (contrairement auméthanol)
- Possibilité de distribution comme carburant à travers un réseau

semblable Aux stations de service conventionnelles.

L'hydrogène peut être produit in situ à partir des alcools par quatre processus

Chimiques qui sont décrit comme suit :

### 1.3.5.2.1.La décomposition

Le processus de décomposition est une opération endothermique assez simple d'un point de vue chimique, tandis que l'unique réactif impliqué est le méthanol qui se décompose sous l'effet de la chaleur, cela signifie qu'un apport énergétique est nécessaire.

Le rendement de cette réaction (1.5) est généralement de 67% en hydrogène et de 33% en monoxyde de carbone .

$$CH_3OH \rightarrow CO + 2H_2 \qquad (\Delta H = 91 KJ/mol) \quad (1.5)$$

Le procédé de décomposition de l'éthanol est une opération endothermique simple d'un point de vue chimique, qui nécessite un apport énergétique externe, puisque le seul réactif impliqué est l'éthanol qui sous l'effet de la chaleur se décompose selon les réactions suivantes :

$$CH_4 + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow CO + 2H_2 \qquad (\Delta H = -36 KJ \cdot mol^{-1}) \quad (1.6)$$

$$C_2H_5OH \rightarrow CH_4 + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow CO + 2H_2 (\Delta H = -36 KJ \cdot mol^{-1}) \quad (1.7)$$

Plusieurs études ont été effectuées sur cette réaction afin de mettre au point un catalyseur actif, stable et bon marché. La réaction (1.6) est favorisée à hautes températures, et sur des catalyseurs $Pt/Al_2O_3$ pour donner un rendement remarquable en hydrogène .

D'autre part, à une température de 227°C, l'enthalpie libre de la réaction (1.7) est suffisamment négative pour que cette dernière soit favorisée et se réalise facilement à cette température.

### 1.3.5.2.2.L'oxydation partielle

Le procédé d'oxydation partielle du méthanol a attiré ces derniers temps l'attention de beaucoup de chercheurs, du fait que c'est un procédé exothermique qui ne nécessite aucun ajout externe d'énergie, chose importante d'un point de vue économique.

$$CH_3OH + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow 2H_2 + CO_2 \quad (1.8)$$

Le procédé est également intéressant dans le cas de l'éthanol puisque la réaction mise en jeu n'a besoin que d'un faible apport calorifique en début de réaction[24].

$$C_2H_5OH + \frac{3}{2}O_2 \rightarrow 2CO_2 + 3H_2 \quad (1.9)$$

$$C_2H_5OH + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow 2CO + 3H_2 \quad (1.10)$$

Il existe deux types de réactions dans ce procédé qui se réalisent à basse température et basse pression : La réaction (I.9) se déroule quand l'oxygène est en excès, et produit de L'hydrogène et du $CO_2$.Tandis que dans la réaction (I.10), le CO est produit à la place du $CO_2$, Quand l'oxygène n'est pas en excès. Aussi, il est préférable d'opérer avec un Excès d'oxygène.

### 1.3.5.3.Le vapore formage

Le vaporeformage est le procédé de production d'hydrogène qui fait l'objet de notre étude, Il consiste à transformer des charges légères d'hydrocarbures (méthane, gaz naturel…) en gaz de synthèse composé de monoxyde de carbone et de dihydrogène. Pour cela on fait réagir l'hydrocarbure avec de la vapeur d'eau sur un catalyseur au nickel entre 840 et 950 °C. A partir du gaz de synthèse, on convertit le monoxyde de carbone à l'aide de vapeur d'eau pour obtenir du dioxyde de carbone et dudihydrogène.

### 1.3.5.4.Le reformage autochrome

Le reformage autochrome du méthanol a été mis au point pour la première fois par Huang et Wang en 1986.

Cette technologie combine les deux précédentes (le vaporeformage / Oxydation partielle). La température de réaction est de l'ordre de 600 à 900 sous une pression supérieure d 20 bars, en présence d'un catalyseur (à base de nickel ou de métauxprécieux).

Peuvent être réformés selon cette méthode : gaz naturel, méthanol, essence ou gazole.

$$C_nH_m + nH_2O \rightarrow nCO + \left(\frac{m}{2} + n\right)H_2 (1.11) \qquad C_nH_m + \frac{n}{2}O_2 \rightarrow nCO + \frac{m}{2}H_2 \quad (1.12)$$

Pour le méthane, on a les deux réactions suivantes :

$$CH_4 + H_2O \rightarrow CO + 3H_2 \qquad (\Delta H = 206KJ \cdot mol^{-1})(1.13)$$

$$CH_4 + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow CO + 2H_2 \qquad (\Delta H = -36KJ \cdot mol^{-1})^{(1.14)}$$

Elles se produisent simultanément dans le même réacteur. L'apport d'eau et d'oxygène est calculé de façon à ce que le bilan énergétique soit équilibré (la réaction se poursuivant sans apport externe d'énergie). Le démarrage peut se faire en commençant par l'oxydation du gaz naturel, réaction fortement exothermique.

Le gaz produit contient environ 30 % d'hydrogène, 10 % de CO, 10 % de $CO_2$ et de l'azote.

- **Reformage autothermique duméthanol**

Le reformage auto thermique du méthanol s'effectue en présence d'un catalyseur à une température de 250 à 500 °C. L'équation de la réaction principale est :

$$CH_3OH + (1-2x)H_2O + xO_2 \rightarrow CO_2 + (3-2x)H_2 (1.15)$$

- **Reformage autothermique del'éthanol**

L'équation de la réaction principale est :

$$\mathbf{C_2H_5OH + xO_2 + (3-2x)H_2O \rightarrow 2CO_2 + (6-2x)H_2} (1.16)$$

## 1.4.Utilisation del'hydrogène

L'hydrogène est largement utilisé dans l'industrie chimique et pétrochimique pour la

synthèse d'ammoniac, de l'acide sulfurique, du peroxyde d'hydrogène et de l'acide nitrique. Il est aussi utilisé en métallurgie, en électronique, en pharmacologie, dans le traitement des produits agroalimentaires « matières grasses hydrogénées » et dans l'industrie verrière.

A l'état liquide, il est utilisé comme carburants dans les navettes spatiales. Toutefois, l'hydrogène présente un nouvel intérêt dans le domaine des transports, il permet également la production d'électricité via la pile à combustible.

## Conclusion

Actuellement, 95% de l'hydrogène est produit à partir des hydrocarbures, en raison tout d'abord de leur intégration dans l'industrie pétrolière qui est l'une des premières consommatrices d'hydrogène. Les autres raisons sont, bien entendu, leur disponibilité actuelle ainsi que leur réactivité chimique et le coût global de production on constate que :

- Levaporeformage, ou reformage à la vapeur, consiste à transformer les hydrocarbures en gaz de synthèse par réaction avec de la vapeurd'eau
- L'oxydation partielle consiste à transformer les hydrocarbures en gaz de synthèse par oxydation ménagée en présence d'oxygène.
- L'électrolyse de l'eau consiste à séparer l'eau $H_2O$ en hydrogène $H_2$ et oxygène $O_2$ lors d'une réaction d'oxydo-réduction. Le procédé industriellement disponible à l'heure actuelle consiste à réaliser cette électrolyse à l'aide d'électricité.
- La photo-électrolyse consiste en l'électrolyse de l'eau à partir de l'énergie solaire sans passer par l'étape intermédiaire de production d'électricité. En présence d'un catalyseur, la dissociation de l'eau se fait spontanément grâce à l'énergie solaire.
- La production à partir de la biomasse est également un procédé prometteur à étudier.

Comme les ressources fossiles (actuellement elles sont la source principale de production d'électricité dans le monde) sont limitées, non renouvelables, et leurs combustions engendrent des gaz à effet de serre.

# Chapitre II
# Système de pile à combustible

# Introduction

L'hydrogène peut réagir avec l'oxygène pour libérer de l'énergie électrique et de la chaleur selon le procédé inverse de l'électrolyse de l'eau, il suffit de cet dites cela la pile à combustible, ce processus intervient dans la génération d'une source d'énergie électrique, Une pile à combustible (P.A.C.) est une machine électrochimique qui transformel' énergie chimique stockée dans l'hydrogène et l'air en énergie électrique. Cette transformations' accompagne d'une production d'eau, de chaleur et de travail.

## 2.1Qu'est-ce une pile àcombustible

Une pile à combustible est un appareil qui converti l'énergie chimique d'un combustible en électricité au travers une réaction chimique contrôlée avec l'oxygène ou d'un autre oxydant. Les piles à combustibles se distinguent des batteries et des piles par le fait qu'elles ont besoin d'un apport constant de combustible pour fonctionner, mais que leur production d'électricité est constante tant que le combustible estapprovisionné.

La pile à combustible est un générateur de courant à haut rendementénergétique. Celui-ci est généralement proche de 50%.

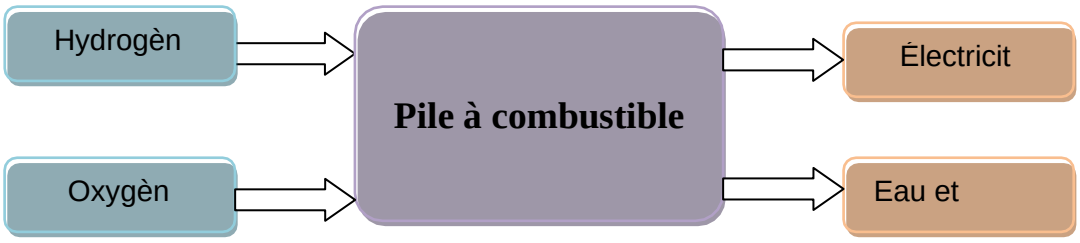



**Fig. (2.1)** Schéma de principe de conversion directe en électricité

## 2.2Historique des piles à combustible

La première démonstration pile à combustible a été faite en 1839 par William Grove. Il s'agissait d'une pile hydrogène/oxygène à basse température avec des électrodes en platine et d'un électrolyte à base d'acide sulfurique dilué. Ce n'est qu'à partir des années 1930 que les piles à combustible devinrent pertinentes grâce aux travaux de l'ingénieur anglais Francis T. Bacon, à Cambridge sur une pile à combustible hydrogène/oxygène en milieu KOH aqueux (température de 80 à 200°C, pression de gaz de quelques atmosphères à 40 atmosphères, électrodes poreuses de nickel et d'oxydes de nickel). En 1953, la réalisation d'un premier prototype de puissance notable a eu lieu. Le

programme spatial américain de la NASA (National Aeronautics and Space Administration) conduisit, à la fin des années cinquante, à une série de réalisation technologiques concernant des piles à électrolyte polymère solide (SPEFC de General Electric), pour le programme GEMINI, et, à partir des années soixante, à la fabrication de piles alcalines de type Bacon par Pratt et Whitney (devenu United Technologies Corporation), pour les missions lunaires APOLLO et maintenant pour les navettes spatiales. Parallèlement, Justi et Winsel, en Allemagne, développèrent des piles alcalines (AFC) de quelques kilowatts, avec des électrodes denickel de Raney de grandes surfaces actives (électrodes à double squelette ou DSK.

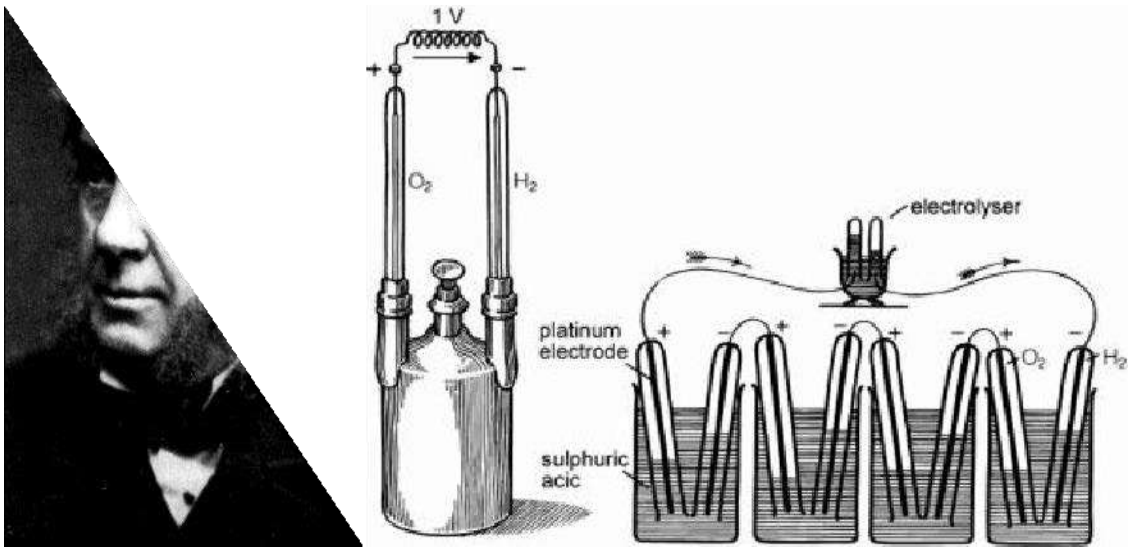



**Fig. (2.2)** L'expérience de Sir William, inventeur historique de la Pile à Combustible

## 2.3.Le renouveau de la pile àcombustible

Après l'invention la pile à combustible elle est resta plus ou moins en latence durant près d'un siècle et après quelques légères améliorations par différents scientifiques du début du 20e siècle, c'est Francis T.Bacon qui en 1935 enclenche le progrès le plus important en réalisant un prototype de pile à combustible remplaçant l'électrolyte acide par un électrolyte alcalin. L'avantage de ce dernier est d'être moins corrosif pour les électrodes. Cette pile à combustible aboutira en 1953 sur la création d'un premier générateur électrique de 1kW.

Le principe physique est établi et des dizaines de laboratoires et d'industriels vont se lancer dans les piles à combustible. Néanmoins les coûts restant très élevés, ils sont un obstacle important à son utilisation, hormis pour la NASA qui peut se permettre de tels investissements. Ainsi elle l'utilise, avec succès, comme générateur électrique pour les missions Gemini et Apollo en 1963 et 1968.

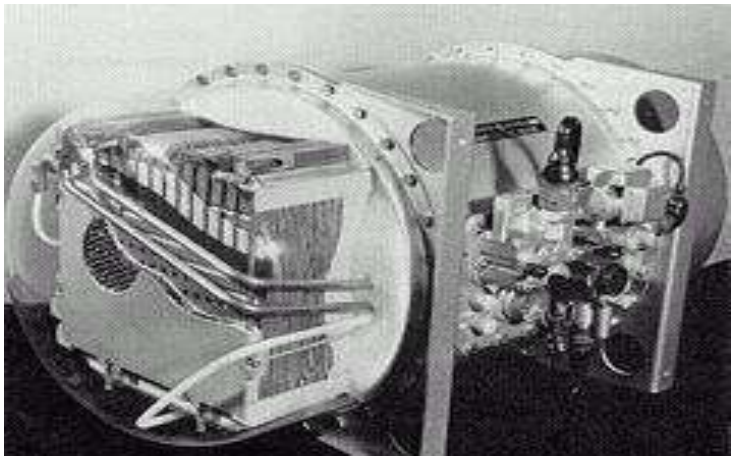


**Fig. (2.3)** Projet de Gemini.

Dans les années 1980 alors que les Etats-Unis et le Japon vont poursuivre de manière très active leurs recherches, l'Europe (à l'exception de l'Allemagne) va se désintéresser de ces travaux.

Ainsi, depuis sa découverte la pile à combustible a connu de nombreuses améliorations (perfectionnement des électrodes par Monde et Langer en 1899, optimisation de la température de fonctionnement …), mais le principe lui n'a pas changé.

## 2.4.Structure de la pile àcombustible

La pile à combustible se compose de deux électrodes (anode et cathode), d'un électrolyte et d'un circuit électrique. Chaque type de pile a sa structure géométrique propre, cependant les composants principaux restent les mêmes.

Le cœur de la pile est constitué : d'une anode (électrode chargée positivement) et une cathode (électrode chargée négativement), séparées par un électrolyte (un matériau qui bloque le passage des électrons). L'assemblage de ces composants ainsi que leur nature dépend du type de pile. Ils ont cependant le même rôle.

### 2.4.1.Leséléctrodes

Les réactions électrochimiques se passent au niveau des électrodes : une oxydation à l'anode (où l'espèce chimique capte un ou plusieurs électrons) et une réduction à la cathode (où l'espèce chimique cède un ou plusieurs électrons).

Ces réactions sont normalement très lentes. Pour que l'hydrogène soit oxydé, il faut un catalyseur. Celui-ci qui permet alors de faciliter les échanges électroniques. De

m.ême pour l'oxygène. Il a pour rôle de faciliter les échanges électroniques (l'étape lente) et est spécifique à la réaction et au niveau de la température de lapile.

Les deux réactions d'oxydoréductions se font dans la zone dite de « **contact triple** » où se trouvent les réactifs gazeux, les ions et les électrons. Dans cette zone se trouvent l'électrolyte (à travers lequel passent les espèces ioniques), les électrodes (ou plus précisément le catalyseur avec un apport ou un départ d'électrons) et l'arrivée des réactifs gazeux. Cette zone est primordiale pour le bon fonctionnement de la pile.

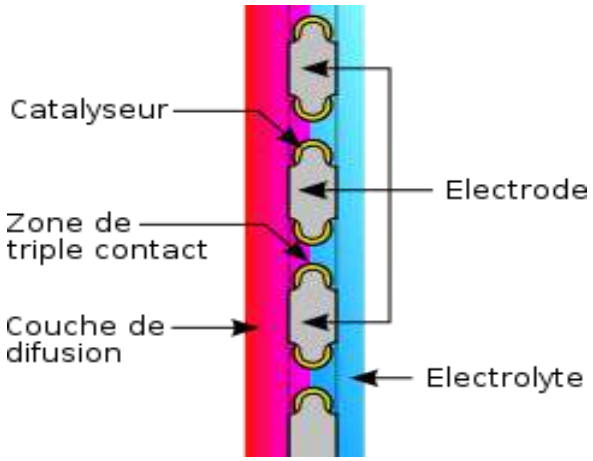



**Fig. (2.4)** Catalyseur du côté cathode.

## 2.4.2.L'électrolyte

L'électrolyte varie en fonction du type de pile : par exemple pour la pile utilisée dans l'automobile, une membrane échangeuse d'ions pour les PEMFC est utilisée. Elle permet que les espèces ioniques (et non pas les électrons) passent de l'anode vers la cathode.

En solution ou à l'état liquide, l'électrolyte est conducteur et se dissocie en anions et en cations par l'action d'un courant électrique. L'électrolyte est un élément de l'électrolyse.

## 2.4.3.Les plaquesbipolaires

Ces plaques sont collées aux supports de l'anode et de la cathode. Elles permettentde:

- Canaliser les gaz venant del'extérieur
- Collecter lecourant
- Gérer lesflux

Généralement en graphite, ces plaques doivent conduire le courant, mais aussi permettre de diffuser des gaz jusqu'aux électrodes (pour les piles de type PEMFC). Elles doivent résister aux agressions du milieu (acide ou basique) et aussi être imperméables aux gaz réagissant (sous peine de provoquer un court-circuit chimique).Situées au cœur des piles à combustible, les plaques bipolaires assurent la conduction des électrons, ce qui permet l'alimentation en gaz et l'évacuation de l'eau formée.

Des canaux sont gravés dans ces plaques pour permettre le passage des réactifs.

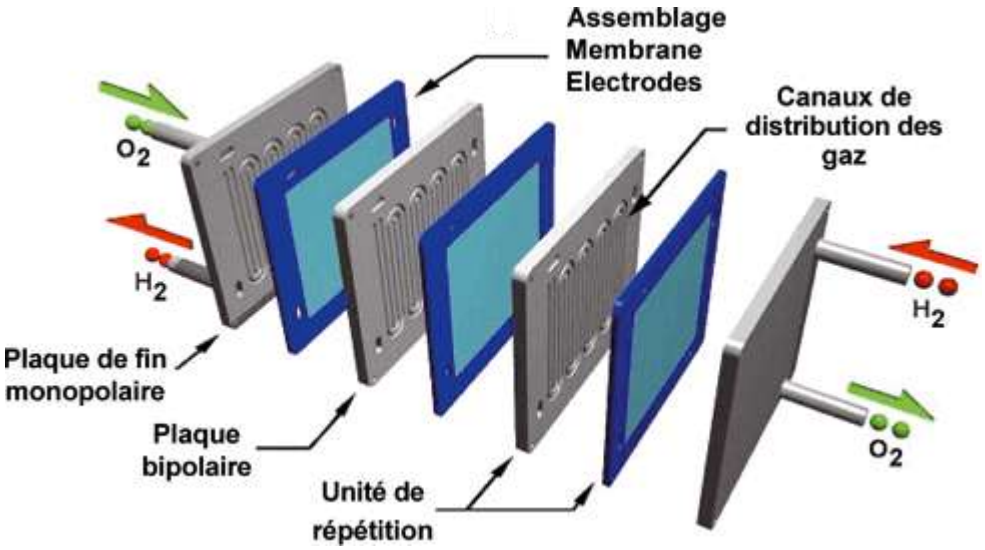



**Fig. (2.5)** Vue éclatée d'une pile à combustible.

Pour le bon fonctionnement de la pile, il est indispensable d'ajouter d'autres composants. Il s'agit des réservoirs pour l'hydrogène et l'eau, du compresseur pour l'air, de l'humidificateur, des échangeurs de chaleur pour refroidir la pile et de l'onduleur pour transformer le courant continu en sortie de pile.

## 2.5.Principe de fonctionnement d'une pile àcombustible

En principe, une pile à combustible peut fonctionner en utilisant une variété de carburants et d'oxydants. L'hydrogène a été reconnu comme le carburant le plus efficace parce qu'il a une plus haute réactivité électrochimique que les autres carburants, tels que les hydrocarbures ou les alcools. Et l'oxygène est l'oxydant par excellence en raison de sa haute réactivité et son abondance dansl'air.

Le principe de fonctionnement d'une pile à combustible est décrit par une relation Chimique. Cette réaction chimique est une oxydoréduction électrochimique. Elle fait

réagir l'hydrogène et l'oxygène pour produire de l'électricité, de l'eau et de la chaleur, selon la réaction chimique globale suivante :

$$2H_4+O_2\rightarrow 2H_2O+électricité+chaleur \quad (2.1)$$

Cette réaction s'opère au sein d'une structure essentiellement composée de deux Électrodes (l'anode et la cathode) qui seront les conducteurs électroniques, séparées par un électrolyte solide qui sera le conducteur protonique. Plus précisément, les réactions suivantes interviennent aux deux électrodes:

A l'anode : couple $H^+$ / $H_2$ (électrolyteacide)

$$2H_2 \rightarrow 4H^+ + 4e^- \quad (2.2)$$

A la cathode : couple $O_2$ / $H_2O$

$$O_2 + 4H_2 + 4e^- \rightarrow 2H_2O \quad (2.3)$$

Ces réactions d'oxydation de l'hydrogène (à l'anode) et de réduction de l'oxygène (à la Cathode) s'effectuent à l'interface électrolyte/électrode en présence d'un catalyseur (platine), en des points appelés « points triples ». Voir la figure (2.6) en ces points, on trouve, autour de la particule de catalyseur :

- Une continuité physique avec l'électrolyte pour assurer la conduction des protonsH+.
- Une continuité physique avec le conducteur électronique qu'est l'électrode, pour assurer la conduction des électronse-.
- Une structure poreuse capable d'assurer la diffusion de l'hydrogène ou de l'oxygènemoléculaire.
- Une structure hydrophobe pour assurer l'élimination de l'eau formée, dans le cas de laCathode
- Une structure thermiquement conductrice pour assurer l'évacuation de la chaleur deréaction.

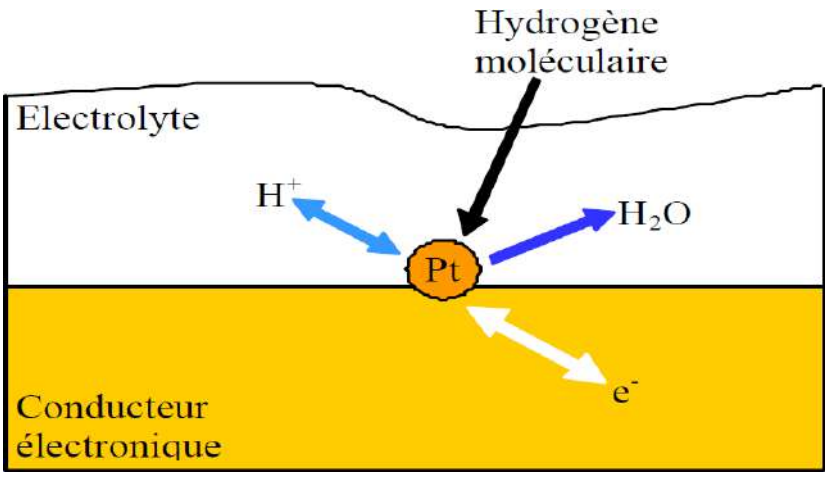



**Fig. (2.6)** Principe de la réaction catalytique dans l'électrode volumique.

La pile à combustible produit une tension électrique d'environ 0,7 à 0,8 volt par cellule, selon la charge (densité de courant) et produit de la chaleur. Leur température de fonctionnement varie de 60 à 200 °C selon les modèles. L'eau est généralement évacuée sous forme de vapeur avec l'excédent de dioxygène.

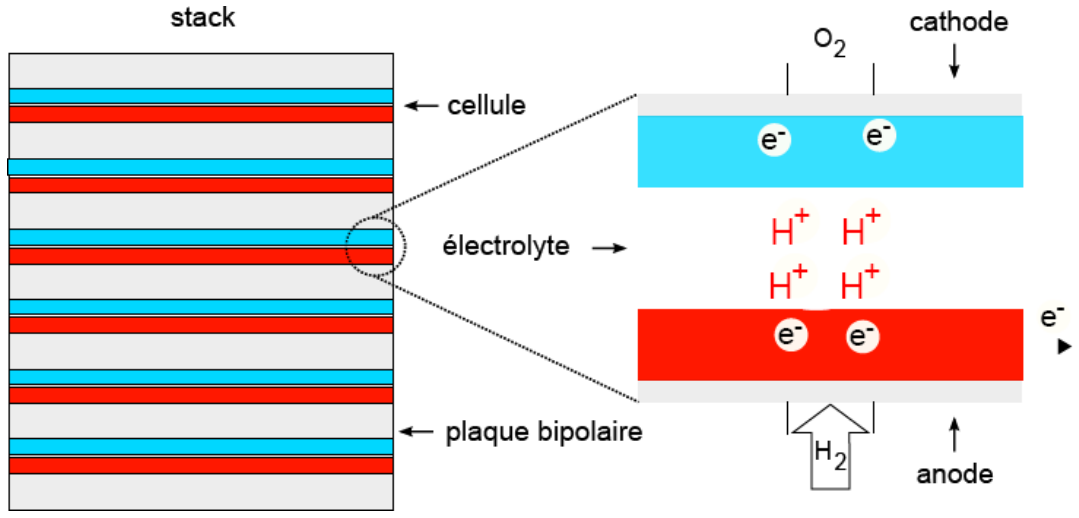



**Fig. (2.7)** Schéma de principe de fonctionnement d'une pile à combustible.

Pour fonctionner correctement, une pile à combustible a besoin de circuits auxiliaires comme un circuit de refroidissement, d'hydratation des gaz, de contrôle de pression (absolue et différentielle) des gaz et autres circuits de sécurité.

## 2.6.Expression du débit d'Hydrogène etd'Oxygène

La loi de Faraday exprime le débit massique d'hydrogène en fonction du courant I :

$$V^{\bullet}_{H_2} = \alpha I = \frac{NV_m}{zF} I \qquad (2.4)$$

Avec :

N = 10 : nombre de couches (couples anode/cathode) de la pile.

Z =2 : nombre d'électrons impliqués dans la réaction d'une molécule de dihydrogène.

F = 96368 C/mol [A.s/mol] constante de Faraday.

Vm = 22.4 l/mol volume molaire de H2. [51]

## 2.7. Les différentes piles àcombustible

Il existe différents types de pile à combustible, suivant la nature de l'électrolyte et la température de fonctionnement les piles à Combustible sont regroupées en cinq catégories :

### 2.7.1.La pile à combustible à membrane échangeuse de protons PEMFC (Proton Exchange Membrane FuelCell)

Le cœur d'une pile à combustible est constitué d'un empilement de cellule électrochimiques élémentaires EME qui assemblées en série permettent d'obtenir les caractéristiques en tension de la pile et donc le niveau de puissance souhaité. Cette modularité constitue un atout important pour l'intégration d'une pile à combustible dans un véhicule (augmentation de la puissance par simple ajout de cellules), puisque l'efficacité énergétique d'un stack est peu influencée par la taille du dispositif.

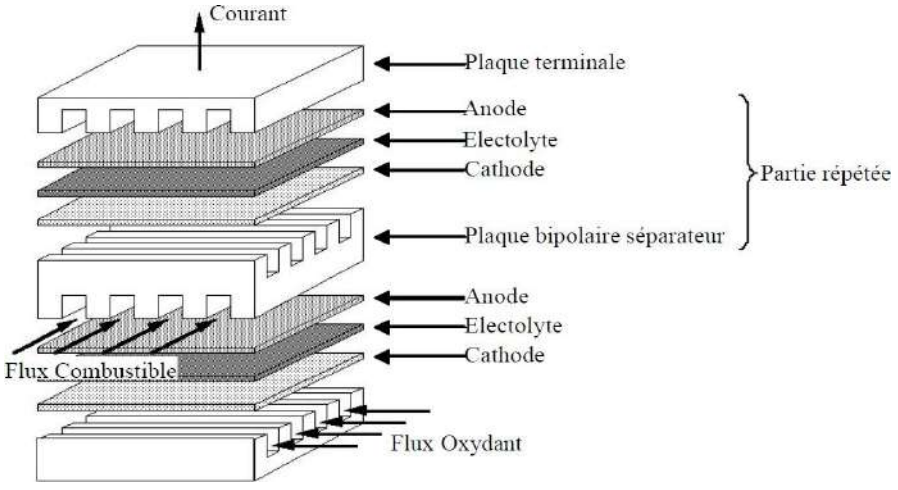



**Fig. (2.8)** Structure d'un empilement de cellule PEMFC

Dans une pile PEMFC, les électrodes de chaque cellule sont en contact avec une membrane en matériau polymère assurant la fonction d'électrolyte, et les faces des électrodes en carbone sont recouvertes par un catalyseur à base de platine (côtés anodique et cathodique). L'ensemble EME est alimenté en réactifs par des plaques

bipolaires de distribution, qui permettent également la mise en série électrique des cellules, la collecte des électrons et la circulation du liquide de refroidissement. L'oxygène et l'hydrogène circulent respectivement dans les canaux cathodiques et anodiques et se diffusent dans les couches de diffusion afin d'atteindre les zones actives des électrodes de façon homogène. Ces zones actives sont le siège des réactions d'oxydoréduction, le principe général étant de convertir directement en énergie électrique et thermique l'énergie libre de la réaction électrochimique.

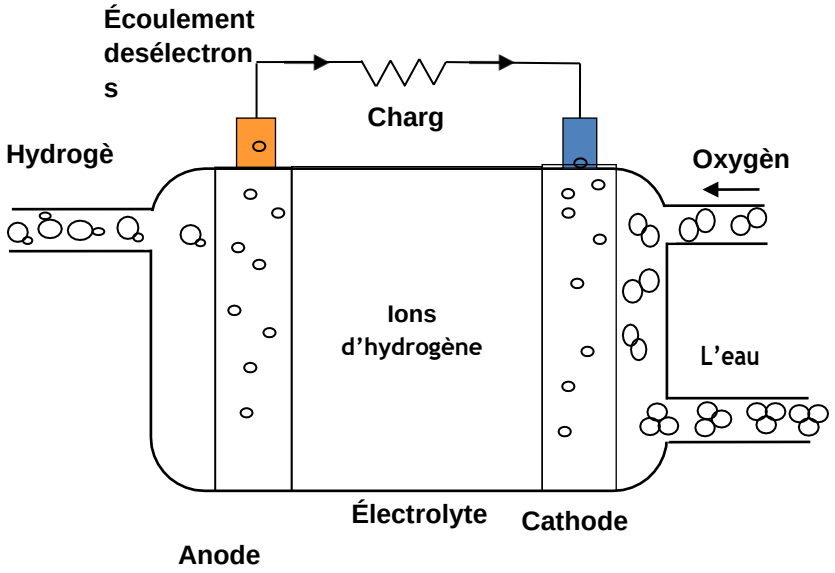



**Fig. (2.9)** Schéma de principe d'une pile à combustible PEMFC

L'hydrogène $H_2$ alimente le côté anode (électrode négative) : ses atomes sont dissociés en électrons et en protons. Les protons traversent la membrane, tandis que les électrons circulent de l'anode vers la cathode (électrode positive) par les électrodes et le circuit électrique extérieur dans lequel une partie de leur énergie potentielle est convertie en travail utile. L'oxygène $O_2$ (pur ou de l'air) alimente le côté cathode et se combine aux protons qui on traversé la membrane et aux électrons venant du circuit électrique pour donner de l'eau. Cette eau issue de la réaction électrochimique doit être évacuée, souvent par un débit d'air en excès. La pile à combustible constitue donc un dispositif de transformation de matière et de conversion d'énergie fortement hétérogène [47]. Le résultat net des réactions simultanées au sein de ce dispositif de conversion électrochimique est une production d'eau accompagnée de production d'électricité à courant continu et de chaleur suivant les réactions :

À la cathode (électrode positive), réduction de l'oxygène :

$$\frac{1}{2}O_2 + H^2 + 2e^- \rightarrow H_2\text{O} \qquad (2.5)$$

À l'anode (électrode négative), oxydation de l'hydrogène :

$$H_2 \rightarrow 2H^2 + 2e^- \qquad (2.6)$$

La réaction d'oxydoréduction totale s'écrit :

$$H_2 + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow HO_2 + énergieélectrique + chaleur \qquad (2.7)$$

## 2.7.2.La pile à combustible alcaline AFC (Alkaline FuelCell)

Elles utilisent un électrolyte liquide constitué d'une solution d'hydroxyde de potassium Concentrée (généralement en concentration de 30 à 40%), qui est un électrolyte conducteur d'hydroxyde ($OH^-$) dont la température reste comprise entre 80 et 200°C. les réactions mises en jeu sont les suivantes :

À l'anode, avec un catalyseur au nickel ou au platine-palladium, on a la réaction :

$$2H_2 + 4HO^- \rightarrow 4H_2O + 4e^- \qquad (2.8)$$

À la cathode, avec un catalyseur à l'oxyde de nickel, à argent ou au platine-or, on a la réaction :

$$O_2 + 4e^- + 2H_2O \rightarrow 4HO^- \qquad (2.9)$$

Les catalyseurs employés dans ce type de pile ne nécessitent pas de métaux précieux. On utilise un alliage à base de nickel (nickel de Raney ou borure de nickel) pour l'anode et de charbon actif, seul ou argenté, pour la cathode.

Un inconvénient majeur de la pile alcaline est la sensibilité de l'hydroxyde de potassium au dioxyde de carbone. Il est donc nécessaire d'utiliser de l'hydrogène très pur lorsque celui-ci est obtenu par vaporeformage d'un combustible hydrocarboné. Il faut aussi éliminer ce dioxyde de carbone de l'air fourni à la cathode afin d'éviter la carbonatation de la potasse.

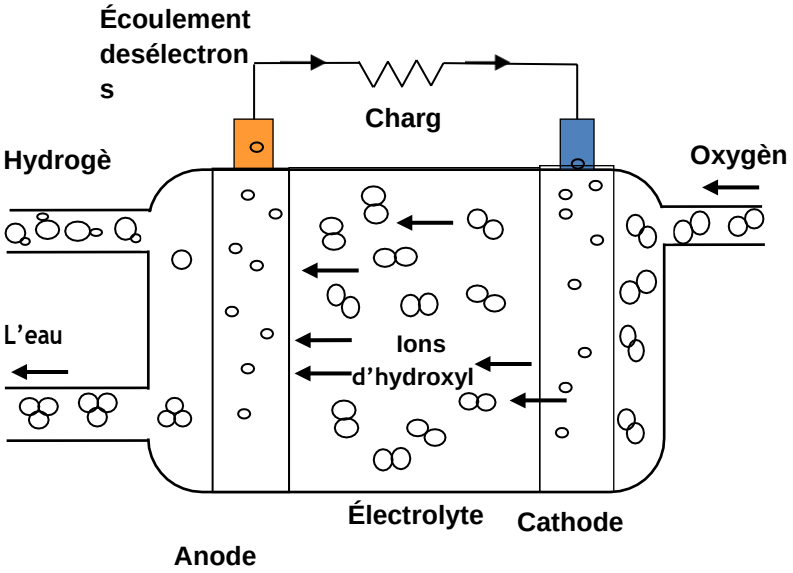



**Fig. (2.10)** Principe de la pile à combustible alcaline.

## 2.7.3.La pile à combustible à acide phosphorique PAFC (PhosphoricAcidFuelCell)

L'électrolyte est de l'acide phosphorique très concentré (97%) qui a une très faible Tension de vapeur et permet un fonctionnement jusqu'à 250°C. Les électrodes, destinées à séparer le gaz de la solution, sont hydrophobes (en général un tissu de carbone comprenant du PTFE).On a les demi-réactions suivantes:

À la cathode :

$$H_2O + \frac{1}{2}O_2 + 2e^- \rightarrow H_2O \quad (2.10)$$

À l'anode :

$$H_2O + \frac{1}{2}O_2 + 2e^- \rightarrow H_2O \quad (2.11)$$

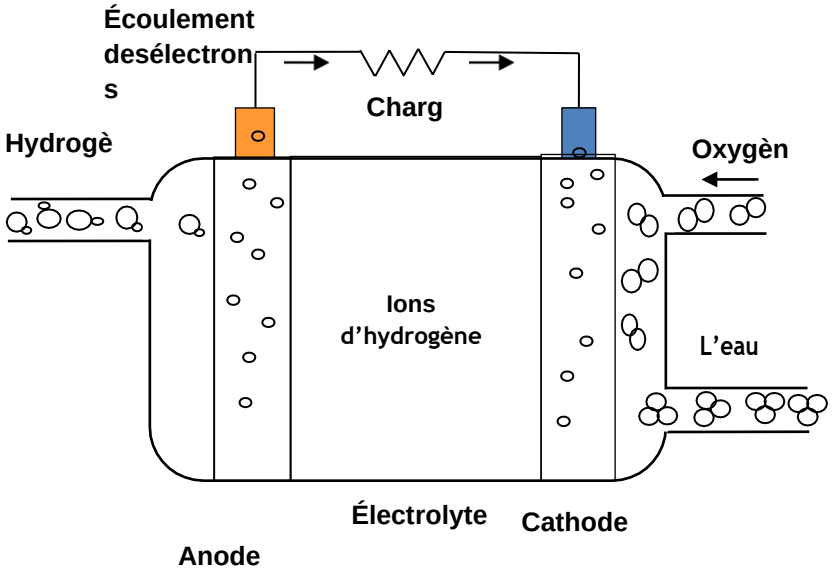



**Fig. (2.11)** Principe de la pile à combustible à acide phosphorique.

## 2.7.3.La pile à combustible à carbonates fondus MCFC (Molten Carbonate FuelCell)

Dans une pile à combustible à carbonates fondus l'électrolyte est un mélange eutectique de carbonate ($X_2CO_3$, avec X = K, Na et Li) fondu à haute température (500-750°C) qui transporte l'oxygène de la cathode à l'anode sous forme $CO_3^{-2}$, à l'aide du gaz carbonique présent dans le comburant. Les demi-réactions s'écrivent donc ainsi, sur catalyseurs non nobles :

À la cathode :

$$CO_2 + \frac{1}{2}O_2 + 2e^- \rightarrow CO_3^{-2} \qquad (2.12)$$

À l'anode :

$$CO_3^{-2} + H_2 \rightarrow CO_2 + HO_2 + 2e^- (2.13)$$

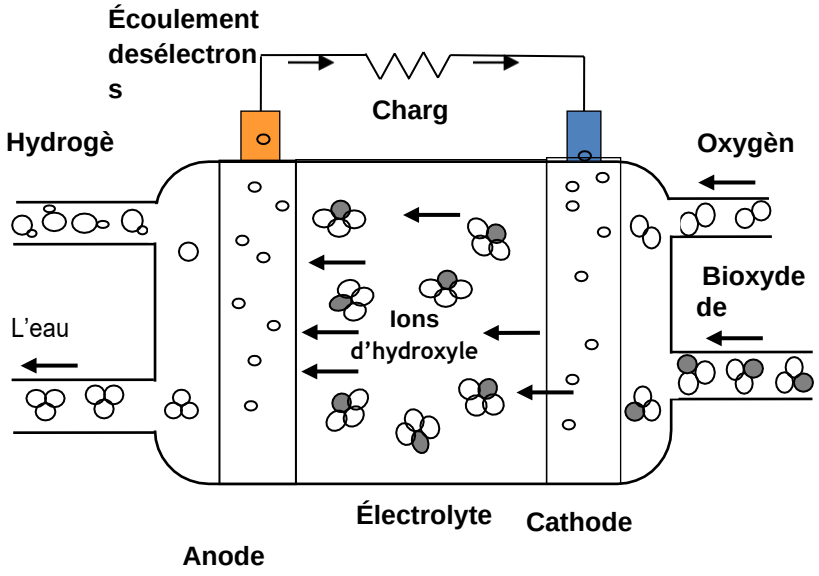



**Fig. (2.12)** Principe de la pile à combustible MCFC.

Ce type de pile a pour principal avantage, en plus du reformage interne, un rendement technologique, calculé en tenant compte du système entier, assez élevé (54%).En plus des remarques générales évoquées en introduction de cette partie, les inconvénients principaux sont une instabilité de l'électrolyte, qui est très corrosif, ce qui peut entraîner une durée de fonctionnement abrégée (quelques milliersd'heures).

### 2.7.4.La pile à combustible à oxyde solide SOFC (Solid oxide fuelcells)

Les piles de type SOFC actuelles fonctionnent de façon optimale à très haut température (850 à 1000 °C), dans ce type de pile à combustible, ce sont les ions $O^{-2}$ qui circulent dans l'électrolyte voir la (figure 2.13)

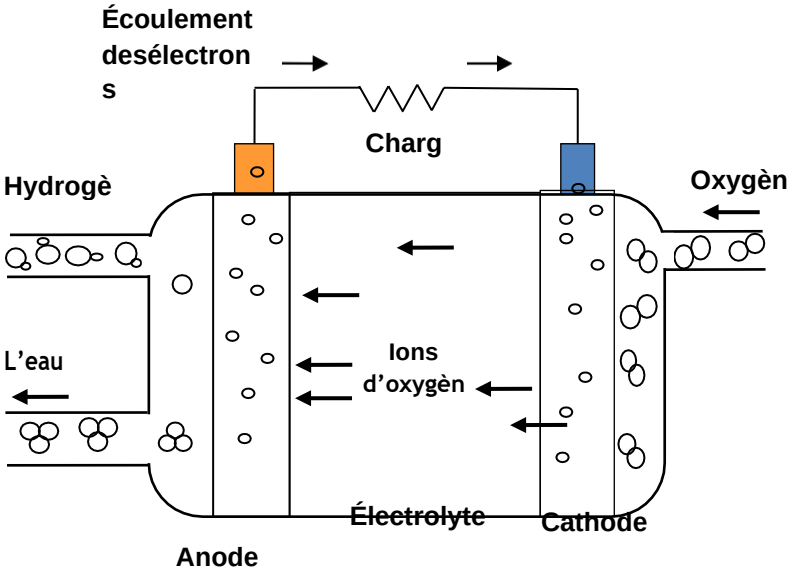



**Fig. (2.13)** Principe de la pile à combustible SOFC.

En circuit ouvert, la tension délivrée par une pile à combustible de type SOFC (solidoxide fuel cell) est dépendante, entre autres, de la température de fonctionnement, de la pression et du rapport des pressions partielles d'oxygène aux électrodes.

Les demi-réactions s'écrivent donc ainsi :

À la cathode :

$$\frac{1}{2}O_2 + e^- \rightarrow O^{-2} \tag{2.14}$$

À l'anode :

$$H_2 + O^{-2} \rightarrow H_2O + 2e \tag{2.15}$$

## 2.8.Caractéristiques de technologie des pilesàcombustible

### 2.8.1.Densité decourant

La réaction électrochimique étant des réactions de surface, la densité de courant est donc une grandeur caractéristique d'une pile à combustible. Elle est exprimée en ampères par centimètre carré (ramenée à la surface physique de l'électrode).

Elle est fonction de nombreux paramètres (type de pile à combustible, débit de combustible, ect).

### 2.8.2Tension réelle

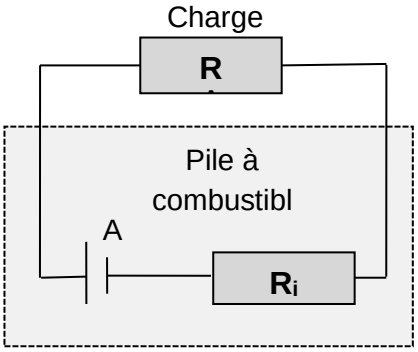



**Fig. (2.14)** Equivalent électrique d'une pile à combustible.

La tension théorique est celle d'une pile à combustible en circuit ouvert ne débitant pas. Lorsque l'on relie les bornes de la pile à combustible à la charge, elle sera traversée par un courant d'intensité i, la tension aux bornes de la pile diminue par rapport à la tension théorique suite aux phénomènes de polarisation dont on distingue trois formes : **Polarisation d'activation** qui concerne la diffusion des ions à l'interface électrode /électrolyte (transfert de charges) ; **polarisation de résistance** qui est la résultante de la résistance électrique des différents éléments de la pile et surtout de l'électrolyte

**polarisation de concentration** qui dépend de la concentration de l'électrolyte autour des électrodes. Les trois différentes zones illustres dans la figure (2.15).

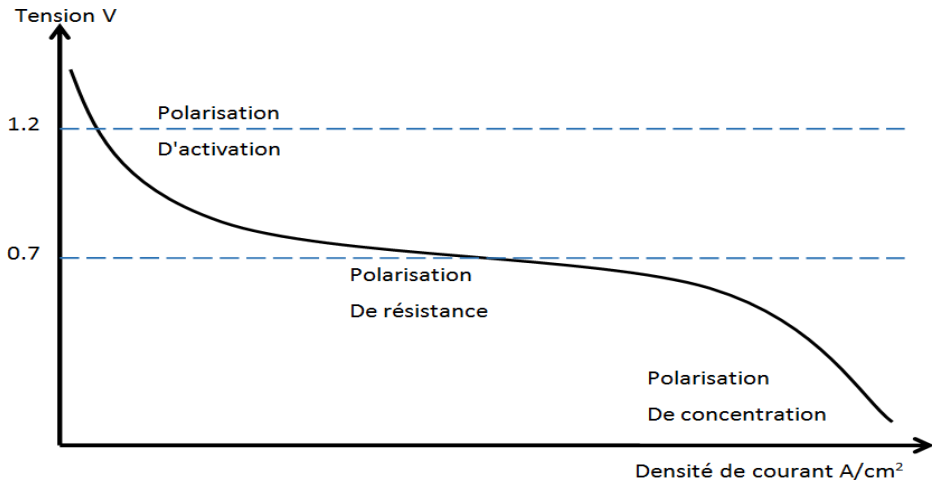



**Fig.(2.15)** Influence de la polarisation sur la tension.

La courbe [tension]/ [densité de courant] caractérise une pile à combustible.

## 2.8.3.Récapitulatif des différentes technologies des piles àcombustible

**Tab. (2.01)** Tableau récapitulatif des différentes technologies de piles à combustible

| *Description* | *Électrolyte* | *Gaz à l'anode* | *Gaz à la cathode* | *Gamme de puissance* | *Température de fonctionnement* | *Rendement électrique* | *Domaine D'application* |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **AFC** ***Alcaline Fuel Cell*** | Hydroxyde de potassium | Hydrogène | Oxygène | 10 à 100 KW | De 60 à 90 °C | Stack 60 à 70% | Portable, Transport |
| **PEMFC** ***Proton Exchange Membrane FuelCell*** | Membrane Polymère | Hydrogène | Oxygène | 0,1 à 500 KW | De 70 à 200 °C | Stack 50 à 70% | Portable, Transport, Stationnaire |
| **DMFC** ***Direct Méthanol Fuel Cell*** | Membrane Polymère | Hydrogène | Oxygène | Du mW à 100 KW | De 90 à 120 °C | Stack 20 à 30% | Transport, Stationnaire |
| **PAFC** ***Phosphoric Acid Fuel Cell*** | Acide Phosphorique | Hydrogène | Oxygène | Jusqu'à 10 MW | ~ 200 °C | Stack 55 % | Transport, Stationnaire |
| **MCFC** ***MoltenCarbonate Fuel Cell*** | Carbonate de Métaux alcalins | Hydrogène méthane, gaz de synthèse | Oxygène | Jusqu'à 100 MW | ~ 650 °C | Stack 55 % | Stationnaire |
| **SOFC** ***Solid OxideFuel Cell*** | Céramique | Hydrogène méthane, gaz de synthèse | Oxygène | Jusqu'à 100 MW | De 800 à 1050 °C | Stack 60 à 65% | Stationnaire |

## 2.9.Dimensionnement d'unstack

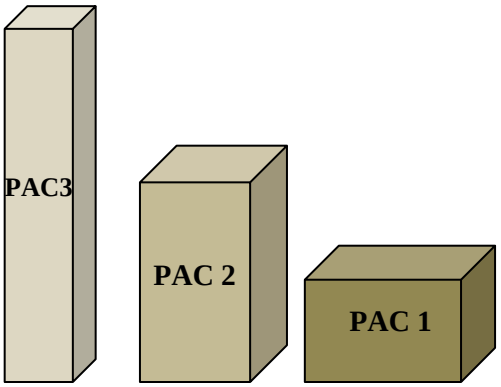
Pour concevoir la pile à combustible correspondant au cahier des charges d'un projet donné, le concepteur dispose de deux degrés de liberté :

• Le nombre **N** de cellules mises en série qui fixe la tension dustack.

• La surface **S** d'une cellule qui fixe le courant du stack.

Le tableau(III.02) illustre cette notion de modularité dans la conception d'un stack.

**Tab. (III.02)** Modularité d'un stack : 3 exemples de conception d'une PAC PEM de 5 kW.




| | Nombre de cellules en série | Tension nominale | Tension à vide | Courant nominal |
|---|---|---|---|---|
| PAC 1 | 100 | 70V | 100V | 70A |
| PAC 2 | 35 | 25V | 35V | 200A |
| PAC 3 | 14 | 10V | 14V | 500A |

## 2.10.Les avantages et les inconvénients de la pile àcombustible

Dans la mesure où il est produit de façon écologique, par exemple par électrolyse de l'eau (en supposant que l'électricité est elle aussi produite par des énergies renouvelables), le dihydrogène est un combustible « propre ». Lors de son utilisation, il n'entraîne que le rejet de vapeur d'eau, évitant ainsi tout production de gaz carbonés comme le Monoxyde de carbone (CO) ou encore le dioxyde de carbone (CO2), des gaz en partie responsables du réchauffement climatique.

- L'Hydrogène est une énergie inépuisable : c'est l'élément le plus présent dans l'univers. Malgré que l'on ne trouve que très peu de dihydrogène (H2) sur Terre, il est possible de le produire à partir d'autres sources comme l'eau, les hydrocarbures et autres matières organiques puisque l'hydrogène est présent dans de nombreux composés terrestres. Cette énergie ne présente donc pas l'inconvénient d'être « fossile » contrairement au pétrole parexemple.
- Les rendements du dihydrogène sont presque trois fois supérieurs à celui de l'essence. En effet, 1 Kg de dihydrogène permet de produire autant d'énergie que 2,75 Kgd'essence.

- Les voitures utilisant une pile à combustible (ou plus précisément une pile à hydrogène) sont beaucoup plus silencieuses que celles utilisant un moteur à explosions. L'utilisation de ces piles à hydrogène pourrait donc constituer une alternative durable aux pollutions sonores engendrées par les transports dans les villes.

- Cependant, la pile à combustible a aussi un gros inconvénient. L'hydrogène n'existe pas à l'état naturel sur notre planète. C'est- à-dire que contrairement aux carburants fossiles, l'hydrogène ne peut pas être extrait mais doit être produit. Bien entendu la production d'hydrogène nécessite del'énergie.
- Le dihydrogène est un gaz très inflammable et explosif. Plus le dihydrogène (combustible) et le dioxygène (comburant) se trouvent dans les proportions stœchiométriques (deux molécules de dihydrogène pour une molécule de dioxygène), plus cette explosion n'est intense. C'est notamment ce problème d'inflammabilité qui a donné mauvaise réputation à l'hydrogène. En effet, en 1937, le Zeppelin Hindenburg, un dirigeable allemand gonflé au dihydrogène s'était enflammée provoquant la mort de 37 passagers. Il faut donc produire des réservoirs de dihydrogène assez étanches pour éviter toute fuite, bien qu'en cas d'accident, ceux-ci doivent laisser s'échapper rapidement le gaz (plus léger que l'air) pour éviter tout risqued'explosion.
- La pile à combustible permettant de produire de l'électricité à partir de dihydrogène contient du platine, un métal rare et très cher, utilisé ici comme catalyseur. Il faut donc tenter de remplacer ce platine par un autre métal moins coûteux. Aujourd'hui, il semblerait que l'alternative la plus prometteuse soit l'utilisation de palladium, un métal parfois utilisé comme catalyseur pour l'industrie chimique en remplacement du platine. Il permettrait ainsi de réduire de 25 % le coût de la pile àcombustible.

- Le Prix très élevé (à cause des matériaux qui la compose) par exemple Catalyseur composé en platine, ces membranes et ces plaques d'interconnexion.

## 2.11.Les applications des piles à combustibles

Comme cela a été souligné, la forte modularité de la PAC introduit un vaste champ d'applications potentielles. On distingue trois grands types d'applications :

- Portables (de quelques milliwatts à quelqueskilowatts),
- Transport (de la dizaine à quelques centaines dekilowatts),

- Stationnaires (de quelques centaines de kilowatts aumégawatt).

## 2.11.1.Applications portables

Dans cette famille, on inclut essentiellement la téléphonie mobile (100 mW-1 W), l'ordinateur portable (30-50 W) ainsi que les générateurs autonomes portables (500 W-2 kW). Les deux premières applications connaissent actuellement une très forte croissance, mais sont de plus en plus handicapées par l'autonomie de leur batterie, même les plus performantes au Lithium Ion. Ces dernières atteignent aujourd'hui une énergie spécifique de l'ordre de 140 W/kg, qui n'augmentera plus significativement . La pile à combustible est plus intéressante que les batteries actuelles compte tenu de son autonomie, mais aussi parce qu'aucun système de recharge n'est requis. L'autonomie ne sera alors limitée que par la taille du réservoir d'hydrogène ou de méthanol. La technologie privilégiée pour cette application est la filière PEMFC du fait notamment de sa faible température de fonctionnement (60 à100°C).



**Fig. (2.16)** Pile à combustible au méthanol Toshiba (2004), autonomie = 20h, poids = 900g.

## 2.11.2.Applications de typetransport

Historiquement, les premières PAC furent développées dans ce contexte, notamment par la NASA mais aussi dans les sous-marins de l'US Navy. C'est actuellement la voie qui engage le plus de moyens techniques et financiers sous l'importante pression des pouvoirs publics. La cible privilégiée de cette application concerne les véhicules particuliers dont le marché mondial croît d'environ 2,5% par ans.

Parmi les produits les plus aboutis, il convient de citer le projet Necar, fruit de la collaboration entre les firmes Daimler-Benz et Ballard. Basée sur une architecture de

Mercedes Classe A, la voiture fonctionne au méthanol, l'hydrogène étant produit par reformage. La PAC de 75 kW (100 Ch. DIN) autorise 600 kilomètres d'autonomie à une vitesse de 150 km/heure. Tous ces constructeurs prévoient des préséries à partir de 2004-2005 : Ford (FCV), Opel (Zafira HydroGen3), Honda (FCX)

Malgré l'existence de plusieurs prototypes présentés avec de l'hydrogène stocké à bord (sous forme liquide, gazeuse ou absorbé dans un hydrure), le combustible utilisé sera très probablement, pour des raisons de sûreté, de réglementation et de logistique de distribution, un combustible liquide de type méthanol alimentant un reformeur embarqué.




**Fig. (2.17)** L'utilisation de la pile à combustible aux transports.

## 2.11.3.Applicationsstationnaires

Les piles à combustibles peuvent constituer d'excellentes sources d'énergie délocalisées. Compte tenu des nouvelles lois sur la déréglementation et des tendances vers la décentralisation de la production électrique, ce secteur commence à intéresser de nombreux industriels. Les applications stationnaires mettant en jeu un apport exclusif d'électricité ou un processus de cogénération constituent l'une des alternatives les plus commercialement prometteuses et scientifiquement matures. Le marché stationnaire décentralisé est relativement vaste puisqu'il englobe conjointement :

- Les applications domestiques pour un particulier ou un secteur résidentiel avec chauffagecollectif,
- Les applications industrielles en moyenne industrie ou pour desPME,
- Le secteur tertiaire pour des bâtiments spécifiques type administrations, hôpitaux, piscines...

Ainsi, depuis quelques années, de nombreuses piles de faible puissance (quelques kW) sont apparues et ont été placées en test dans des habitations, des sites isolés et des bâtiments administratifs. Parallèlement, d'autres prototypes de moyenne puissance utilisés en mode de cogénération (quelques centaines de kW) ont été installés aux USA,

au Japon et en Europe. Les unités d'une puissance supérieure à 1 MW restent encore rares à l'heure actuelle, ce qui restreint l'impact des piles à combustible sur la production centralisée. Cependant, les coûts sont encore bien trop élevés pour que les piles puissent actuellement avoir une pénétration conséquente dans le marché stationnaire. Les coûts d'investissement se situent entre 3500 et 10000 €/kW (pile, auxiliaires et production d'hydrogène) alors que le seuil financier pour que la filière devienne concurrentielle est d'environ 1000€/kW.



**Fig. (2.18)** Pile MCFC 250 kW baptisée CELLIA et mise en place par Dalkia dans un HLM à Paris.

## Conclusion

Malgré que l'on n'utilise pas son potentiel à 100% la pile à combustible grâce à ses nombreux atouts ne peut que se développer au fil du temps. Le champ d'applications vaste, s'appuyant sur un procédé électrochimique simple, elle est surtout portée par l'espoir que suscite l'hydrogène. Car, il est élément le plus abondant sur Terre, son exploitation au moyen de la pile à combustible présente de nombreux avantages, notamment celui non négligeable de ne rejeter que de l'eau pure et être ainsi un générateur totalement propre.

La pile à combustible est capable d'alimenter tout type de secteur en énergie. Nous pouvons la retrouver aussi bien dans le secteur automobile, dans les téléphones, les ordinateurs que dans l'application stationnaire ou encore le domaine spatial en ferait un enjeu incontournable. Et c'est probablement ce qui finira par arriver, car la pile à combustible peut alimenter tous ces secteurs, affichant un excellent rendement énergétique, sans utiliser le moindre combustible fossile. Energie dite « durable », elle permettrait de se sortir de la dépendance vis-à-vis du pétrole.

# CHAPITRE III
# *Modélisation de pile à combustible*

# Introduction :

Dans ce chapitre nous allons étudier les caractéristiques dynamiques du système de traction électrique constitué de la pile à combustible PEMFC et le moteur asynchrone. Qui feront l'objet de la modélisation et de la commande d'un véhicule électrique à pile à combustible, ainsi qu'une démarche pour réalisation des simulations globales sur un parcours choisi.

Comme nous avons pu le constater dans le premier chapitre, le générateur à pile à combustible est un système complexe qui est composé de plusieurs actionneurs et sous systèmes. L'utilisation de cette source d'énergie ne peut se faire sans la mise en place de commandes appropriées.

## 3.1.Modèle dynamique de la pile à combustible PEMFC :

Comme nous avons illustré dans le chapitre précèdent, le model dynamique de la pile est représentée dans la figure 4.1

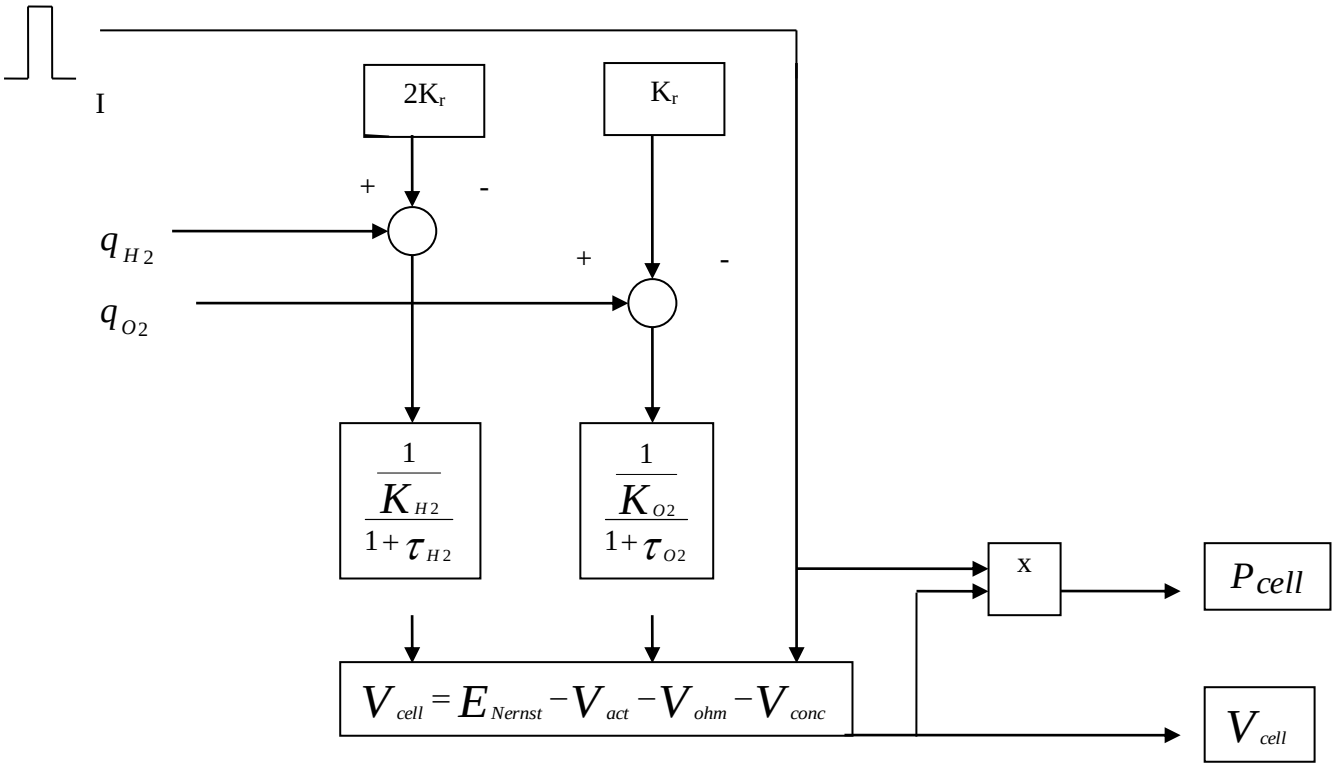



**Figure (3.1)** : Modèle dynamique de la pile à combustible PEMFC.

Les paramètres du modèle sont :

- $q_{H_2}$ : Le débit molaire de l'hydrogène entrant, il est en (Kmol/s).
- $q_{O_2}$ :Le débit molaire de l'oxygène entrant, il est en (Kmol/s).

- $P_{H_2}$ : La pression partielle de l'hydrogène, elle est en (atm)
- $P_{O_2}$ : La pression partielle de l'oxygène, elle est en (atm).
- $K_{H_2}$ : Constant molaire du modèle de l'hydrogène, il est en (Kmol/atm.s).
- $K_{O_2}$ : Constant molaire du modèle de l'oxygène, il est en (Kmol/atm.s).
- $N_0$: Numéro des cellules élémentaires de la pile.
- I: Le courant de pile, il est en (A).
- F : Le constant de Faraday, il est en (C/Kmol).
- T : La température, elle est en (K).
- $\tau_{H_2}$ : Le constant de temps de l'hydrogène, il est en (s).
- $\tau_{O2}$: Le constant de temps de l'oxygène, il est en (s).
- $V_{cell}$: La tension de sortie de la pile (continue), elle est en (V).

Les valeurs des constantes physiques utilisées dans la simulation de la pile [PEMFC] sont données dans le tableau (3.3)

| Paramètres | Valeurs |
|---|---|
| T | 343K |
| F | 9684600 C/Kmol |
| R | 8314.47 j/Kmol.K |
| $r_{H-O}$ | 1.168 |
| $K_r$ | $0.996*10^{-6}$Kmol/ (s.A) |
| $K_{H_2}$ | $4.22*10^{-5}$Kmol/ (s.A) |
| $k_{O_2}$ | $2.11*10^{-5}$Kmol/(s.atm) |
| $\tau_{H_2}$ | 3.37 (s) |
| $\tau_{O_2}$ | 6.74 (s) |

**Tableau (3.1)** : Tableau des paramètres.

## 3.2. Modélisation des convertisseurs :

Notre modèle contient en plus de la pile à combustible, un hacheur parallèle (boost) et un onduleur commandés par MLI (modulation de largeur d'impulsion).

### 3.2.1. Hacheur élévateur de tension (BOOST) :

Nous mettrons une inductance de valeur suffisante pour que le courant ne s'annule pas et une capacité de forte valeur pour avoir la tension de sortie Vs constante.

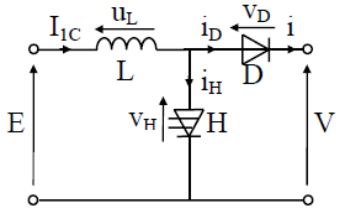



**Figure (3.2)** : montage de l'hacheur parallèle.

Pour obtenir les courbes de la figure (3.3), on envisage successivement les deux états possibles de l'interrupteur H

**a) H passant**

Dans ce cas, $V_H = 0$ et $V_D = -V_C$, ce qui maintient D bloquée par inversion de tension. Par ailleurs, on a $U_L = E$ et $i_H = I_{1C}$.

**b) H bloqué**

D conduit par effet de roue libre. Il s'ensuit que $i_D = i = I_{1C}$, $V_H = V_C$ et $U_L = E - V_C$.

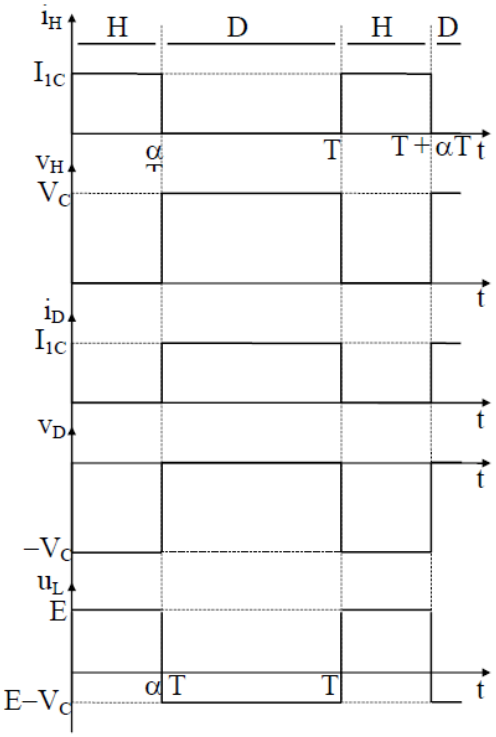



**Figure (3.3)** : l'allure des tensions et des courants au niveau de l'hacheur

La valeur moyenne de la tension de sortie est constante, sa valeur moyenne est aussi égale à sa valeur instantanée VC. Il suffit donc de déterminer la relation liant VC à E. Pour l'obtenir, on peut utiliser le fait que la valeur moyenne de $U_L$ est nulle. Ceci entraîne que

$$\frac{1}{T}\int_0^{\alpha T} E dt + \frac{1}{T}\int_{\alpha T}^{T} (E - V_C) dt = 0$$

On en déduit $\frac{1}{T} E\alpha T + \frac{1}{T}(E - V_C)(T - \alpha T) = 0$,

Soit $E\alpha + E(1-\alpha) - V_C(1-\alpha) = 0$ ,

D'où finalement

$$V_C = \frac{E}{1-\alpha} \qquad (3.1)$$

## 3.2.2. L'onduleur de tension:

L'onduleur est un convertisseur statique assurant la conversion continue - alternative. Chaque bras de l'onduleur est constitué de deux transistors shuntés en antiparallèle par des diodes de récupération permettant de renvoyer le courant négatif vers le condensateur de filtrage mis à l'entrée de l'onduleur.

A fin d'élaborer un modèle de fonctionnement de l'onduleur chaque pair de diode – transistor est représentée par un interrupteur Si comme le montre la figure (4.4).

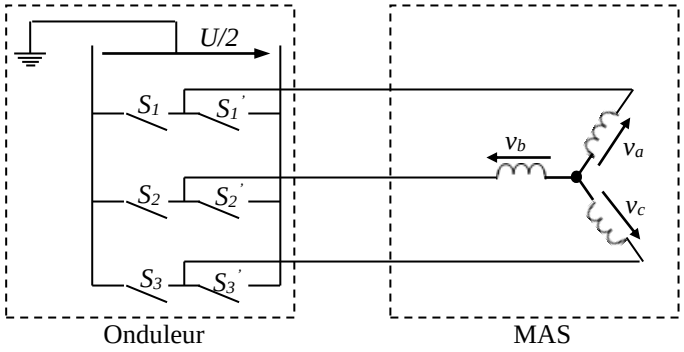



**Figure (3.4) :** représentation simplifier de l'onduleur

On attribue à chaque interrupteur de l'onduleur une fonction logique de connexion Fi. Cette fonction décrit l'état de l'interrupteur, sa valeur vaut 0 s'il est ouvert et 1 s'il est fermé.

Ainsi les tension de ligne aiguillées par l'onduleur sont données par :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{1}{3} U_{dc} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

Le courant à l'entrée de l'onduleur est donné par l'équation suivante :

$$i_e = [F][I] = F_1\, i_a + F_2\, i_b + F_3\, i_5 \quad (3.3)$$

**Commande par MLI** :

La stratégie de la commande MLI est basée sur la comparaison des trois signaux (tensions) $Va$, $V_b$ et $V_c$ avec un signal triangulaire (souvent appeléporteuse) ayant une amplitude $V_P$et une fréquence de porteuses $f_P$.

Le schéma de principe de cette logique de contrôle est illustré par la figure (3.5)

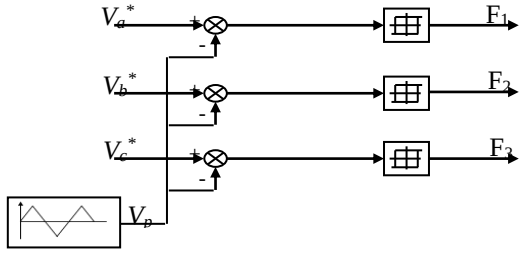
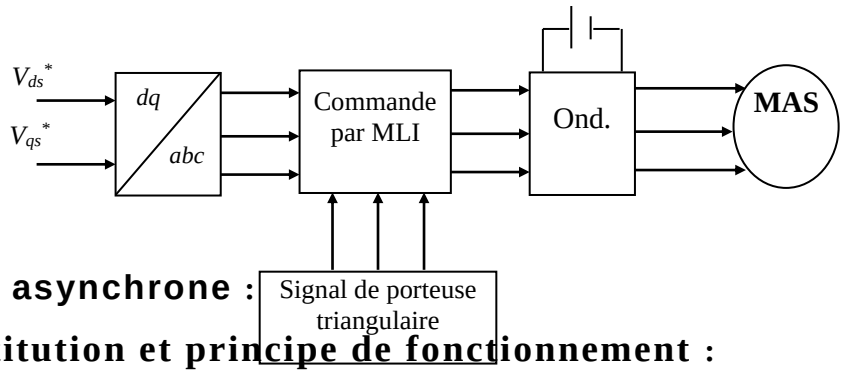



**Figure (3.5) :** Principe de commande de l'onduleur par MLI

L'association de l'onduleur àcommande MLI avec la MAS est schématisée par la figure(4.6),les tensions de référence sont calculées par une transformation de coordonnées.




**Figure(3.6) :** Association de l'onduleur à hystérésis avec la MAS

## 3.3. La machine asynchrone :

### 3.3.1 Constitution et principe de fonctionnement :

#### *3.3.1.1. Définition* :

La machine asynchrone est une machine à courant alternatif appelée aussi machine à induction, utilisée le plus souvent comme moteur, et caractérisée par le fait que son rotor ne tourne pas à la même vitesse que le champ tournant dans l'entrefer qui est la vitesse de synchronisme, d'où le nom asynchrone.

#### *3.3.1.2. Constitution* :

Elle comporte un inducteur fixe nommé stator et un induit mobile nommé rotor, c'est un transformateur à champ tournant dont le primaire et le stator et dont le secondaire mis en court-circuit et libre de tourner est le rotor.

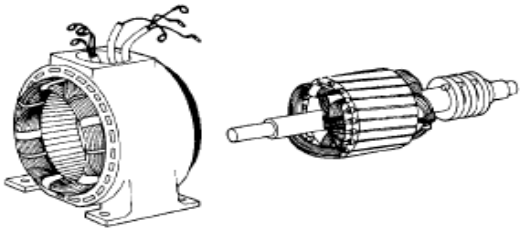
**a) Stator**

Elle est constituée par une couronne de tôles minces empilées, cette couronne est serrée dans une carcasse, et des encoches contiennent un enroulement triphasé

**b) Rotor**

C'est un cylindre fait de tôles empilées clavetées sur l'arbre du moteur, des encoches sont percées dans les tôles de la surface extérieur du cylindre, des conducteur passent dans ces encoches, il sont réunis en court-circuit, l'ensemble forme un bobinage polyphasés ayant le même nombre de pôles que le stator. Il y a deux types de structure électrique pour le rotor.

**-à bagues** :où Les trois phases sont reliées à la boite à bornes par l'intermédiaire de bagues collectrices (Figure (3.7)).



**Figure(3.7) :** Machine asynchrone à

**-à cage d'écureuil**où chaque encoche comporte une barre Fig.3.8.

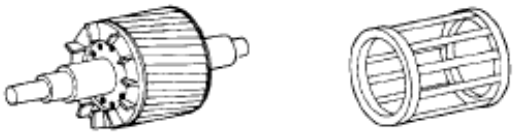


**Figure 3.8** rotor d'une machine asynchrone à cage

### *3.3.1.3. Principe de fonctionnement* :

Le fonctionnement de la machine asynchrone est basé sur le principe d'interaction électromagnétique ; le stator est alimenté par un courant triphasé de fréquence f, ce qui donne naissance à un champ tournant dans l'entrefer à la vitesse angulaire$w_s$, tel que

$$w_s = \frac{2.\pi.f}{P} \quad [rad/s] \tag{3.4}$$

Avec :

$P$ : nombre de paire de pôles.

Cette vitesse est appelée vitesse de synchronisme. Les bobines du rotor sont le siège de f.e.m induites. Comme le rotor est court-circuité ; l'interaction entre ce courant et le champ glissant va donner naissance à des forces s'exerçant sur les brins du rotor dont le moment par rapport à l'axe de rotation constituera le couple de la machine. On note que ce couple n'existe que si la f.e.m est non nulle ; le rotor ne doit pas tourner au synchronisme pour qu'il y ait couple d'où le nom de machine asynchrone.

Conformément à la loi de Lenz, le sens de rotation est le même que celui du champ tournant pour que la vitesse relative du champ par rapport au rotor diminue. Un couple agit sur le rotor aussi long temps que le dernier est le siège de courant induit donc aussi long temps qu'il ne tourne pas à la même vitesse de synchronisme [1, 2,].

Le glissement g est défini comme étant l'écart relatif de vitesse entre le rotor est le champ tournant

$$g = \frac{w_s - w_m}{w_s} \tag{3.5}$$

Avec :

$w_m$ : La vitesse angulaire du rotor.

La valeur de la vitesse relative du champ tournant par rapport au rotor est :

$$w_g = w_s - w_m = g.w_s \tag{3.6}$$

Par suite la fréquence des f.m.m est des courants induits au rotor vaut :

$$f_{_R} = \frac{P(w_s - w_m)}{2.\pi}.g = g.f \tag{3.7}$$

Notons l'existence d'une réaction d'induit ; en effet les courants induits dans le rotor créeront aussi un champ tournant dans l'entrefer.

La vitesse relative de cette réaction d'induit par rapport au rotor est :

$$w_g = \frac{2.\pi.f_R}{P} = \frac{2.\pi.f}{P}.g = g.w_s \tag{3.8}$$

La vitesse du rotor est :

$$w_m = (1-g)w_s \tag{3.9}$$

### *3.3.1.4. Caractéristiques mécaniques* :

Le schéma équivalent de la MAS par phase est présenté par la figure (4.9), les équations qui régissent le système peuvent s'écrire comme suit [1, 3] :

$$V_s = R_s \cdot I_s + jL_s \cdot w_s \cdot I_s + jL_m \cdot w_s \cdot I_r \tag{3.10}$$

$$V_r = (R_r / g) \cdot I_r + jL_r \cdot w_s \cdot I_s + jL_m \cdot w_s \cdot I_s = 0 \tag{3.11}$$

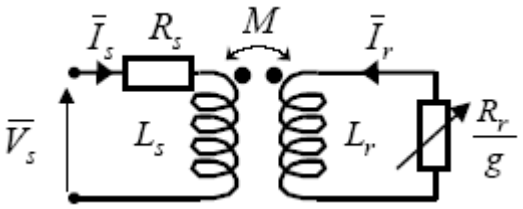



**Figure (3.9) :** Schéma par phase en régime permanent

On peut ramener ce schéma au stator avec les fuites magnétiques totalisées au rotor ( $N_r \cdot w_s$) (figure 3.10). Pour ce faire on pose :

$$N_r = L_r\sigma = L_r - \frac{L_m^2}{L_s}, N_r^{'} = N_r\left(\frac{L_s}{L_m}\right)^2,\ R_r^{'} = R_r\left(\frac{L_m}{L_s}\right)^2\ \bar{I}_r^{'} = \bar{I}_r\left(\frac{L_m}{L_s}\right)$$

On obtient donc les équations du schéma de la figure (3.10).

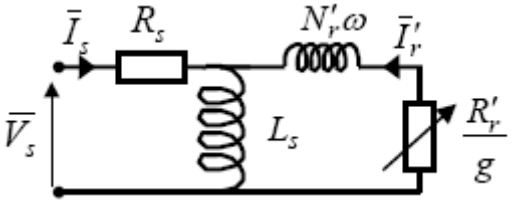



**Figure (4.10) :**Schéma équivalent au stator avec les fuites magnétiques totalisées au rotor

Si l'on écrit le couple en régime permanent de la machine asynchrone on a :

$$C_{em} = \frac{P_{em}}{\Omega} = 3\frac{P}{w_s}.\frac{R_r^{'}}{g}.I_r^{'2} \tag{3.12}$$

$$I_r^{'} = \frac{V_s - R_s.I_s}{\frac{R_r^{'}}{g} + jN_r^{'}ws} \tag{3.13}$$

Si on néglige la résistance statorique on a :

$$I_r^{'2} = \frac{V_s^2}{\left(\frac{R_r^{'}}{g}\right)^2 + \left(N_r^{'}ws\right)^2} \tag{3.14}$$

Donc le couple électromagnétique devient :

$$C_{em} = 3\frac{P}{w_s}.V_s^2 \frac{\frac{R_r^{'}}{g}}{\left(\frac{R_r^{'}}{g}\right)^2 + \left(N_r^{'}ws\right)^2} \tag{3.15}$$

La caractéristique mécanique est le graphe de la fonction Cem=f (n), figure (3.11). Le diagramme de cercle nous a permis de construire la courbe$C_{em}$=f $(g)$, figure (3.12).

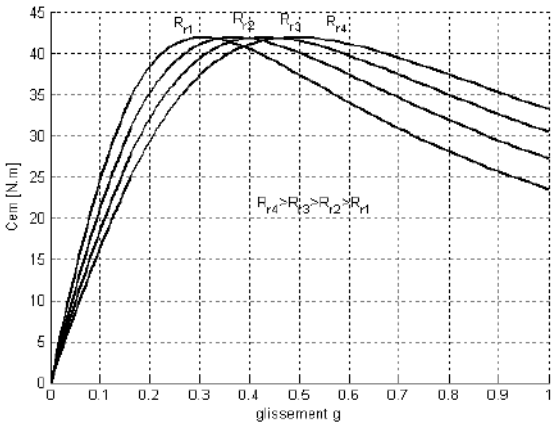



**Figure (3.11) :** couple électromagnétique en fonction du glissement

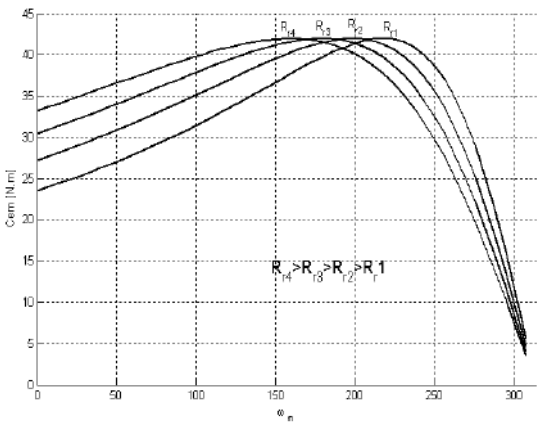



**Figure (3.12)** : couple électromagnétique en fonction de la vitesse de rotation

- $g = 1 \Rightarrow n = n_s(1-g) = 0 \Rightarrow$ Couple de démarrage
- $g = g_m \Rightarrow n = n_m \Rightarrow$ Couple maximal
- $g = g_n \Rightarrow n = n_n \Rightarrow$ Couple nominal
- $g = 0 \Rightarrow n = n_s \Rightarrow Ce_{ml} = 0$

### *3.3.1.4.1. Représentation schématique* :

Les trois enroulements statoriques (S1, S2, S3) et rotoriques (R1, R2, R3) peuvent être représentés schématiquement selon leurs axes magnétiques dans la figure (3.13).

On définit aussi les deux axes perpendiculaire direct d et en quadrature q.

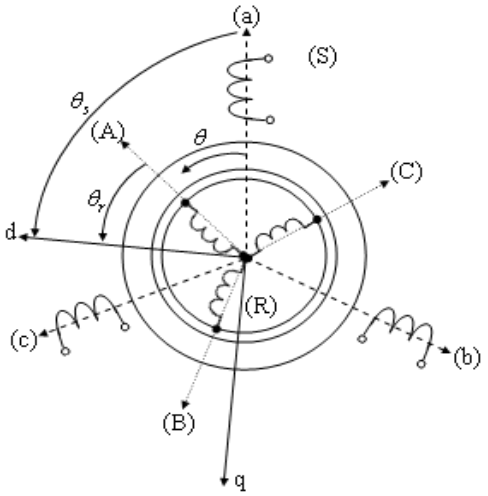



**Figure (3.13) :** Représentation schématique du circuit rotoriques et statorique d'une machine asynchrone triphasée

A partir de ce schéma, on détermine les angles de position statorique et rotoriques respectivement $\theta_s$ et $\theta_r$ par rapport à l'axe direct d et l'angle $\theta$ qui caractérise l'écart ou la position du rotor par rapport au stator.

## 3.3.2. Modélisation de la machine asynchrone :

Modéliser consiste à mettre en équations les différents paramètres d'un système. A l'issue de cette opération on se trouve face au problème suivant :

Plus le modèle se rapproche de la réalité qu'on ne pourra jamais atteindre, plus il devient complexe et demande un moyen de calcul très important, par contre si le système est simplifié, les calcules deviennent faciles mais on s'éloigne de la réalité, un choix judicieux consiste à idéaliser la machine et par conséquent garder les phénomènes les plus important et négliger les phénomènes secondaires.

### *3.3.2.1. Equations électriques de la machine asynchrone* :

On applique la loi des mailles pour les trois phases du stator et du rotor.

Pour le stator on a :

$$[v_{abc}] = R_s[i_{abc}] + \frac{d}{dt}[\phi_{abc}] \qquad (3.16)$$

De même pour le rotor

$$[v_{ABC}] = R_R[i_{ABC}] + \frac{d}{dt}[\phi_{ABC}] \qquad (3.17)$$

Les vecteurs de tension de courant et de flux sont donnés par la forme suivante :

$$[v_{abc}] = \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad [\mathrm{i}_{abc}] = \begin{bmatrix} \mathrm{i}_a \\ \mathrm{i}_b \\ \mathrm{i}_c \end{bmatrix} \quad [\phi_{abc}] = \begin{bmatrix} \phi_a \\ \phi_b \\ \phi_c \end{bmatrix}$$

On définit de même, par changement d'indices, les vecteurs rotoriques $[v_{ABC}]$, $[\phi_{ABC}]$ et, $[i_{ABC}]$

### *3.3.2.2. Equations magnétiques* :

$$[\phi_{abc}] = [L_s].[i_{abc}] + [L_m][i_{ABC}] \qquad (3.18)$$

$$[\phi_{ABC}] = [L_r].[i_{ABC}] + [L_m]^t[i_{abc}] \qquad (3.19)$$

$[L_s]$, $[L_r]$: matrices d'inductances statoriques et rotoriques

$[L_m]$ : matrices des inductances mutuelles stator rotor

En tenant compte de l'hypothèse citée précédemment et à cause de la symétrie de la machine les inductances propres des phases seront constantes et égales, et les inductances mutuelles seront fonction uniquement de la position angulaire $\theta$.

Les matrices inductances propres et la matrice mutuelle sont définies par :

$$[L_s]=\begin{bmatrix} L_{aa} & L_{ab} & L_{ab} \\ L_{ab} & L_{aa} & L_{ab} \\ L_{ab} & L_{ab} & L_{aa} \end{bmatrix} \quad ; \quad [Lr]=\begin{bmatrix} L_{AA} & L_{AB} & L_{AB} \\ L_{AB} & L_{AA} & L_{AB} \\ L_{AB} & L_{AB} & L_{AA} \end{bmatrix}$$

$$[L_m]=L_{aA}\begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta+\frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta-\frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta-\frac{2\pi}{3}\right) & \cos(\theta) & \cos\left(\theta+\frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta+\frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta-\frac{2\pi}{3}\right) & \cos(\theta) \end{bmatrix}$$

Avec :

- $L_{aa}$:L'inductance propre d'une phase statoriques.
- $L_{AA}$: L'inductance propre d'une phase rotoriques.
- $L_{ab}$ : L'inductance mutuelle entre deux phases statoriques.
- $L_{AB}$: L'inductance mutuelle entre deux phases rotoriques.
- $L_{aA}(\theta)$: L'inductance mutuelle entre une phase statoriques et une phase rotoriques.

En introduisant (3.18) et (3.19) dans (3.16) et (3.17), on obtient :

$$\begin{aligned} [v_{abc}] &= R_s[i_{abc}]+[L_s]\frac{d}{dt}[i_{abc}]+\frac{d}{dt}\{[L_m].[i_{ABC}]\} \\ [v_{ABC}] &= R_s[i_{ABC}]+[L_r]\frac{d}{dt}[i_{ABC}]+\frac{d}{dt}\{[L_m]_t.[i_{abc}]\} \end{aligned} \qquad (3.20)$$

### *3.3.2.3. Equation mécanique* :

Le fonctionnement de la MAS en charge est régi par l'équation fondamentale suivante :

$$J\frac{d\Omega}{dt}=C_{em}-C_r-f_c.\Omega \qquad (3.21)$$

Avec

- $J$ :moment d'induire de la partie tournante.
- $\Omega$ : vitesse mécanique de rotation (angulaire).
- $f_c$ : coefficient de frottement visqueux

- $C_r$ : couple résistant.
- $P$ : nombre de paires de pôle.

L'équation mécanique (4.22) peut s'écrire comme suit :

$$C_{em} - C_r = \frac{J}{P}\ \frac{dw_m}{dt} + \frac{f_c}{P}.w_m \qquad (3.22)$$

### *3.3.2.4. Référentiel pourquoi ?*

Le choix d'un référentiel a pour objectif de simplifier au maximum les expressions analytiques d'un système, dans le cas de la machine asynchrone trois types de référentiel sont utilisés en fonction du problème étudié .

**Référentiel lié au stator**

Utilisé dans le cas de l'étude des grandeurs rotoriques. Dans ce cas on pose $\frac{d\theta_s}{dt} = 0 \text{ et } \frac{d\theta_r}{dt} = -w_r$ .

**Référentiel lié au rotor**

Utilisé dans le cas de l'étude des grandeurs statorique. Dans ce cas on pose $\frac{d\theta_s}{dt} = w_s \text{ et } \frac{d\theta_r}{dt} = 0$.

**Référentiel lié au champ tournant**

Utilisé pour l'étude complète : où tous les paramètres sont pris en compte. Dans ce cas on pose $\frac{d\theta_s}{dt} = w_s$ et $\frac{d\theta_r}{dt} = w_s - w_m = g \cdot w_s$.

## 3.3.3. Transformation de Park :

La transformation de Park consiste à faire un changement de variable qui permet de passer d'un système triphasé à un système biphasé où les variables sont indépendantes les une par rapport aux autres, on faisant intervenir l'angle entre les axes magnétiques des enroulement et les axes d (direct) et q (quadrature).

La matrice de transformation est donnée par :

$$[A] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \sin\theta & \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \qquad (3.23)$$

Et la matrice de transformation inverse est :

$$[A]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

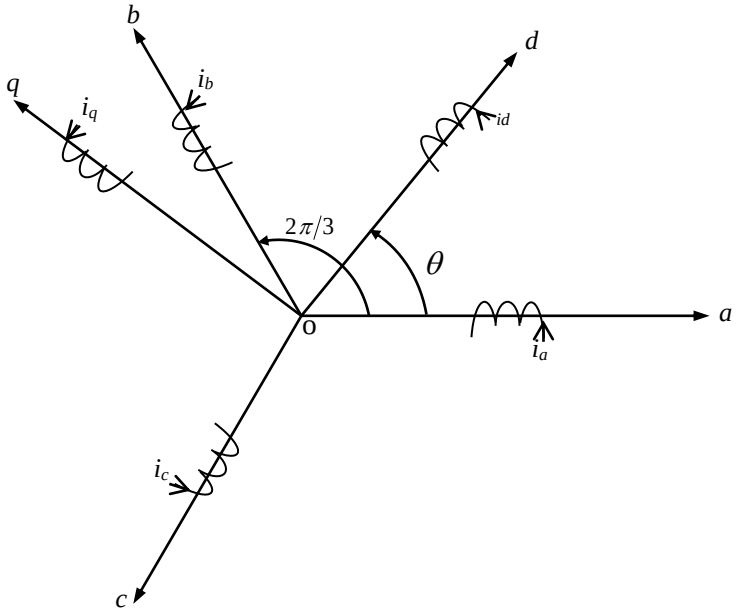



**Figure (3.14) :** système triphasé ($O_{abc}$) et diphasé ($O_{dq}$)

Posons :

$$[x_{dqo}] = \begin{bmatrix} x_d \\ x_q \\ x_o \end{bmatrix} \quad \text{et} \quad [x_{abc}] = \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} \quad (3.25)$$

Avec $x = (i, v, \phi)$

Soit [A] la matrice de transformation directe de telle sorte que :

$$[x_{dqo}] = [A].[x_{abc}] \quad (3.26)$$

La transformation inverse est définie par :

$$[x_{abc}] = [A]^{-1}[x_{dqo}] \quad (3.27)$$

### *3.3.3.1 Application de la transformation de Park à la MAS :*

Dans un repère lié au champ tournant et après application de la transformation de Park aux équations de flux, de courant et de la tension précédente on obtient après développement le système suivant :

**Equation de tension**

Soit l'équation de tension du stator sous forme matricielle suivante :

$$[v_{abc}] = [R_s][I_{abc}] + \frac{d}{dt}[\phi_{abc}] \quad (3.28)$$

Faisons le changement de variable, en multipliant les deux membres par [A] :

$$[A][v_{abc}] = [A][R_s][i_{abc}] + [A]\frac{d}{dt}[\phi_{abc}] \quad (3.29)$$

Dansun référentiel lié au champ tournant, on a :

$$v_{ds} = R_s\, i_{ds} + \frac{d\phi_{ds}}{dt} - w_s\, \phi_{qs} \quad (3.30)$$

$$v_{qs} = R_s\, i_{qs} + \frac{d\phi_{qs}}{dt} - w_s\, \phi_{ds} \quad (3.31)$$

$$v_{dr} = 0 = R_r\, i_{dr} + \frac{d\phi_{dr}}{dt} - w_g\, \phi_{qr} \quad (3.32)$$

$$v_{dr} = 0 = R_r i_{qr} + \frac{d\phi_{qs}}{dt} - w_g\, \phi_{dr} \quad (3.33)$$

Avec $w_g = w_s - w_m$

**a. Equation magnétique**

Soit l'équation magnétique du stator sous forme matricielle suivante :

$$[\phi_{abc}] = [L_s][I_{abc}] + [L_m][I_{ABC}] \quad (3.34)$$

Enmultipliant les deux membres par [A]

$$[A][\phi_{abc}] = [A][L_s][I_{abc}] + [A][L_m][I_{ABC}] \quad (3.35)$$

L'expression des flux statoriques prend la forme :

$$\phi_{ds} = L_s\, I_{ds} + L_m\, I_{dr} \quad (3.36)$$

$$\phi_{qs} = L_s\, I_{qs} + L_m\, I_{qr} \quad (3.37)$$

On obtient de la même manière pour le rotor

$$\phi_{dr} = L_r\, I_{dr} + L_m\, I_{ds} \quad (3.38)$$

$$\phi_{qr} = L_r\, I_{qr} + L_m\, I_{qs} \tag{3.39}$$

### a. Couple électromagnétique

Dans le cas général, la puissance électrique instantanée Pe fournie aux enroulements statoriques et rotoriques s'exprime en fonction des grandeurs d'axes d et q :

$$P_e = v_{ds} \cdot i_{ds} + v_{qs} \cdot i_{qs} + v_{dr} \cdot i_{dr} + v_{qr} \cdot i_{qr} \tag{3.40}$$

En remplaçant les équations (4.28) (4.29) (4.30) (4.31) dans (4.40)

$$\begin{aligned} P_e = {} & R_s \cdot i_{ds}^2 + i_{ds} \frac{d\phi_{ds}}{dt} - i_{ds} \cdot w_s \cdot \phi_{qs} + R_s \cdot i_{qs}^2 + i_{qs} \frac{d\phi_{qs}}{dt} - i_{qs} \cdot w_s \cdot \phi_{ds} \\ & + R_r \cdot i_{dr}^2 + i_{dr} \cdot \frac{d\phi_{dr}}{dt} - i_{ds} \cdot w_s \cdot \phi_{qr} + R_r \cdot i_{qr}^2 + i_{qr} \frac{d\phi_{qr}}{dt} - i_{qs} \cdot w_s \cdot \phi_{dr} \end{aligned} \tag{3.41}$$

Ellese décompose en trois séries de termes.

- **Puissance dissipée en perte joule.**

$$P_j = R_s \cdot \left(i_{ds}^2 + i_{qs}^2\right) + R_r \cdot \left(i_{dr}^2 + i_{qr}^2\right) \tag{3.42}$$

- **Puissance représentant les échanges d'énergie électromagnétiques avec les sources.**

$$P_{em} = i_{ds} \frac{d\phi_{ds}}{dt} + i_{qs} \frac{d\phi_{qs}}{dt} + i_{dr} \frac{d\phi_{dr}}{dt} + i_{qr} \frac{d\phi_{qr}}{dt} \tag{3.43}$$

- **Puissance mécanique.**

$$P_{mec} = w_s \cdot \left(i_{ds} \cdot \phi_{qs} - i_{qs} \cdot \phi_{ds}\right) + w_s \cdot g \cdot \left(i_{dr} \cdot \phi_{qr} - i_{qr} \cdot \phi_{dr}\right) \tag{3.44}$$

Entenant compte des équations des flux on peut écrire que :

$$P_m = w_s \left(i_{ds} \cdot \phi_{qs} - i_{qs} \cdot \phi_{ds}\right) \tag{3.45}$$

Orla puissance mécanique est aussi égale à $C_{em} \cdot \Omega$ avec $\Omega = w_m / P$

$$C_{em} = P\left(i_{ds} \cdot \phi_{qs} - i_{qs} \cdot \phi_{ds}\right) \tag{3.46}$$

En remplaçant les équations (3.37) et (3.37) dans (3.46), on obtient alors :

$$C_{em} = P\left\lfloor \left(L_s\, i_{ds} + L_m\, i_{dr}\right) i_{qs} - \left(L_s\, i_{qs} + L_m \,.\, i_{qr}\right) i_{ds} \right\rfloor \tag{3.47}$$

Donc :

$$C_{em} = P \,.\, L_m \left(i_{dr} \,.\, i_{qs} - i_{qr} \,.\, i_{ds}\right) \tag{3.48}$$

$$\phi_{dr} = L_r\, i_{dr} + L_m \,.\, i_{ds} \quad , \text{ soit : } i_{dr} = \frac{\phi_{dr} - L_m\, i_{ds}}{L_r} \tag{3.49}$$

$$\phi_{qr} = L_r\, i_{qr} + L_m\, i_{qs}, \text{ soit } i_{qr} = \frac{\phi_{qr} - L_m\, i_{qs}}{I_r} \tag{3.50}$$

En remplaçant les équations (3.49) et (3.50) dans (3.48), nous obtenons :

$$C_{em} = \frac{P \,.\, L_m}{L_r}\left(\phi_{dr} \,.\, i_{qs} - \phi_{qr} \,.\, i_{ds}\right) \tag{3.51}$$

## 3.3.4. Modèle d'état de la machine asynchrone :

Nous considérons comme variables d'état les courants statorique $(i_{ds},\ i_{qs})$, les flux rotorique $(\phi_{dr},\ \phi_{qr})$ et la vitesse de rotation$w_m$ , le modèle de la machine dans un repère $(dq)$ lié au champ tournant à la vitesse de synchronisme$w_s$et donné par :

$$\begin{cases} \dfrac{di_{ds}}{dt} = \dfrac{1}{\sigma L_s}\left(\left(-R_s + \left(\dfrac{L_m}{L_r}\right)^2 .\, R_r\right) i_{ds} + \sigma \,.\, L_s \,.\, w_s \,.\, i_{qs} + \dfrac{L_m \,.\, R_r}{L_r^{\,2}}\phi_{dr} + \dfrac{L_m}{L_r} .\, \phi_{qr}\, w_m + V_{ds}\right) \\ \dfrac{di_{ds}}{dt} = \dfrac{1}{\sigma L_s}\left(-\sigma\, L_s\, w_s\, i_{qs} - \left(R_s + \left(\dfrac{L_m}{L_r}\right)^2 .\, R_r\right) i_{qs} - \dfrac{L_m}{L_r} .\, \phi_{dr} \,.\, w_m + \dfrac{L_m \,.\, R_r}{L_r^{\,2}}\phi_{qr} + V_{qs}\right) \\ \dfrac{d\phi_{dr}}{dt} = \dfrac{L_m \,.\, R_r}{L_r}\, i_{ds} - \dfrac{R_r}{L_r}\phi_{dr} + \left(w_s - w_m\right)\phi_{dr} \\ \dfrac{d\phi_{qr}}{dt} = \dfrac{L_m \,.\, R_r}{L_r}\, i_{qs} - \left(w_s - w_m\right)\phi_{dr} - \dfrac{R_r}{L_r} .\, \phi_{qr} \\ \dfrac{dw_m}{dt} = \dfrac{P^2 \,.\, L_m}{L_r \,.\, J}\left(i_{qs} \,.\, \phi_{dr} - i_{ds} \,.\, \phi_{qr}\right) - \dfrac{f_c}{J} .\, w_m - \dfrac{P}{J} C_r \end{cases} \tag{3.52}$$

Où $\sigma$ est le coefficient de dispersion : $\sigma = 1 - \dfrac{L_m^{\,2}}{L_r \,.\, L_s}$

$K = PL_m/\left(L_r\right).$

### 3.3.4. Résultats de simulation

La simulation de l'ensemble MAS dont les paramètres sont donnés dans l'annexe a été faite sous les conditions suivantes :

- Démarrage à vide du moteur;
- A l'instant t= 1 sec application d'une charge de 10 N ;
- A t= 2 sec élimination de la charge ;

On remarque que le régime transitoire dure 0,5 sec, et que la vitesse diminue avec l'augmentation de la charge et puis elle augmente avec sa diminution, d'autre part le couple électromagnétique $C_{em}$ suit la valeur du couple résistant.

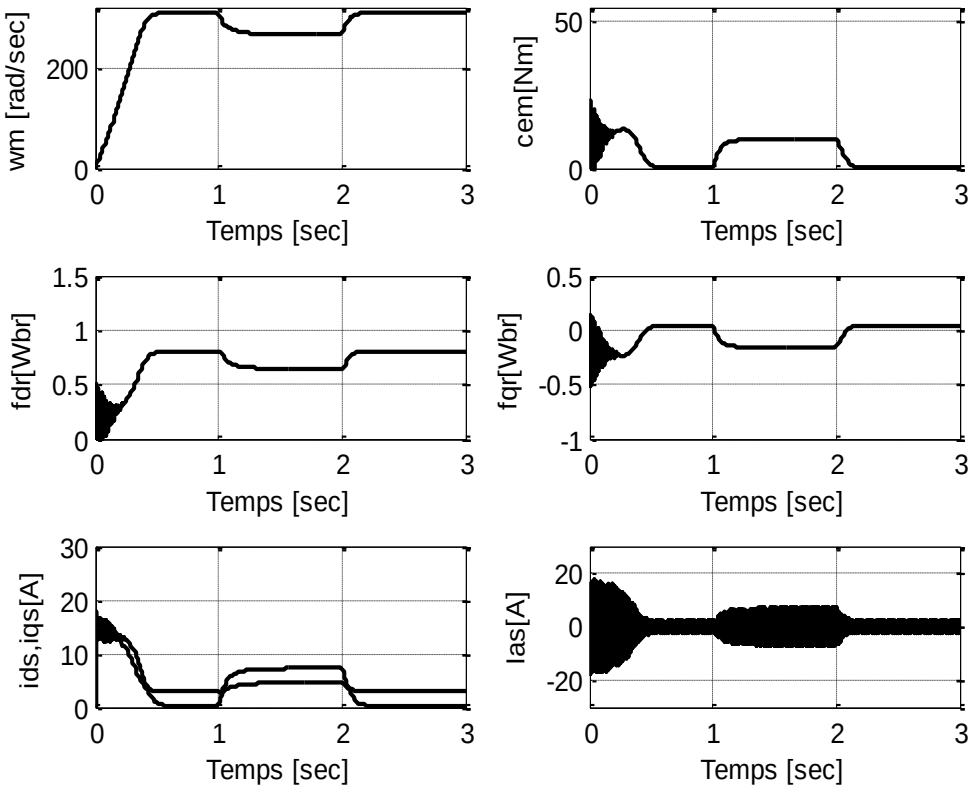



**Figure (3.15)** : Comportement dynamique de la MAS avec une alimentation sinusoïdale

## 3.4. Modèle de la chaîne de traction :

Après la modélisation de tous les composants de la chaîne de traction (PAC, convertisseurs, machine), la figure (3.16) représente le modèle complet de la chaîne de traction du véhicule électrique.

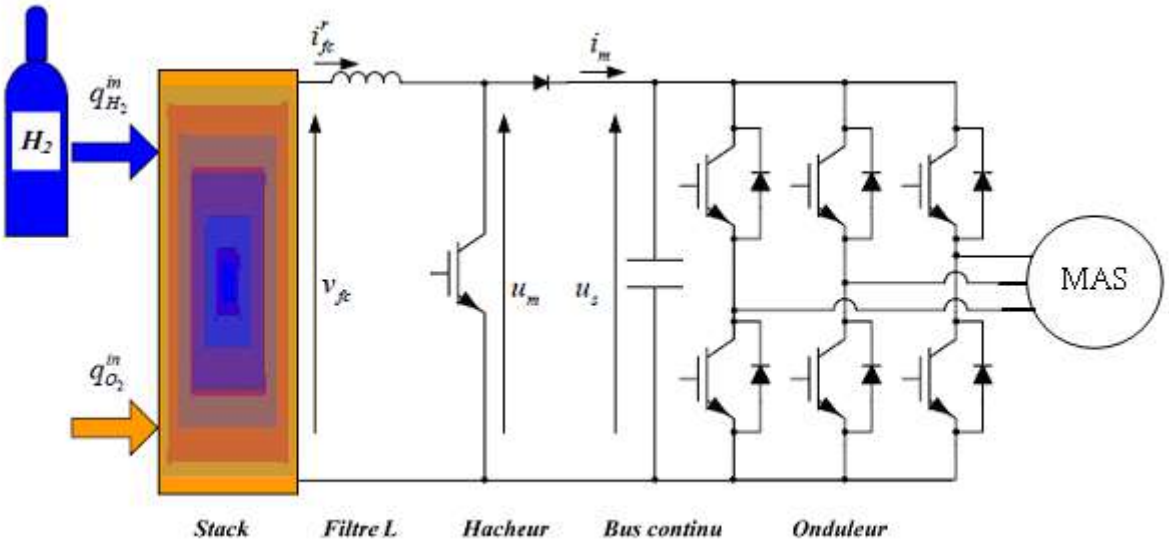



**Figure (3.16) : modèle complet du véhicule électrique.**

## 3.5. Résultats de simulation :

On veut voire la réaction de notre source de production d'énergie électrique à pile à combustible dans un parcours choisi : sa veut dire sa réaction devant un changement de vitesse et un changement de couple. Ces changements sont donnés pour but d'étudier la réponse dynamique du système.

Les figures (3.17) et (3.18) représentent respectivement un changement de vitesse et un changement de couple en fonction de temps.

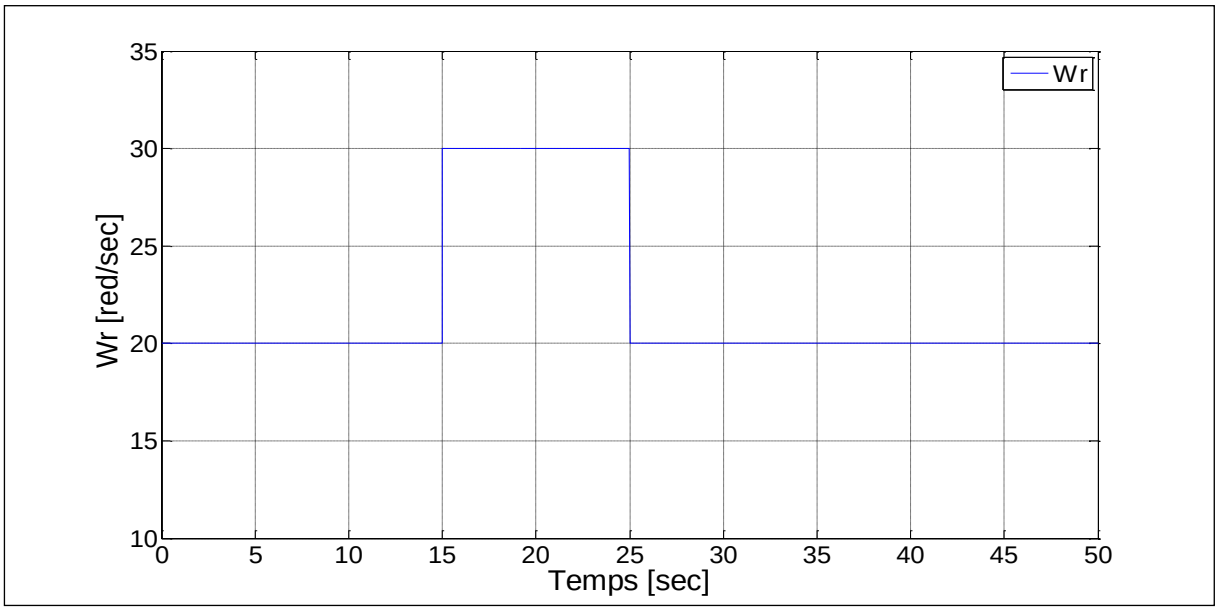



**Figure (3.17)** : variation de vitesse en fonction de temps

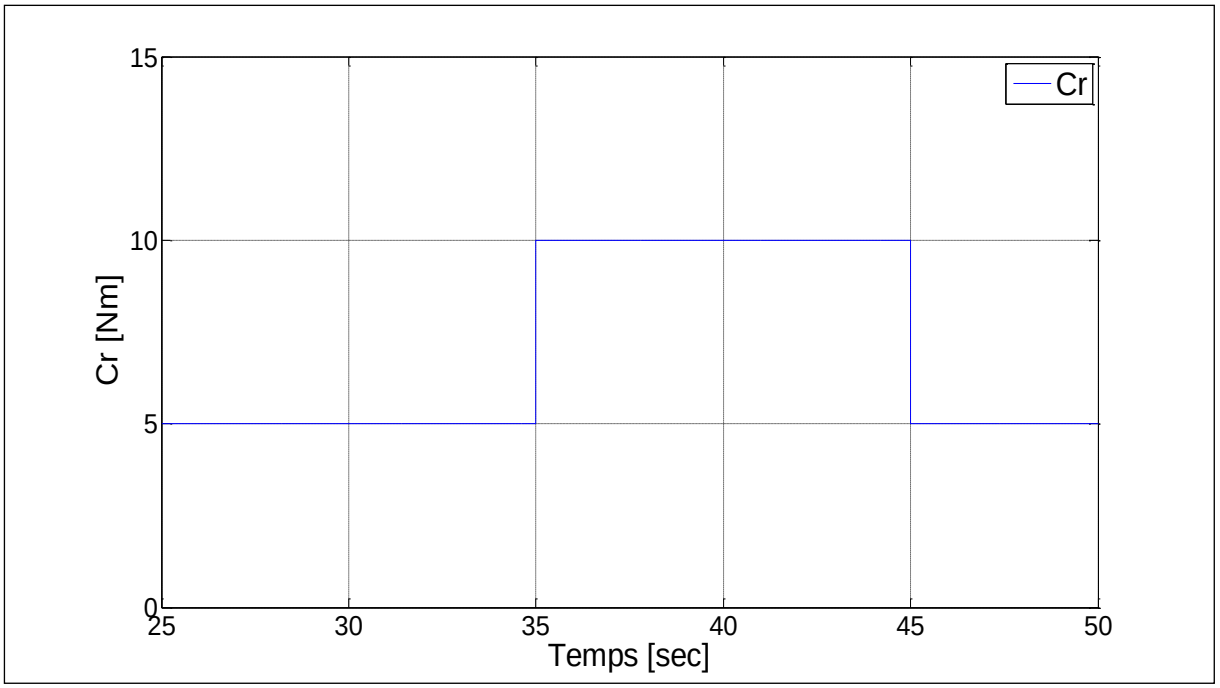



**Figure (3.18)** : variation de couple résistant en fonction de temps

Les variations de la tension de la pile, la puissance de la pile, le débit molaire de l'hydrogène ainsi de l'oxygène, la vitesse de la MAS avec la vitesse demandée et le couple de la MAS avec le couple résistant sont illustrées dans les figures (3.19), (3.20), (3.21), (3.22), (3.23) et (3.24) respectivement.

La figure (3.19) représente la variation de la tension de la pile en fonction du temps. On remarque que la pile a réagit avec les changements de la vitesse demandée et le couple demandé instantanément et sans dépassement sauf au démarrage ou elle a pris un temps de réponse important (15 secondes).

La figure (3.20) représente la variation de la puissance de la pile en fonction du temps. On remarque que la pile a réussi de fournir la puissance demandée d'une manière fiable. Ajoutons que le temps de la puissance est réduit par rapport à la tension, cependant il reste un peu important dans un système qui fonction dans une zone urbain ou le stationnement est exigé plusieurs fois.

Les figure (3.21) et (3.22) représentent la variation des débits molaires de l'hydrogène ainsi que de l'oxygène en fonction du temps. Puisque le débit molaire contrôle la puissance demandée par la charge (comme il est illustré précédemment au chapitre 03), nous avons obtenu une variation un peu semblable a celle de la puissance.

La figure (3.23) représente la variation de la vitesse demandée et la vitesse de la Mas en fonction du temps. On voit que le moteur a démarré rapidement et sa vitesse a suit la vitesse demandée malgré le changement de cette dernière.

La figure (3.24) représente la variation du couple de moteur et la variation de couple résistant en fonction du temps. On remarque que le couple du moteur a suit le couple resistant durant ses changements, il a augmenté encore lors de la variation de la vitesse. On voit aussi un dépassement insupportable pour la pile lors du démarrage. Citons encore une présence d'oscillation dans l'allure du couple.

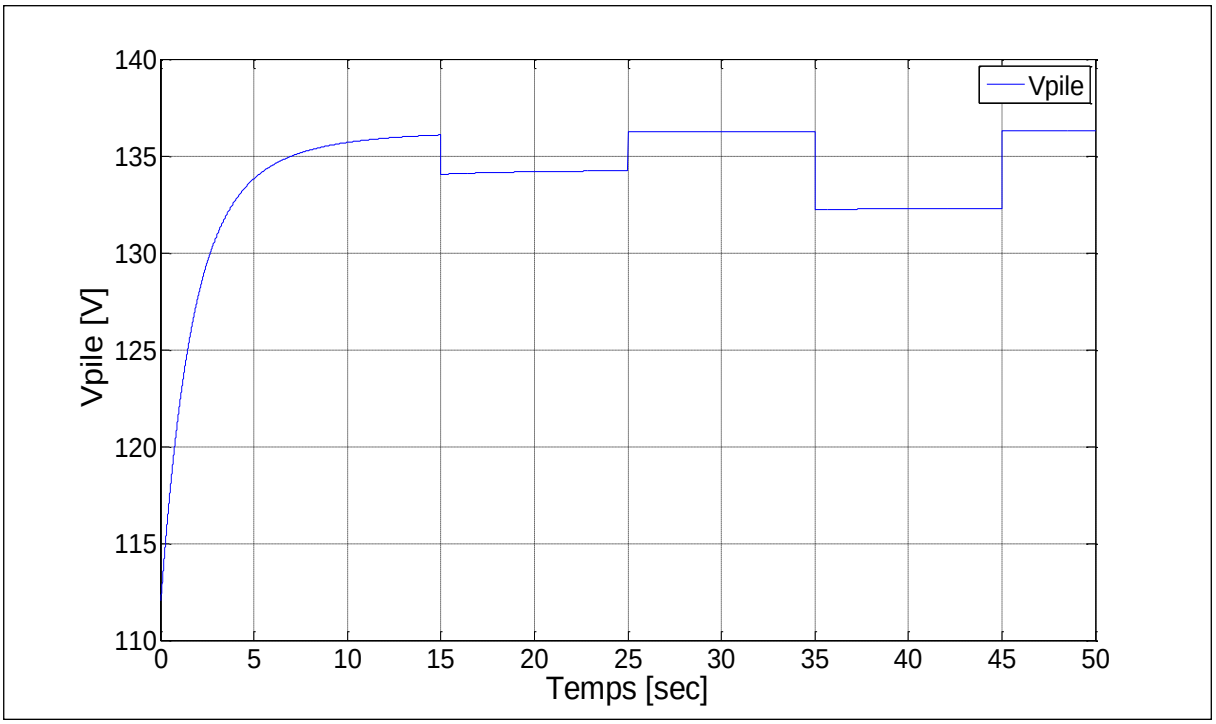



**Figure (3.19) :** Variation de la tension de la pile à combustible en fonction du temps

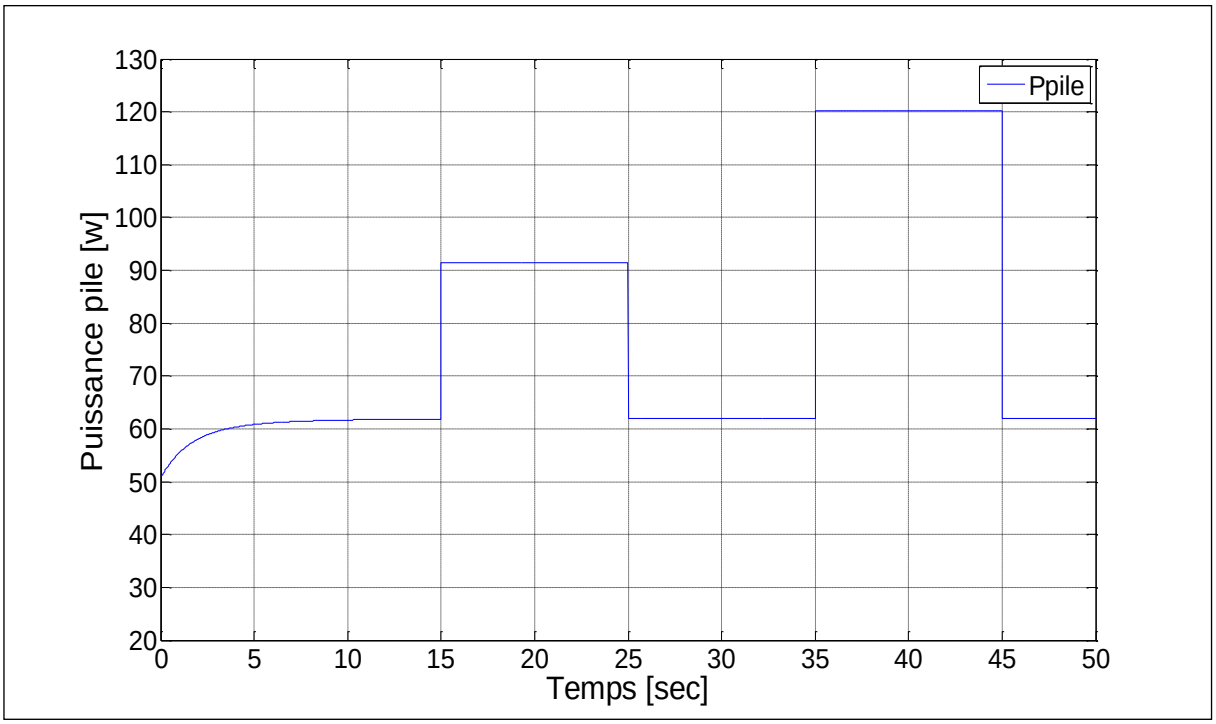



**Figure (3.20) :** Variation de la puissance de la pile à combustible en fonction du temps

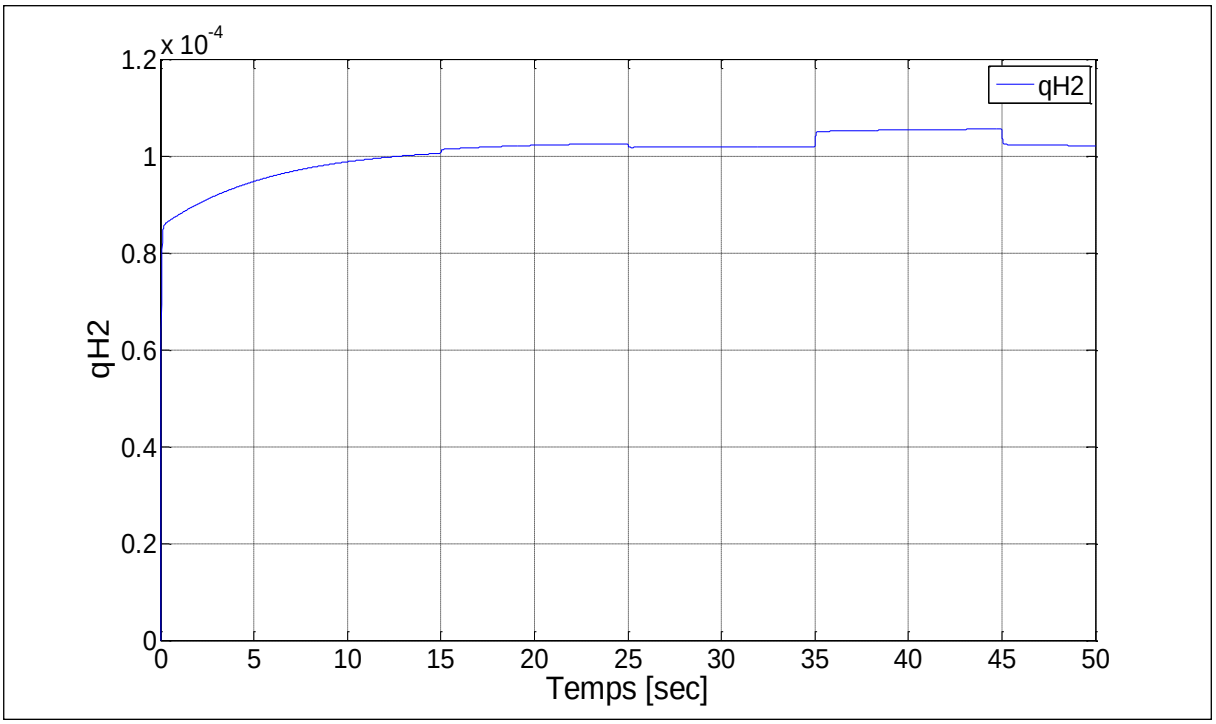



**Figure (3.21) :** variation du débit molaire d'hydrogène en fonction du temps

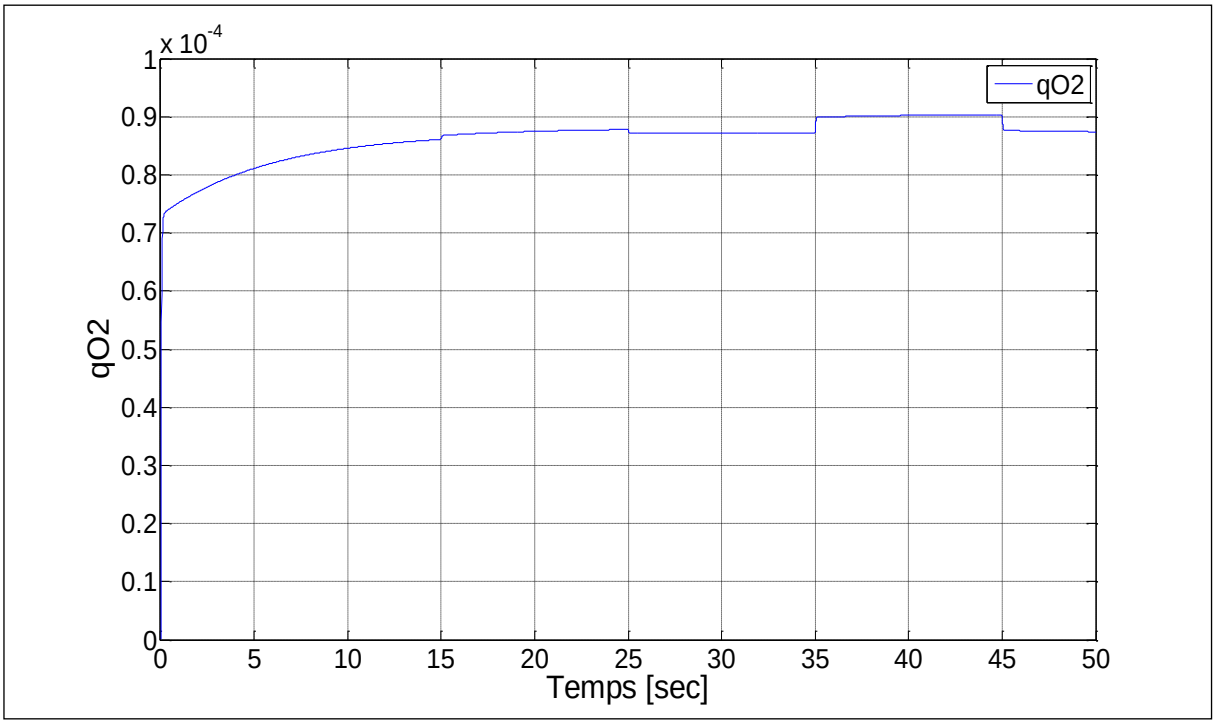



**Figure (3.22) :** variation du débit molaire d'oxygène en fonction du temps

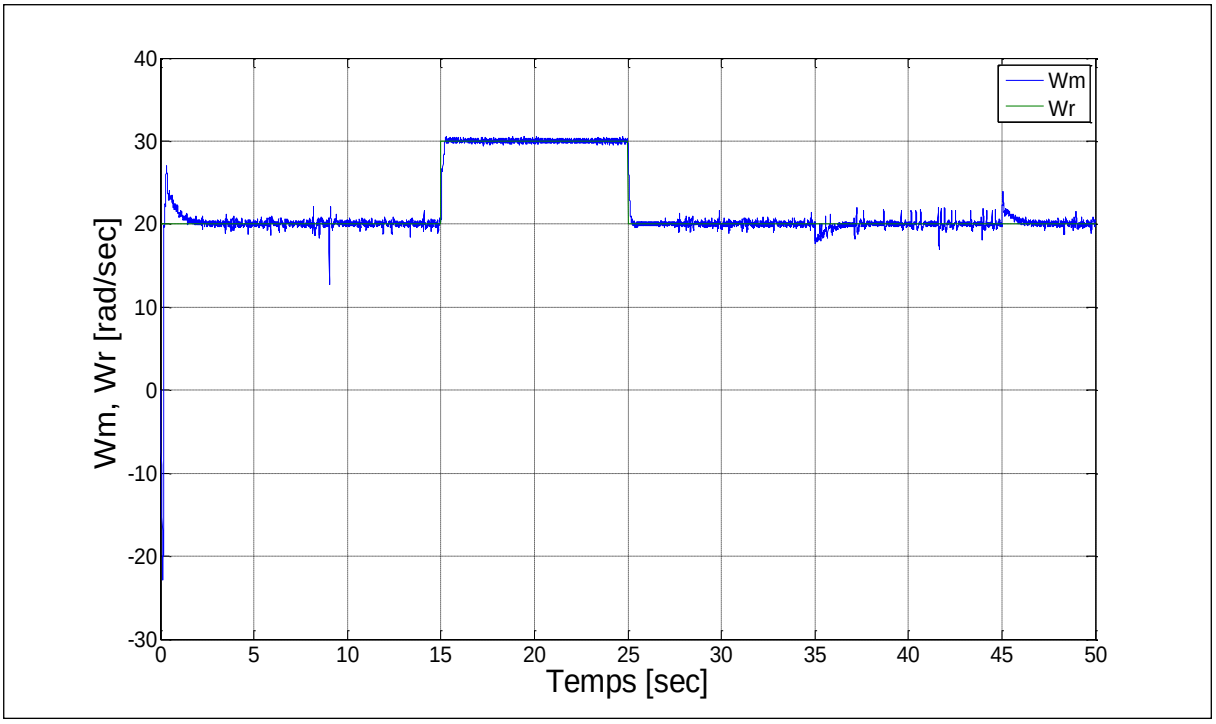



**Figure (3.23) :** variation de la vitesse demandée et la vitesse de la MAS en fonction du temps

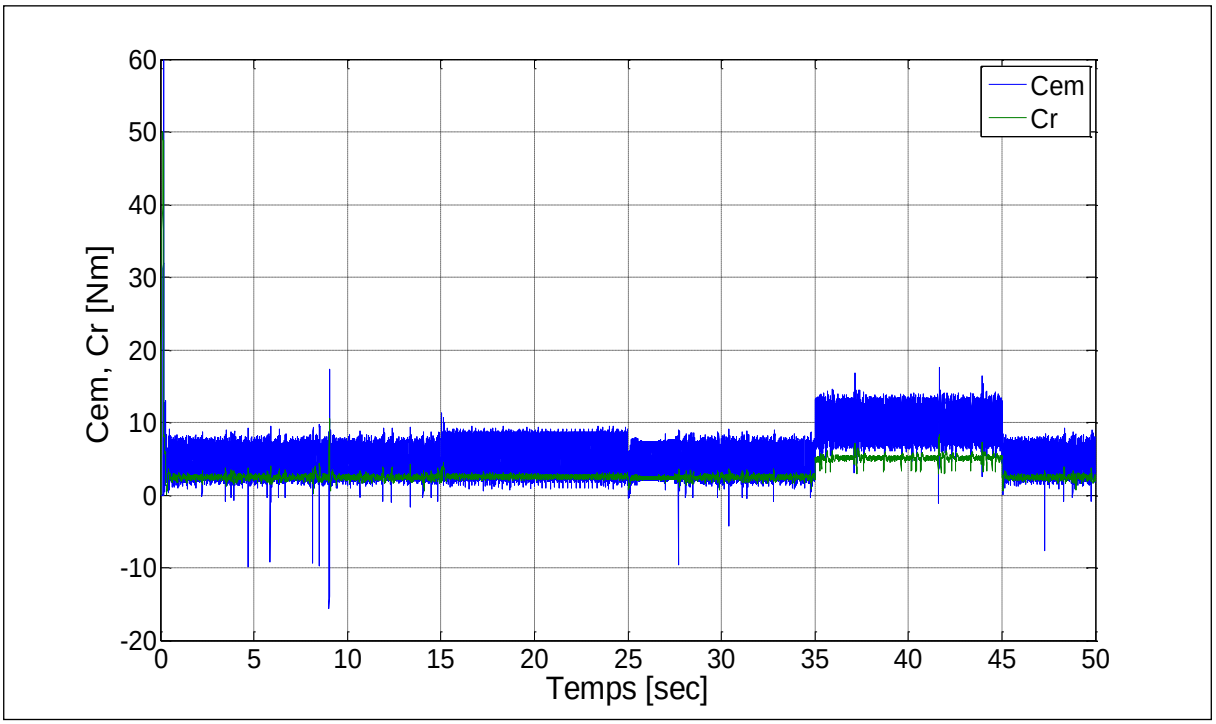



**Figure (3.24) :** variation du couple demandé et le couple de la MAS en fonction du temps

## Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté un modèle dynamique de la chaîne de traction avec un modèle dynamique de la pile à combustible de type PEMFC, un hacheur élévateur (boost), un onduleur commandé par MLI et un moteur asynchrone.

Notre plie a pu délivrer une puissance selon la demande de la MAS (variation de couple et variation de puissance) et la MAS a bien suit les consignes (vitesse et couple).

Le problème majeur est lors du démarrage ou la pile ne peut pas fournit ces valeurs, alors nous somme obligé de placer une batterie ou une super condensateur.

# Conclusion générale

## Conclusion générale

Dans ce mémoire, nous avons présenté premièrement les problèmes énergétiques dans le monde, l'énergie d'hydrogène est une énergie renouvelable pour le futur, la pile à combustible permet de transformer efficacement cette énergie chimique en énergie électrique.

Tout au long de ce mémoire nous avons présenté des points importants qui ont permis de mieux connaître les modes de production d'hydrogène, on constate que la production à partir les énergies fossiles occupe environ 80 % de la production totale, L'électrolyse de l'eau ne représente actuellement que quelques pour-cent de la totalité de l'hydrogène produit.

Depuis l'invention, les piles à combustible n'ont pas encore atteint une maturité suffisante quant à leur développement, leur application et leur commercialisation comparées à leurs principaux concurrents que sont les moteurs thermiques pour le transport, les chaudières ou les turbines à gaz pour le stationnaire ou encore les batteries pour les applications portables.

Le but de ce travail consiste à l'étude et à la modélisation d'une pile à combustible, qu'est limité à une étude théorique et empirique de la pile qui prend en considération l'effet de la température sur la force électromotrice de la pile.

# Bibliographie

## Bibliographie


[1] LABBÉ, Julien, « L'Hydrogène électrolytique comme moyen de stockage d'électricité pour systèmes photovoltaïques isolés », Thèse de doctorat, École Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2006.
[2] CANDUSSO, Denis. «Contribution à l'expérimentation de générateurs à piles à combustible de type PEM pour les systèmes de transport» Thèse de doctorat ,École normale supérieure de Cachan-ENS Cachan , 2013.
[3] Besse moulin, Pierre et Jean Oliviéri « Le rayonnement solaire et sa composante ultraviolette » ,Société météorologique de France, Paris (FRA) ,septembre 2000.
[4] Radvanyi, Pierre « La découverte de la radioactivité artificielle », Bibnum, Textes fondateurs de la science, 2009.
[5] Thibault, Janine, L'air au quotidien « approche théorique et expérimentale».Livre Odile Jacob, 2003.
[6] LOUAZENE, Mohamed Lakhdar , « Contribution à l'optimisation des systèmes photovoltaïques utilisés pour l'irrigation dans les zones sahariennes–Application zone de Ouargla » ,Thèse de Doctorat , Université de Batna, Fév 2015.
[7] Labouret, Anne et Villoz, Michel, « Installations photovoltaïques-5e éd ,Conception et dimensionnement d'installations raccordées au réseau » Dunod, 2012.
[8] Labouret, Anne et Michel villoz, « Energie solaire Photovoltaique » 3eme edition DU NOD, Paris ,2006.
[9] Chabane, Foued, « Modélisation des paramètres de la conversion thermique de l'énergie solaire», Thèse de doctorat, Université Mohamed Khider-Biskra, 2015.
[10] H. MAAMAR, « Etude et Effet de l'Orientation de deux Pièces d'un Habitat en Pierre Situé à Ghardaïa »: Mémoire Magister,Université ABOU-BAKR BELKAÏD –EMCEN, 2011.
[11] de la Casinière, Alain Chiron, « Le rayonnement solaire dans l'environnement terrestre»,Editions Publibook, 2003.
[12] Hania, AMARDJIA-ADNANI, « Algérie énergie solaire et hydrogène développement durable » , Edition OPU 2007.
[13] J. A.Duffie, A. Wiley and W.A. Beckman, « Solar Engineering of Thermal Processes», Second Edition. - Interscience Publication, 1991.
[14]Dr. Sofia, BELAID LALOUNI, « Energie Solaire Photovoltaïque » Cours Université A.MIRA de BEJAIA 2015.
[15] C.H.Cox, III, D.J.Silversmith « Reduction of photovoltaic cell reverse breakdown by a peripheral bypass diode», Massachusetts Instate of Technology Lincoln Laboratory (IEEE 1982).
[16] Lalouni Sofia, Etude, « commande et simulation d'une chaine hybride photovoltaïque-eolienne» de production d'énergie électrique, Thése de Doctorat en Science, université de Bejaia, 2009.
[17] K.Nishioka, N.Sakitani, K.Kurobe, Y.Yamamoto, Y.Ishikawa ,Y.Uraoka, T.Fuyuki, « Analysis of the temperature characteristics in polycrystalline Si solar cell [1] M M. Robert Galley et Claude Gatignol ; apport sur les perspectives offertes par la technologie de la pile à combustible, 3 juillet 2003.
[18] Christian Bailleux et Pierre Clément, « L‟hydrogène révolutionnaire », Direction des des et Recherches, EDF, 1989.
[19] CEA (Commissariat à l‟Energie Atomique), « L‟hydrogène », ISSN 1637-5408, 2004
[20] CEA (Commissariat à l‟Energie Atomique), « Le soleil – de l‟étoile à l‟énergiedomestique- », ISSN 1637-5408, 2004
[21] Bent Sorensen, « Hydrogen and Fuel cells: Emerging technologies and applications »Elsevier –cademic Press, ISBN: 0-12-655281-9, 2005.
[22] Cristina Luliana, « Phases et nouveaux composés à base de Magnésium pour lestockage de l‟hydrogène », thèse doctorat université de Bordeaux, 2008.
23] Mounir SAHLI, « Etude de la production d‟hydrogéné par électrolyse et pile à combustible », MEMOIRE DE MAGISTER EN PHYSIQUE UNIVERSITE MENTOURI DE CONSTANTINE, Soutenu le : 17/10/2010.
[24] D. Duprez, A. Miloudi, G. Delahay, R. Maurel (1994) Selective Steam Reforming of Aromatic drocarbons. J Catal, Vol 90, 292-301.

[25] B. Souhila (2012) Elaboration des systèmes à base de cuivre Application en reaction de conversion du gaz a l'eau et en photo-catalyse, Thèse de Doctorat,Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene Alger
[26] Y. Jamal, M. L. W yszinski (1994) On board generation of hydrogen rich gaseous fuels – A review. Int J Hydrogen Energy, Vol 19, 557-572
[27] F. Aperture, C. Descorme, D. Duprez (2001) Hydrogen production for fuel cells from the catalytic ethanol steam reforming. Top Catal, Vols. 30/31, 487-491[28] J. P. Euzen, P.Trambouze (1996) Les grandes installations chimiques-Evolution progressives ou sauts technologiques. L‟actualité Chimique, 33-41
[29] M. Steinberg, H. C. Cheng (1989) Modern and prospective technologies for hydrogène production fromefossile fuels. Int J HydrogèneEnger, Vol 14, 797–820
[30] C. Raimbault (1997) L‟hydrogène industriel : synthèse, purification. L‟actualité Chimique, 17-23
[31] J. R. Rolstrup-Nielsen (1973) Activity of Nickel catalyst for Steam Reforming of 7175-7179,2003.
[32] A.Mefti, H.Mimouni « Evaluation du potentiel énergétique solaire » Journal Bulletin des énergies renouvelables No 2, Décembre 2002.
[33] BENCHERIF, Mohamed, « Modélisation de systèmes énergétiques photovoltaïques et éoliens intégration dans un système hybride basse tension »,Thèse de doctorat ,Université Abou Bekr Belkaid Tlemcen,2014.
[34] Site web https://www.systemespv.com Systèmes PV (Site consulté en février 2018)
[35] Blunier, Benjamin, and Abdellatif Miraoui. « 20 questions sur la pile à combustible: l'hydrogène, vecteur énergétique de demain? », Éditions Technip, 2009.
[36] B. Arnason et T. I. Sigfüson, « Iceland_ A future Hydrogen Economy », International Journal of Hydrogen Energy, 25(5), 389-394.2000.
[37] J. K. Dahl, K. J. Buechler, A. W. Weimer, A. Lewandowski, C. Bingham, «Solarthermal dissociation of methane in a fluid-wall aerosol flow reactor» International urnal of Hydrogen Energy, 29 (2004) 725-736.
[38] R. Momirlan et T. Veziroglu, «Recent directions of world hydrogen production»,Ren. Sust. Energy Rev. 3 (1999) 219, Doctorat de l'université de Toulouse Soutenue le 03 Octobre 2008.
[39] COUPAN, Frédéric, « Stockage pour les énergies renouvelables: évaluation et modélisation de la batterie plomb-acide», Thèse de doctorat, Université de Guyane.2017.
[40] SAHÈI, Mounir. «Etude de la production d'hydrogène par électrolyse et pile à combustible».Mémoire de magister Université Mentouri de Constantine 2010.
[41] DE DIANOUS, Valérie, SYLVAINE, PIQUE, et WEINBERGER, « Etude comparative des églementations, guides et normes concernant les électrolyseurs et le stockage d'hydrogène» RAPPORT D'ETUDE 15/03/2016.
[42] JEAN, Dominique, « Étude du comportement d'une pile à combustible alimentée avec différents alcools». Thèse de doctorat, Université Laval canada ,2006.
[43] Ahmed, DJAFOUR; « Etude d'un système de production d'hydrogène solaire »; Thèse de Doctorat, Université Kasdi Merbah de Ouargla 2013.
[44] AFH2 Th. Alleau ; « Production d'hydrogène par électrolyse de l'eau », Mémento de l‘hydrogène, fiche 3.2.1. Révision, mai 2011.
[45] Rabih, Samer , « Contribution à la modélisation de systèmes réversibles de types électrolyseur et pile à hydrogène en vue de leur couplage aux générateurs photovoltaïques »,Thèse de doctorat, Université de Toulouse, Institut National Polyechnique de Toulouse - INPT (FRANCE) , 2008.
[46] GHOUAOULA, ABDELHAMID. «Simulation du comportement mécanique de la partie cylindrique d'un réservoir de stockage d'hydrogène soumis à un chargement quasi statique ». Thèse de doctorat, Université de Hassiba Benbouali Chlef, 2011

## Résumé

Dans ce travail, nous avons étudié et modélisé la pile à combustible (PAC) qui fait l'objet de l'heure, de sorte que nous disposions de calculs théoriques et Empiriques de l'impulsion électrique du pile à combustible (PAC) avec l'évolution des valeurs de cyclones thermiques au gaz hydrogène.
Les résultats expérimentaux obtenus sont en bon accord avec les résultats Théoriques


**Mote Clé :** pile à combustible, PAC, l'impulsion électrique, cyclones thermiques



## Abstract :

In this work, we have studied and modeled the fuel cell (PAC) which is the subject of the hour, so that we have theoretical calculations and Empiricals of fuel cell electrical impulse (FC) with evolution hydrogen gas thermal cyclone values.
The experimental results obtained are in good agreement with the results Theoretical


**Keywords** : fuel cell, heat pump, electrical impulse, thermal cyclones



## الملخص :

في هذا العمل ، قمنا بدراسة ونمذجة خلية الوقود التي هي موضوع الساعة ، بحيث يكون لدينا حسابات نظرية و تجارب النبض الكهربائي لخلايا الوقود مع التطور قيم الإعصار الحراري لغاز الهيدروجين. النتائج التجريبية التي تم الحصول عليها في اتفاق جيد مع النتائج نظري.


**كلمات مفتاحية :** خلية الوقود ، المضخة الحرارية ، النبضات الكهربائية ، الأعاصير الحرارية