

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université de M'hamed Bougara
BOUMERDES
UMBB

FACULTE DES HYDROCARBURES ET DE
LA CHEMIE
DEPARTEMENT D'AUTOMATISATION
DES PROCEDES INDUSTRIELS ET
ELECIFICATION

MEMOIRE POUR L'OBTENTION DU DIPLOME DE
MASTER

SPECIALITE : AUTOMATISATION DES PROCEDES INDUSTRIELS

OPTION : COMMANDE AUTOMATIQUE

PRESENTEE PAR

Mr. **LOUTANI WAIL**
Mr. **BENHADJIRA Abdelaali**

SUJET DU MEMOIRE

**Modélisation et commande d'un système à pile à
Combustible**

PROMOTEUR :

Dr. Ahmed CHAÏB

Devant les jurés :

A.BENHALLA	MC/A	UMBB	Président
M.HAMADACHE	MC/B	UMBB	Examinateur
Ahmed CHAÏB	MC/A	UMBB	Encadreur

Remerciement

Nous tenons tout d'abord à remercier Dieu le tout puissant et miséricordieux, qui nous a donné la force et la patience d'accomplir ce Modeste travail.

*Nous tenons à exprimer ici tout notre respect et toute notre reconnaissance à notre encadreur Monsieur **CHAÏB Ahmed**, pour ses précieux conseils et son aide durant toute la période du travail.*

Nous remercions vivement les membres du jury pour nous avoir fait l'honneur d'accepter de juger ce modeste mémoire.

Nous tenons à exprimer nos sincères remerciements A nos familles et nos amis qui par leurs prières et leurs encouragements, on a pu surmonter tous les obstacles.

Enfin, nous tenons également à remercier toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Merci à tous et à toutes

Dédicace

Nous dédions ce travail à :

*Nos parents, sources de tendresse et d'amours pour leurs soutiens
tout le long de notre vie scolaire et qui nous ont toujours soutenus et
qui ont fait tout possible pour nous aider.*

Nos frères et nos sœurs, que nous aimons beaucoup.

Notre grande famille.

Nos chers amis, et enseignants.

Tout qu'ont collaboré de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.

Que dieu leur accorde santé et prospérité.

Nomenclatures :

ΔG	est le changement d'énergie libre (J/mol).
F	est la constante de faraday (96,487 C/Kmol).
ΔS	est le changement d'entropie (J/mol).
R	est la constante universelle du gaz (8,314 J/K.mol).
P_{H_2}	sont respectivement les pressions partielles d'hydrogène et d'oxygène (atm).
T	indique la température de fonctionnement de la pile (K).
W_r	Travail mécanique réversible fourni (J).
ΔH	Enthalpie de réaction (- ΔH à Chaleur de réaction à pression cte) (J).
T_1, T_2	Températures absolues entre lesquelles fonctionne la machine. (K)
T_{ref}	est la température de référence (K)
$T\Delta S$	Représente la chaleur isotherme réversible échangée avec le milieu extérieur.
W_e	Travail électrique fourni (J)
F	Constante de faraday (96500 C)
n	Nombre d'électrons échangés s dans les réactions électrochimique.
E_{th}	fem de la pile à l'équilibre (c'est-à-dire à intensité de courant nulle) (V)
PCI	Pouvoir Calorifique Inférieur de l'hydrogène PCI=242kJ/mol.
F_{H_2}	Débit molaire d'hydrogène consommé par la pile (mol/s)
U_{stack}	Tension aux bornes du stack (V)
I_{pac}	Courant de la pile (A)
P_{aux}	Puissance des auxiliaires (Compresseur, Pompe, Ventilateur...) (W)
P_{pile}	Puissance électrique brute du stack (W)
N_0	Nombre de cellules de l'empilement
V_{Fc}	Tension par cellule (V)
J	Densité de courant (A/m ²)
A	Surface active des cellules (m ²)
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	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)
τ_{H_2}	Le constant de temps de l'hydrogène, il est en (s)
τ_{O_2}	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)
V_{an}	est le volume de l'anode

n_{H_2}	est le nombre d'atome d'hydrogène dans le canal de l'anode
R	est la constante universelle des gaz ((l.atm)/ (Kmol.K))
T	est la température absolue (K)
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 rotorique
J	moment d'induire de la partie tournante
Ω	vitesse mécanique de rotation (angulaire)
f_c	coefficient de frottement visqueux
C_r	couple résistant
P	nombre de paires de pôle
$[L_s], [L_r]$	matrices d'inductances statoriques et rotoriques
$[L_m]$	matrices des inductances mutuelles stator rotor

Liste des tableaux :

Paramètres	Valeurs	Paramètres	Valeurs
T	343K	ζ_1	-0.948
A	333 cm ²	ζ_2	0.00286+0.0002.lnA+(4.3.10 ⁻⁵)lnC _{H2}
L	178 μm	ζ_3	7.6.10 ⁻⁵
p_{H_2}	1 atm	ζ_4	-1.93.10 ⁻⁴
p_{O_2}	1atm	Ψ	23
B	0.016 V	J_{max}	1500 mA/cm ²
N_0	340	J_n	1.2 mA/cm ²
R_c	0.0003 Ω	N_0	340

Tableau (3.1) : constantes physiques [3,4].

Puissance nominale	1.5kW
Tension nominale	220v
Rendement nominal	0.78
Facteur de puissance nominal	0.8
Vitesse nominale	1428 tr/min
Fréquence nominale	50Hz
Courant nominal	6.31A

Résistance statorique	4.85Ω
Résistance rotorique	3.805Ω
Inductance cyclique statorique	0.274H
Inductance cyclique rotorique	0.274H
Inductance mutuelle	0.258H
Nombre de paires de pôles	2
Moment d'inertie	0.031kg/m ²
Coefficient de frottement	0.008N.m.s/rad

Tableau (3.2) : paramètres de la machine asynchrone

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

Tableau (3.3) : Tableau des paramètres du modèle de pile a combustible.

SOMMAIRE

Introduction Générale	1
Chap.01. Généralités sur les piles à combustible	
1.1 Introduction.....	13
1.2 Historique	13
1.3 Principe de fonctionnement.....	15
1.4 Différents types des piles	17
1 .4 .1 La pile alcaline (AFC).....	18
1 .4 .2 Piles à membrane électrolyte polymérique (PEMFC)	18
1 .6 .3 La pile à acide phosphorique (PAFC).....	19
1 .4 .4 La pile à méthanol direct (DMFC).....	20
1 .4 .5 La pile à oxyde solide (SOFC).....	21
1 .4 .6 La pile à carbonates fondus (MCFC).....	22
1.5 Constitution d' une pile PEMFC	23
1.5.1 Membranes polymères ioniques.....	23
1.5.2 Les électrodes.....	23
1.5.3 Catalyseur.....	23
1.5.3.1 Les catalyseurs du coté anode.....	23
1.5.3.2 Les catalyseurs du côté cathode.....	24
1.5.4 Les plaques bipolaires.....	24
1.6 Caractéristique électrique.....	24
1.6.1 Tension de Nernst.....	24
1.6.2 Polarisation d'activation.....	25
1.6.3 Polarisation ohmique.....	25
1.6.5 Polarisation de concentration.....	25
1.6.5 Rendement du système.....	26
1.7 Les applications des piles à combustible.....	26

1.8 Architecture du système à pile à combustible	28
1.8.1 Configuration système	28
1.8.1.1 Gestion de l'air	29
1.8.1.2 Gestion de l'eau	29
1.8.1.3 Gestion thermique	30
1.8.2 Interfaces externes	30
1.8.2 Circuit d'air	31
1.8.2.1 Circuit d'humidification	31
1.8.2.2 Circuit de refroidissement	32
1.8.2.3 Circuit électrique	32
1.9 Les avantages et les inconvénients des piles à combustibles	33
1.9.1 Les avantages	33
1.9.2 Les inconvénients	33
1.10 conclusion	34

Chap. 2. Etude bibliographique sur les véhicules électriques

2.1. Introduction	27
2.2. Historique	27
2.3. Architecture du véhicule électrique VE	30
2.3.1. Les moteurs roues	31
2.4. Source d'énergie d'un véhicule électrique	32
2.5. L'architecture d'un véhicule à pile à combustible	33
2.6. Le véhicule hybride	35
2.6.1. Historique des véhicules hybrides	36
2.6.2 Définition et classifications des véhicules hybrides	36
2.6.2.1 Hybride « micro »	37
2.6.2.2. Hybride « mild »	38
2.6.2.3 Hybride « full »	38
2.6.3 Architecture des véhicules hybrides	39
2.6.3.1 Hybride Série	39
2.6.3.2 Hybride Parallèle	40
2.6.3.3. Hybride Série/Parallèle	41
2.6.3.4. Hybride complexe	42
2.7 Conclusion	43

Chap. 03. Modélisation et Simulation de PEMFC

3.1 Introduction -----	52
3.2 Modélisation de la PEMFC -----	52
3.2.1 Modèle de tension -----	55
➤ Tension de Nernst -----	55
➤ Polarisation d'activation (Charge transfert kinetics)-----	56
➤ Polarisation ohmique-----	56
➤ Polarisation de concentration (Mass Transport)-----	57
3.3 Simulation de Pile à combustible par SIMULINCK MATLAB : -----	59
3.3.1 Caractéristiques tension-densité de courant et puissance-densité de courant d'une cellule PEM : -----	59
3.3.2 Rendement d'une cellule PEM -----	60
3.3.3 La tension de 25 cellules mises en série -----	61
3.3.3 Effet de la température sur la caractéristique de la cellule : -----	62
3.3.5 Effet de la pression sur la caractéristique de la cellule : -----	63
3.4 Conclusion -----	64

Chap.04. COMMANDE D'UN SYSTEME A PEMFC

4.1 Introduction -----	65
4.2. Modèle de la chaîne de traction -----	65
4.3. Modèle dynamique de la pile à combustible PEMFC -----	65
4.4. Modélisation des convertisseurs-----	66
4.4.1. Hacheur élévateur de tension (BOOST)-----	66
4.4.2. L'onduleur de tension-----	68
4.4.2.1. Commande par MLI-----	69
4.5. La machine asynchrone-----	70
4.5.1 Constitution et principe de fonctionnement -----	70
4.5.1.1 Définition -----	70
4.5.1.1.1. Constitution-----	70
4.5.1.1.2. Principe de fonctionnement -----	71
4.5.1.1.3. Caractéristiques mécaniques -----	72
4.5.1.1.3.1. Représentation schématique-----	73

4.5.2. Modélisation de la machine asynchrone-----	75
4.5.2.1. Equations électriques de la machine asynchrone-----	75
4.5.2.2. Equations magnétiques-----	76
4.5.2.3. Equation mécanique -----	76
4.5.2.4. Référentiel pourquoi ?-----	77
4.5.3. Transformation de Park-----	77
4.5.3.1 Application de la transformation de Park à la MAS -----	78
4.5.4. Modèle d'état de la machine asynchrone-----	80
4.5.5. Résultats de simulation -----	81
4.6. La commande vectorielle de la machine asynchrone-----	82
4.6.1. Introduction-----	82
4.6.2. Principe de la commande vectorielle -----	82
4.6.3. Orientation du flux rotorique -----	82
4.6.4. Commande vectorielle indirecte (IFOC)-----	84
4.6.4.1. Régulateur du courant i_{qs} -----	85
4.6.4.2. Régulateur du courant i_{ds} -----	85
4.6.5. Réglage de la MAS par la commande vectorielle indirecte -----	86
4.6.6. Calcul du régulateur de vitesse -----	87
4.6.7. Résultat de simulation avec la commande MLI-----	88
4.7. Résultats de simulation -----	88
4.8. Conclusion-----	91
Conclusion Générale-----	92
Bibliographie-----	93

Introduction générale :

Les enjeux énergétiques et environnementaux font aujourd'hui partie des préoccupations majeures au niveau international. L'accroissement de la population mondiale ainsi que l'activité industrielle des pays développés et des puissances économiques émergentes ont entraîné une explosion des besoins en énergie. L'utilisation des ressources fossiles pour satisfaire cette « boulimie » énergétique est responsable de la majeure partie des rejets de gaz à effet de serre dans l'atmosphère ; cette pollution est à l'origine du réchauffement de la planète et des bouleversements climatiques qui en découlent. Outre les problèmes liés à l'environnement, les réserves d'énergies fossiles sont limitées et ne pourront satisfaire à moyen terme la demande mondiale.

A cet effet, l'hydrogène est une source énergétique idéal pour remplacer à long terme les énergies fossiles, d'autant qu'il est l'élément le plus abondant de notre univers et qu'il est non toxique car sa combustion ne rejette que de l'eau. La pile à combustible est l'élément électrochimique qui permet de convertir l'énergie de l'hydrogène (H₂) en électricité, en utilisant un procédé électrochimique contrôlé (au lieu d'une réaction thermique de combustion, dont le travail mécanique engendré est ensuite converti en électricité).

Les piles à combustible sont présentées comme l'énergie de demain, en parallèle avec l'hydrogène. Pourtant, elles ne sont pas une technologie nouvelle, puisque leur principe de fonctionnement a été découvert en 1839...

Parmi l'ensemble des secteurs incriminés dans les problèmes d'environnement, l'automobile est régulièrement citée notamment que le nombre de véhicules en circulation ne cesse d'augmenter et était de plus de 850 millions d'unité dans le monde en 2005. Les véhicules électriques à pile à combustible présentent une solution prometteuse dans ce domaine avec la propulsion dite « zéro émission » qui est envisageable avec eux. Outre le rendement des véhicules électriques est très élevé par rapport à celle des véhicules thermiques sans oublier de citer le silence aboutit avec eux surtout dans les zones urbains

Les objectifs de ce travail sont de modéliser une chaîne de traction de véhicule à pile à combustible pour des applications dans le domaine des transports. A cet effet nous avons décomposé notre travail en quatre chapitres.

Le premier chapitre présente l'état de l'art des piles à combustible : son histoire, son principe de fonctionnement, sa construction, ses types, ses applications, ses avantages et ses inconvénients.

Le deuxième chapitre contient une étude bibliographique sur les véhicules électriques : historique, Principe de fonctionnement, constitution, Technologie, architecture d'un système de traction de véhicule électrique.

Le troisième chapitre sera consacré pour la modélisation et dimensionnement du stack à pile à combustible avec la modélisation statique de la pile à combustible (PEMFC), la détermination du nombre des cellules, la détermination de la surface des cellules et en fin la modélisation dynamique de la pile à combustible (PEMFC).

Au quatrième chapitre, nous allons modélisé notre véhicule électrique à piles à combustible, les différents convertisseurs statiques (modélisation, choix de la stratégie de commande) et on se termine par la mise en place d'un simulateur global de la chaîne de traction et faire une simulation sur un parcours choisi.

1.1. Introduction :

Une pile à combustible est un générateur (dispositif électrochimique) qui convertit directement l'énergie interne d'un combustible en énergie électrique avec dégagement de la chaleur, en utilisant un procédé électrochimique contrôlé (au lieu d'une réaction thermique de combustion, dont le travail mécanique engendré est ensuite converti en électricité). Les rendements théoriques attendus sont très élevés, et les sous-produits très peu polluants. Ces arguments, généralement admis par l'ensemble de la communauté scientifique, en font une alternative très probable au moteur thermique (essence, diesel), pour la plupart de ses applications. Elle met en jeu, sans les mélanges incombustibles (hydrogène, méthanol, monoxyde de carbone ...) et un comburant (généralement de l'oxygène pris dans l'air).

Lorsqu'en 1802 Sir Henry David énonce le principe de l'électrolyse inverse, il met en évidence la possibilité de produire de l'électricité et de la chaleur à partir de la réaction chimique entre l'oxygène et l'hydrogène. Partant de ce procédé, Sir William Grove expérimenta en 1839 la première pile à combustible produisant de l'électricité, de la chaleur et un produit de réaction, l'eau. Depuis cette découverte, différents types de piles à combustible ont été inventés fonctionnant à des températures pouvant aller de quelques dizaines de degrés Celsius à plus de 1000 °C, selon l'électrolyte utilisé.

1.2. Historique :

Le principe de la pile à combustible fut découvert en 1802 par l'anglais Sir Henri David, qui démontra d'une manière conceptuelle la possibilité de générer l'électricité à partir de l'électrolyse inverse de l'eau. C'est un peu avant 1840 que William GROVE décrit la première pile à combustible. Elle fonctionne à l'hydrogène et à l'oxygène, à basse température, avec des électrodes de platine et de l'acide sulfurique comme électrolyte.

Cependant, la principale matière première énergétique étant, au siècle dernier, le charbon, celui-ci sera rapidement utilisé comme combustible pour la mise au point des piles. Dès 1855 de nouveaux concepts, à haute température, utilisant des électrolytes fondus, sont mis au point. Les résultats sont modestes et en 1939, le bilan du premier siècle de recherche est plutôt pessimiste, malgré les potentialités indéniables de la filière hydrogène.

Après 1945, trois groupes de recherche (aux Etats Unis, en Allemagne et en URSS) reprennent les études sur les principaux types de générateur, en apportant les améliorations technologiques nécessaires à un développement " industriel ". Ces travaux ont débouché sur

les concepts actuels, notamment chez Siemens et Pratt and Whitney (aujourd'hui dans le même groupe que International Fuel Cell).

Les premières applications des piles à combustible sont les programmes spatiaux. Ce fut d'abord la NASA qui les utilisa pour ses engins spatiaux dans les années 60: les piles servaient de générateur pour les véhicules spatiaux habités Gemini en 1963 (piles de type PEMFC de General Electric) et Apollo en 1968 (piles AFC de Pratt et Whitney). Ayant prouvé leur efficacité, les piles sont toujours employées dans les navettes américaines.

L'un des moments clefs du développement des recherches sur les piles à combustible est le premier choc pétrolier de 1973. Pour la première fois apparaît la nécessité d'être indépendant sur le plan énergétique. Ceci accélère les recherches tant aux Etats-Unis qu'en Europe et au Japon. Les recherches menées pendant cette période seront essentiellement fondamentales et viseront à développer et améliorer les différents composants de la pile. En 1970, il a été mis au point la membrane Nafion, qui sert d'électrolyte aux piles de type PEMFC.

Les choix des années 80, malgré quelques réussites, les piles restent à cette époque coûteuse, de faible durée de vie, avec un volume et un poids trop importants pour être insérées dans un véhicule. Pour ces raisons, les travaux ralentissent ; en France : seule une veille technologique ainsi que des travaux universitaires sont maintenus. En revanche, les Etats Unis, le Japon et l'Allemagne ont poursuivi leurs recherches. Les PEMFC ont connu un développement accentué après 1987 avec la création de la firme canadienne Ballard.

C'est réellement au début des années 1990 que les piles connaissent un regain d'intérêt. Cela est dû à plusieurs facteurs déterminants. L'aggravation des problèmes environnementaux liés à l'effet de serre, les progrès technologiques et les premiers prototypes (véhicules, installations stationnaires) sont développés. Les PEMFC qui peuvent être utilisées dans des applications stationnaires, portables et mobiles bénéficient ainsi d'une certaine synergie.

En Amérique du Nord, dans le secteur de l'automobile, des associations d'entreprises sont créées (U.S. Fuel Cell Council, California Fuel Cell Partnership). Les piles bénéficient aussi de subventions par les pouvoirs publics, de programmes pour les développements d'énergies propres : le programme PNGV (Partnership for a new Generation Vehicle) regroupant entre autres Daimler Chrysler et Ford vise à mettre au point des véhicules à faible consommation et

un véhicule à pile alimenté à l'hydrogène. Du côté des applications stationnaires, des installations de forte puissance (plusieurs MW) sont mises en place pour la production décentralisée mais aussi pour la cogénération.

Au Japon, Soutenu par le MITI (Ministry for International Trade and Industry) et par l'AIST (Agency of Industrial Science and Technology), les programmes ont commencé en 1981 avec le programme Moonlight, suivi dès 1992 du programme New Sunshine. Beaucoup d'installations stationnaires sont implantées au Japon, tant pour la cogénération que pour la production centralisée d'électricité : c'est au Japon que se trouve la plus grosse installation (11 MW). Le secteur automobile est présent, Toyota ayant lancé fin 2002 un programme pour vendre des véhicules aux universités, et aussi aux ministères.

En Europe, le programme Eureka est lancé en 1991 : il vise à construire un bus basé sur une pile AFC et fonctionnant à l'hydrogène. En 1994, les premières installations stationnaires de cogénération sont mises en place en Allemagne. Parallèlement, Daimler construit son premier véhicule avec pile embarquée la NECAR. L'Europe se lance alors plus concrètement dans la technologie des piles avec les programmes JOULE, THERMIE et BRITE-EURAM dans le cadre du 4ème plan cadre (1994-1998). Ce sont surtout les piles PEMFC qui profitent de ces subventions, suivies par les SOFC, MCFC et DMFC. Le 5ème plan cadre (1998-2002) poursuit sur cette lancée : 10 nouveaux projets, sont lancés bénéficiant de subventions.

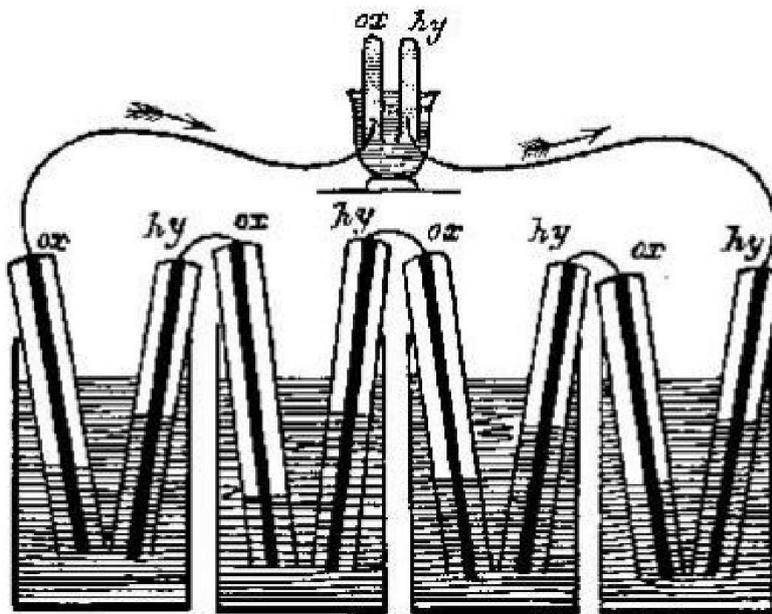


Fig. I.1: L'expérience de Sir William Grove /ClubPac/. [1]

1.3. Principe de fonctionnement :

Le principe de base de fonctionnement de la pile à combustible repose sur celui de l'électrolyse inverse de l'eau. Les combustibles utilisés sont l'hydrogène pur ou les hydrocarbures. Pour pouvoir utiliser des combustibles de type méthane ou autres alcools, il faudrait des températures de fonctionnement élevées. Pour cette raison, on privilégie l'emploi de l'hydrogène pur pour les piles à combustible fonctionnant à basse température, les carburants traditionnels s'avérant trop peu réactifs à ces températures.

Une pile à combustible est constituée d'un empilement d'éléments anode-électrolyte-cathode qu'on nomme cellule Fig.I-1. Cet empilement est contenu entre deux plaques bipolaires qui, par un système de rainure, assurent une arrivée des gaz combustible et comburant de manière homogène sur toute la surface des électrodes.

L'hydrogène entre dans la pile du côté de l'anode et l'oxygène du côté de la cathode. Les gaz sont amenés sur les électrodes par des couches de diffusion, hydrophobes et conductrices qui permettent d'une part l'alimentation en gaz sur toute la surface des électrodes et d'autre part un contact électrique entre la couche réactive et la plaque bipolaire [2].

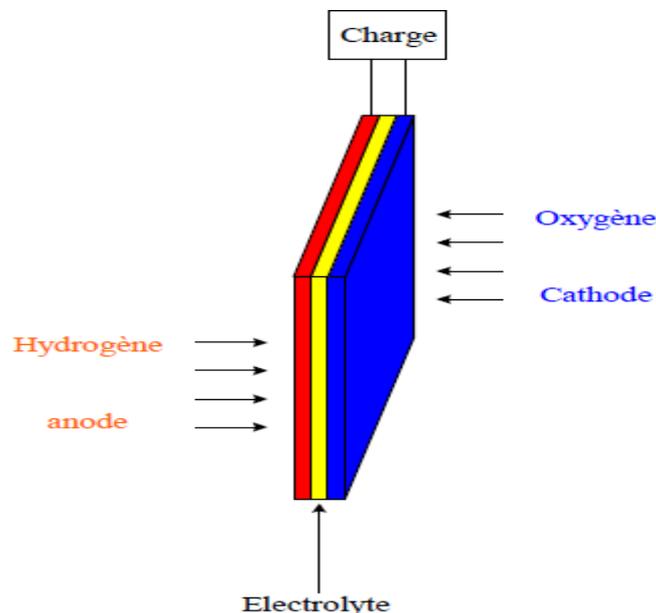


Fig. I.1: Représentation schématique d'une cellule de pile à combustible [3]

1.4. Différents types des piles :

Notre étude portant sur l'application de la pile à combustible dans un véhicule électrique. Le niveau de température ainsi que la gamme de puissance ont justifié le choix de type de pile PEMFC dans cette application.

En règle générale, les piles à combustible sont classifiées selon le type d'électrolyte utilisé, à l'exception des piles de type DMFC (Direct Methanol Fuel Cell) qui n'est autre qu'une pile PEM utilisant du méthanol comme carburant qui est directement envoyé à l'anode. La deuxième caractéristique utilisée pour classifier les piles à combustible est leur température de fonctionnement. On distingue six types les plus utilisés au stade de recherche et développement ou au stade de l'industrialisation qui sont :

- Les piles à membranes polymère échangeuse de protons (**PEMFC** Proton Exchange Membranes Fuel Cell)
- Les piles au méthanol direct (**DMFC** Direct Methanol Fuel Cel)
- Les piles à acide phosphorique (**PAFC** Phosphoric Acid Fuel Cell)
- Les piles alcalines (**AFC** Alkaline Fuel Cell)
- Les piles à oxydes solides (**SOFC** Solid Oxide Fuel Cell)
- Les piles à carbonates fondus (**MCFC** Molten Carbonate Fuel Cell)

La Fig. I-2 donne la classification des différentes piles à combustible selon leur puissance électrique, leur rendement et leurs applications.

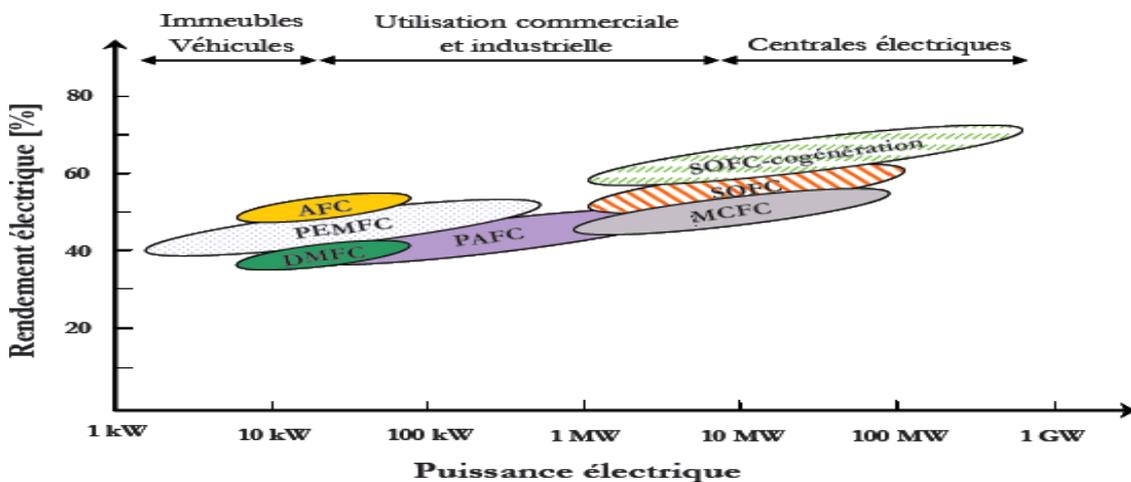


Fig. I-2 : Classification des piles à combustibles selon la puissance et le rendement électrique

Le Tableau .1.1 décrit les six grandes catégories, leurs caractéristiques techniques et leurs applications. [1,2, 9].

Type de pile	AFC	PEMFC	DMFC	PAFC	MCFC	SOFC
Nom	Alcalin Fuel Cell	Polymer Exchange Membran Fuel Cell	Direct Methanol Fuel cell	Phosphoric Acid Fuel Cell	Molten Carbonate Fuel Cell	Solid Oxid Fuel Cell
Electrolyte	Solution KOH	Membrane polymère conductrice de protons	Membrane polymère conductrice de protons	Acide phosphorique	Li ₂ CO ₃ et KCO ₃ fondu dans une matrice LiAlO ₂	ZrO ₂ et Y ₂ O ₃
Ions dans l'électrolyte	OH ⁻	H ⁺	H ⁺	H ⁺	CO ₃ ²⁻	O ²⁻
Niveau de température	60-80°C	60-100°C	60-100°C	180-220°C	600-660°C	700-1000°C
Combustible	H ₂	H ₂ (pur ou reformé)	Méthanol	H ₂ (pur ou reformé)	H ₂ (pur ou reformé)	H ₂ (pur ou reformé)
Oxydants	O ₂ (pur)	Air	Air	Air	Air	Air
Domaines d'application	Spatial	Automobiles, Portable, Cogénération, Maritime	Portable	Cogénération	Cogénération Production centralisée d'électricité, Maritime (?)	Cogénération Production centralisée d'électricité Automobile (APU), Maritime (?)
Niveau de développement	Utilisée	Utilisé	Prototypes	Technologie mûre	Prototypes	Prototypes

Tableau (1.1): Description des six grandes catégories des piles à combustible [1, 2, 4].

La figure (Fig.I.5) présente les réactions à l'anode et à la cathode. Les PAC sont groupées en fonction du type d'ion qui assure le transfère de charge.

Systèmes	Anode	Electrolyte	Cathode	Température
AFC	$H_2 + 2(OH)^- \rightarrow 2H_2O + 2e^-$	$\leftarrow OH^- \leftarrow$	$\frac{1}{2} O_2 + H_2O + 2e^- \rightarrow 2(OH)^-$	60-80 °C
PEMFC PAFC DMFC	$H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$	$\rightarrow H^+ \rightarrow$	$\frac{1}{2} O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2O$	60-220 °C
MCFC	$H_2 + CO_3^{2-} \rightarrow H_2O + CO_2 + 2e^-$ $CO + CO_3^{2-} \rightarrow 2CO_2 + 2e^-$	$\leftarrow CO_3^{2-} \leftarrow$	$\frac{1}{2} O_2 + CO_2 + 2e^- \rightarrow CO_3^{2-}$	600-660 °C
ITSOFC SOFC	$H_2 + O^{2-} \rightarrow H_2O + 2e^-$ $CO + O^{2-} \rightarrow CO_2 + 2e^-$ $CH_4 + 4O^{2-} \rightarrow 2H_2O + CO_2 + 8e^-$	$\leftarrow O^{2-} \leftarrow$	$\frac{1}{2} O_2 + 2e^- \rightarrow O^{2-}$	600-1000 °C

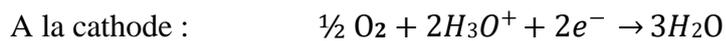
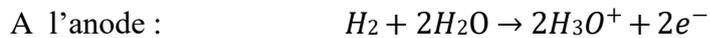
Fig.I.5: réactions chimiques des différents piles. [5]

1.4.1. Les piles à combustible à Basse Température :

On distingue quatre types qui sont : PEMFC, DMFC, PAFC et AFC

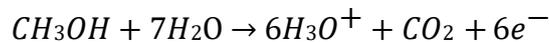
1.4.1.1. Pile à membrane à électrolyte polymère (PEMFC)

C'est la technologie la plus prisée surtout après l'avènement des membranes Nafion au début des années 80. Elle fonctionne à des températures basses (80°C) de façon à maintenir l'eau à l'état liquide dans la membrane. Cette dernière permet le passage des protons H⁺, un catalyseur à base de platine est utilisé aux électrodes, cependant, le monoxyde de carbone peut être absorbé sur ce catalyseur. Quant aux plaques bipolaires, elles peuvent être conçues de trois manières différentes à savoir en composite, en métal ou en graphite. La PEMFC présente une densité de puissance élevée, un poids léger et un volume faible. Pour fonctionner, cette technologie nécessite seulement de l'hydrogène et de l'oxygène provenant de l'air [53] [54]. Les réactions qui se produisent à l'anode et à la cathode sont les suivantes :

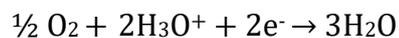
**1.4.1.2. Pile à méthanol direct (DMFC)**

Une pile qui utilise du méthanol et l'eau comme combustible directement sur l'anode. Elle utilise un électrolyte polymérique échangeur d'ions qui se présente sous forme de membrane. Le catalyseur à l'anode est composé d'un mélange de ruthénium et de platine qui empêche l'empoisonnement par le monoxyde de carbone. Les plaques bipolaires sont, quant à elles, faites de graphite, de métal ou de composite [57] [58]. Les réactions qui se produisent à l'anode et à la cathode sont les suivantes :

A l'anode :



A la cathode :



1.4.1.3. Pile à acide phosphorique (PAFC)

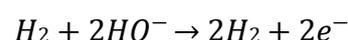
C'est une pile généralement réservée aux applications stationnaires, d'où un développement et une commercialisation plus importants comparés aux autres technologies de piles. Il existe déjà des centrales électriques installées dans le monde et qui fournissent des puissances entre 5 et 20 MW [56]. L'électrolyte est de l'acide phosphorique sous forme liquide. L'acide est généralement stabilisé dans une matrice à base de SiC. La forte concentration en acide augmente la conductivité de l'électrolyte et réduit la corrosion du support des électrodes en carbone. Le catalyseur est à base de platine. Les plaques bipolaires sont deux plaques poreuses séparées par une mince feuille de graphite pour former un substrat dans lequel l'électrolyte est stocké.

1.4.1.4. Pile alcaline (AFC)

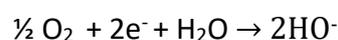
Les piles alcalines sont les piles à combustible développées au début des années 60 pour alimenter la navette spatiale Apollo. Elle utilise un électrolyte liquide, en général de l'hydroxyde de potassium (KOH) qui a l'avantage d'accélérer la réduction de l'oxygène. Cependant, elle ne travaille correctement que lorsqu'elle utilise de l'hydrogène et de l'oxygène purs. En effet, lors de l'utilisation d'air ou d'hydrogène réformé, le dioxyde de carbone contenu dans ces derniers réagit avec l'électrolyte KOH et forme du carbonate de potassium, ce qui réduit la mobilité des ions. Cette pile a l'avantage d'utiliser une grande variété de catalyseurs et présente le meilleur rendement de toutes les piles à combustible.

Les réactions qui se produisent à l'anode et à la cathode sont les suivantes :

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



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



1.4.2. Piles à combustible à haute température

On distingue deux types qui sont : MCFC et SOFC

1.4.2.1. Pile à carbonate fondu (MCFC)

Elles sont des piles de seconde génération, car sont apparues bien après les piles fonctionnant à basses températures. Ces piles fonctionnent à des températures élevées (600°C à 700°C) ce qui améliore la cinétique de la réaction de réduction de l'oxygène et rend inutile l'utilisation de métaux nobles comme catalyseurs. Les systèmes à base de piles MCFC peuvent atteindre des

rendements électriques supérieurs à 50%. De plus, elles peuvent utiliser une large gamme de carburant, grâce au reformage interne et ne sont pas sensibles à la contamination par CO ou CO₂ comme c'est le cas pour les piles à basses températures.

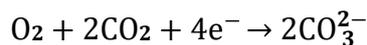
L'électrolyte est constitué d'un mélange de carbonates de métaux alcalins (carbonates de lithium, de potassium et de sodium) retenu par une matrice céramique d'oxyde d'aluminium et de lithium (LiAlO₂). Les plaques bipolaires sont faites d'acier inoxydable recouvert de nickel. Le choix des matériaux est important, en raison de la température de fonctionnement élevée et de la nature hautement corrosive de l'électrolyte [55].

Les réactions ayant lieu dans ce type de piles sont les suivantes:

À l'anode, avec un catalyseur fait d'un alliage nickel-chrome / nickel-aluminium, on a la réaction:



Et à la cathode, avec un catalyseur d'oxyde de nickel, on a:



1.4.2.2. Pile à oxyde solide (SOFC)

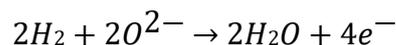
La caractéristique principale de cette pile est qu'elle fonctionne à haute température qui est de l'ordre de 650°C à 1000°C.

Pour cela, c'est une pile généralement exploitée en cogénération et destinée à la production d'électricité décentralisée pour des gammes de puissances allant de 1 kW à quelques dizaines de MW. L'utilisation directe d'hydrocarbures facilement reformés, en se passant de catalyseur à base de métaux nobles, est la conséquence du fonctionnement à hautes températures.

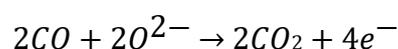
L'électrolyte est solide, habituellement du Zircon (Zr₂) dopé avec de l'ytterbium (Y³⁺), lequel joue le rôle de conducteur pour l'anion oxygène (O²⁻). Contrairement aux autres technologies, la pile à oxyde solide peut être de forme tubulaires ou planaires [6].

Les réactions mises en jeu sont les suivantes:

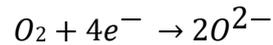
À l'anode, avec un catalyseur au cermet de zirconium et nickel on a la réaction:



Ou :



Et à la cathode, dans les deux cas, à l'aide d'un catalyseur au manganite de luthane dopé au strontium, on a la réaction:



1.5. Constitution d'une pile à combustible PEMFC:

Une pile à combustible est constituée d'un empilement de cellules qui forment un 'stack'. Ces cellules élémentaires sont constituées de l'ensemble électrode-membrane-électrode (EME) figure (1.3).

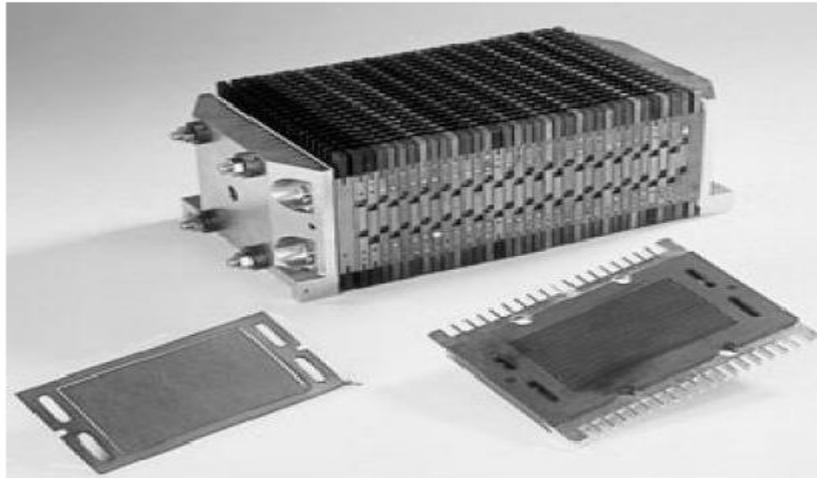


Figure (I.6) : 'Stack' d'une pile à combustible de type PEMFC [1, 8]

La figure suivante représente la structure d'une cellule et d'un empilement.

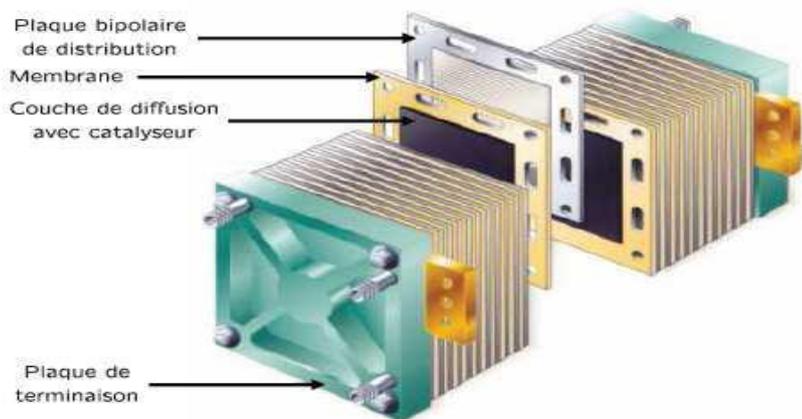


Figure (I.7) : Structure d'un empilement des cellules PEMFC [Electro Encyclo] [4]

Cette figure met en évidence trois éléments constitutifs d'une cellule : L'électrolyte (la membrane dans le cas de la PEMFC), les électrodes (Anode, Cathode) et les plaques.

1.5.1. Membranes polymères ioniques:

Les membranes conductrices protoniques constituent le cœur des piles à combustible de type PEMFC. Leur importance est évidente, puisque ce sont leurs propriétés de conduction

qui vont conditionner la recombinaison électrochimique de l'hydrogène avec l'oxygène, et donc ses performances. Les chutes ohmiques limitent le fonctionnement à hautes densités de courant et sont principalement associées aux membranes (la résistance de la membrane étant liée au rapport épaisseur sur conductivité protonique). De plus, ces dernières doivent présenter de bonnes propriétés de résistance mécanique et chimique dans les conditions de fonctionnement, ne pas être perméables aux gaz et maintenir une teneur en eau levée à haute température car cela conditionne les propriétés de conduction.

Les membranes possèdent dans leurs structures polymérisées des groupements acides échangeurs de protons (d'où leur nom de Proton Exchange Membrane : PEM), généralement de terminaison -SO₃H ou COOH, permettant le transfert des protons de l'anode vers la cathode. [4].

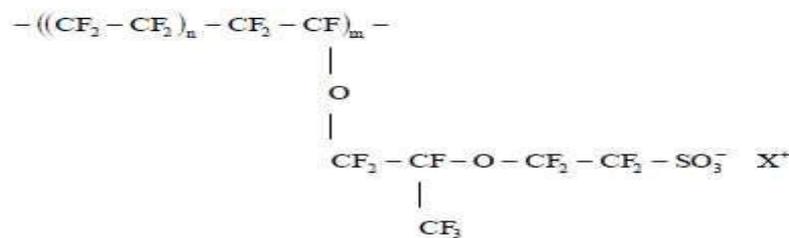


Figure (I.8) : Structure chimique d'une membrane de type Nafion.

L'épaisseur de la membrane polymère échangeuse d'ions, généralement comprise entre 50 et 150 μm, résulte d'un compromis entre ces divers paramètres : les caractéristiques mécaniques, la conductivité ionique, la perméabilité des gaz, les caractéristiques d'hydratation et le coût de fabrication.

Les premières membranes à base de copolymère de di- vinyl-benzène permettant la réalisation de pile, ont été définitivement remplacées par des membranes ioniques à structure perfluorée (type Teflon : membranes commercialisées par différentes sociétés telles que Dow Chemical, Asahi Chemical ou Asahi Glass, Dupont de Nemours et plus récemment, Gore).

Cette membrane est ensuite associée à deux électrodes une sur chaque face pour permettre l'alimentation en gaz et favoriser la réaction chimique. [4]

1.5.2. Les électrodes :

Ils sont le siège des réactions d'oxydoréduction, de plus ils ont une triple fonction:

- Supporter le catalyseur finement divisé et permettre son contact avec les gaz.

- Permettre aux espèces protoniques de se déplacer depuis les sites catalytiques d'oxydation de l'hydrogène vers les sites où l'oxygène est réduit grâce à la présence de polymère ionique.
- Evacuer les électrons des sites catalytiques anodiques et redistribuer ces électrons sur les sites catalytiques cathodiques [1, 2].

1.5.3. Catalyseur :

Le catalyseur est un métal utilisé pour catalyser (accélérer) la réaction électrochimique au niveau des électrodes, de plus, pour résister durablement la corrosion (dissolution) dans cet environnement chimique très acide. C'est pour cela, le métal le plus utilisé est du platine (métal noble) pur ou allié à un élément de transition (Cr, Mn, Ni, Co, Fe). [1, 2, 7]

1.5.3.1. Les catalyseurs du côté anode :

Pour les piles de basse et moyenne température, on utilise des métaux précieux: platine Pt, rhodium Rh, ruthénium Ru ou palladium Pd ; ou du Nickel de Raney. Les métaux précieux sont répartis sur les électrodes en charbon actif à très grande surface spécifique (noir d'acétylène). Actuellement on utilise surtout du platine : celui-ci est réparti sous forme de particules de faible taille (2 nm). La réaction de dissociation de l'hydrogène est assez complexe.

Ces électrodes sont très sensibles au CO (elles ne supportent pas plus de 100 ppm) et au soufre, ce qui constitue un vrai problème si on utilise de l'hydrogène issu du reformage: on assiste alors à une diminution de la densité de courant surfacique et donc de la puissance.

De nombreux travaux portent actuellement sur le remplacement du platine jugé trop cher ou la diminution de la quantité nécessaire : alliages de platine (Pt/Ru, Pt/Mb, Pt/Sn), terres rares... Pour les piles de haute température, on peut utiliser des métaux moins chers (Fer, Nickel, Cobalt) et on n'a pas de problème d'empoisonnement au CO. [7]

1.5.3.2. Les catalyseurs du côté cathode :

Pour les piles de basse et moyenne température, on utilisera aussi des métaux précieux et certains métaux de transition usuels (Chrome, Nickel), ou bien du charbon actif avec de l'or ou de l'argent. Pour les piles de haute température, on peut utiliser soit du Nickel fritté ou des oxydes mixtes. La réaction de l'oxygène est aussi assez complexe.

Ces électrodes sont assemblées puis collées de part et d'autre de la membrane par pressage à chaud. L'ensemble électrode membrane électrode (EME) a une épaisseur inférieure au millimètre. Cet ensemble EME est intégré entre deux plaques bipolaires. [7]

1.5.4. Les plaques bipolaires :

Ces plaques sont accolées aux supports d'anode et de cathode. Elles ont plusieurs rôles:

- Canaliser les gaz venant de l'extérieur,
- Collecter les électrons (le courant),
- Gérer les flux d'eau.

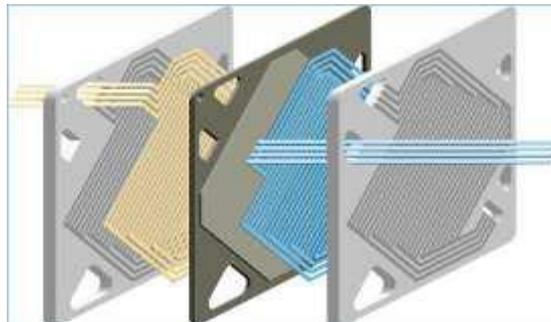


Figure (I.9) : Plaque bipolaire [1, 2]

Les matériaux des plaques bipolaires doivent donc posséder un niveau de conductivité électrique suffisant (supérieur à 10 siemens/cm), une imperméabilité au gaz supérieure à celle de la membrane échangeuse de protons et une bonne inertie chimique vis-à-vis des fluides présents dans le cœur de pile (eau, acide, oxygène...).

Les plaques les plus courantes sont réalisées en graphite et les canaux de distribution des gaz sont obtenus par usinage. Ces plaques, sont disponibles commercialement mais à des prix très élevés, essentiellement dus à la phase d'usinage, en permettent pas d'envisager une utilisation industrielle. Pour réduire ce coût, deux autres types de plaques bipolaires ont été mis au point. Ce sont :

Les plaques bipolaires à base de composites organiques. Ces plaques reposent sur l'utilisation de charges (carbone, graphite...) dispersées dans un matériau thermoplastique ou thermodurcissable. Ces charges vont donner aux plaques bipolaires la conductivité électrique nécessaire à la collecte du courant et le liant polymère leur bonne tenue mécanique nécessaire à l'assemblage des différents éléments. L'intérêt majeur réside d'une part dans le faible coût des

matières de base et d'autre part dans le fait que les canaux de distribution peuvent être obtenus directement par moulage du polymère chargé sur une empreinte sans phase ultérieure d'usinage.

Les plaques bipolaires à base de métaux et alliages, et particulièrement les aciers inoxydables. Celles-ci présentent un ensemble de propriétés (tenue mécanique, étanchéité, conductivité électrique, aptitude à la mise en forme et l'assemblage par des procédés de production de masse) qui en font des candidates de choix pour la conception et la réalisation de plaques bipolaires compactes, légères et bon marché. Leur densité supérieure à celle du graphite impose de les utiliser sous forme de feuilles minces, facilement mises en forme par emboutissage. Dans ces conditions, l'évacuation des calories et le contrôle de la température du module en fonctionnement peuvent être assurés avec précision par circulation d'un fluide de refroidissement interne. [4]

1.6. Caractéristique électrique :

La caractéristique électrique d'une pile à combustible est déterminée par le nombre de cellules en série, définissant la tension totale et par la taille de la surface active, déterminant le courant délivré. Les caractéristiques électriques d'une cellule de pile à combustible basse température sont décrites à la Figure (I.10). La tension à vide dite (tension de Nernst) est d'environ 1,23 V. Lorsque la densité de courant augmente, les pertes sont plus importantes (pertes d'activation et ohmique) : la tension diminue. Pour de fortes densités de courant, la tension chute rapidement (pertes de concentration).

1.6.1. Tension de Nernst :

C'est le potentiel d'équilibre thermodynamique défini en utilisant l'équation de Nernst.

$$E_{Nernst} = \frac{\Delta G}{2.F} + \frac{\Delta S}{2.F} (T - T_{ref}) + \frac{R.T}{2.F} [\ln(P_{H_2}) + \frac{1}{2} \ln(P_{O_2})] \tag{1.4}$$

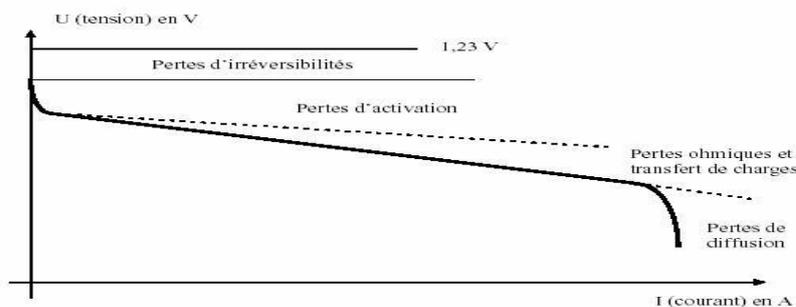


Figure (1.10) : Caractéristiques courant - tension d'une pile à combustible [1,2]

En accord avec l'équation de Nernst pour la réaction de l'hydrogène, le potentiel idéal d'une pile à une température donnée peut être augmenté augmentant la pression des réactifs. Et on observe en effet des améliorations dans les performances des piles à haute pression.

Les pertes, appelées souvent polarisation, proviennent principalement de trois sources: la polarisation d'activation, la polarisation ohmique, et la polarisation de concentration. Ces pertes entraînent, pour une pile de potentiel idéal E_{Nernst} , une chute de la tension : $V = E_{Nernst} - \text{pertes}$.

1.6.2. Polarisation d'activation :

La polarisation d'activation est présentée quand le taux d'une réaction électrochimique à la surface de l'électrode est contrôlé par le ralentissement de la cinétique pour cette électrode. En d'autres termes, la polarisation d'activation est directement reliée au taux de la réaction électrochimique. Dans les deux cas, pour qu'une réaction chimique ou électrochimique puisse démarrer, les réactifs doivent dépasser une barrière d'activation. Dans le cas d'une réaction électrochimique les pertes d'activation (η_{act}) sont supérieures à 50-100 mV. [1, 2]

1.6.3. Polarisation ohmique :

Les pertes ohmiques sont dues à la résistance que rencontre le flux d'ions en traversant l'électrolyte et à la résistance que rencontrent les électrons dans les électrodes et le circuit électrique. Les pertes ohmiques sont principalement dues à l'électrolyte et peuvent être réduites en diminuant l'épaisseur de l'électrolyte et en améliorant sa conductivité ionique. L'électrolyte et les électrodes obéissant à la loi d'Ohm. [1, 2]

1.6.4. Polarisation de concentration :

Lorsque, à une électrode, il y a une perte de potentiel dû à l'incapacité du système à maintenir la concentration initiale des réactants, on a alors la formation d'un gradient de concentration. De nombreux facteurs peuvent contribuer à la polarisation de concentration: la faible diffusion du gaz à travers les électrodes poreuses, la dissolution des réactants ou des produits dans l'électrolyte, la diffusion des réactifs ou des produits du site de la réaction vers l'électrolyte ou l'inverse. A des densités de courants élevées, la faible vitesse de transport des

réactifs ou des produits vers le site de la réaction est la contribution majeure à la polarisation de concentration. [1,2]

1.7. Les applications des piles à combustible :

La pile à combustible peut être considérée comme un générateur d'électricité portable et autonome, si elle dispose de sa propre réserve de combustible. Elle est donc très sérieusement envisagée comme une candidate alternative aux moteurs thermiques dans la plupart des modes de transports, terrestres ou maritimes.

Produisant électricité et chaleur à parts sensiblement égales, suivant le type de pile (niveau de température), une grande quantité d'applications en cogénération sont considérées comme réalistes, pour des cibles diverses, de l'habitat individuel à tout type de bâtiment collectif ou tertiaire, sans oublier les sites industriels. Au vu des très bons rendements électriques que l'on peut obtenir, il peut même être envisagé, pour des applications statiques, de ne récupérer que le courant produit, notamment dans les zones où, pour des raisons de bruit et de pollution, l'installation de tout autre générateur est exclue. Enfin, comme la pile garde de très bons rendements même au niveau d'une seule petite cellule, il n'est pas exclu de rêver à des micros générateurs portables pour diverses applications exotiques (en substitution des batteries plus ou moins limitées en capacités volumique et massique). [1,2]

Nous présentons ici quatre principaux domaines d'application :

1.7.1. Automobile :

Les véhicules hybrides et les véhicules électriques ; les véhicules particuliers et de golf, les bus (PEMFC, SOFC, AFC).

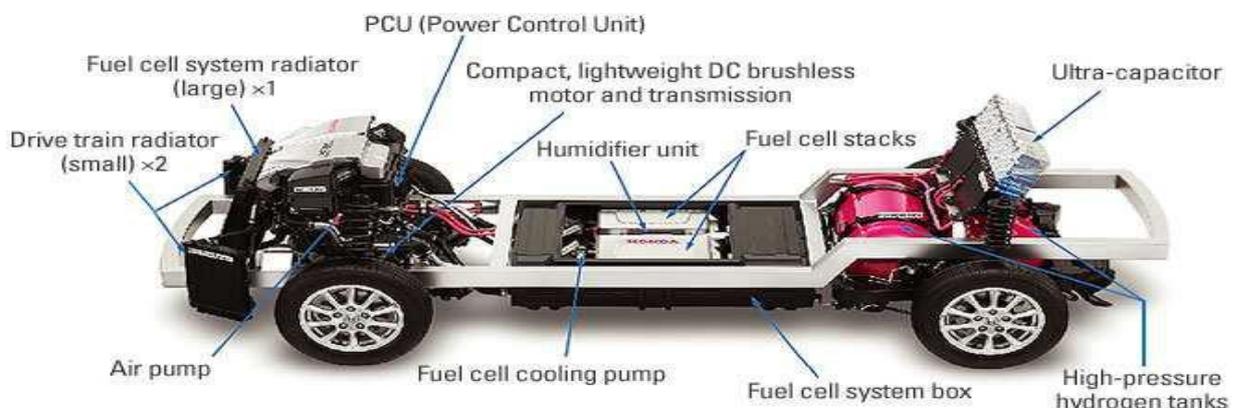


Figure (I.11) : Véhicule Honda équipé d'une pile à combustible et d'un système reformeur d'essence [1, 2]

1.7.2. Stationnaires :

Génération de chaleur et d'électricité (résidentiel, bâtiments publics type piscine, hôpital, école, résidences, générateur de secours).le type de pile le plus testé est PAFC, et aussi la PEMFC.



Figure .I.12 : Un système complet de 250 kW électrique Ballard [2]

1.7.3. Maritimes :

Elles peuvent être utilisées dans des petits bateaux à moteur et même dans des sous-marins. C'est une application relativement peu connue - et peu médiatisée - des piles, mais qui pourrait connaître un développement certain. Les piles les plus utilisées sont PEMFC, MCFC. [2]

1.7.4. Portables :

Téléphone, ordinateur portable, caméra, matériel de camping ou militaire. Les piles utilisées sont seulement PEMFC et DMFC à cause de leur faible température de fonctionnement.



Figure.I.13 : Un système à pile à combustible utilisé pour un téléphone portable [2]

1.8. Architecture du système à pile à combustible :

Comme pour un moteur thermique, divers périphériques sont nécessaires à la mise en œuvre d'un générateur d'énergie à pile à combustible PEM

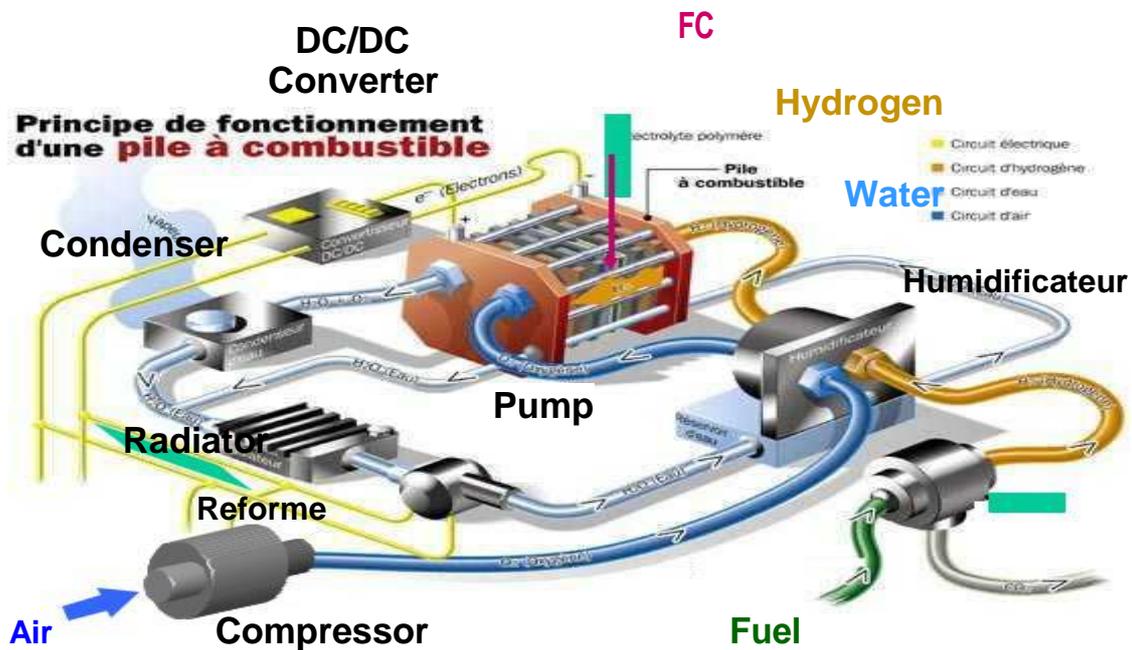


Figure .I.14: Schéma fonctionnel d'un groupe électrogène à pile à combustible.

Un système pile à combustible exige du carburant, de l'oxydant et du liquide réfrigérant afin de fonctionner. Les pressions et les débits du carburant et de l'oxydant doivent être réglés.

En outre, les gaz doivent être humidifiés et la température du système doit être contrôlée. Pour atteindre ceci, un stack de pile à combustible doit être entouré d'un système de fourniture du carburant, un système d'alimentation en air, un système de refroidissement du stack et un système d'humidification.

En fonctionnement, l'énergie produite doit être adaptée pour être utilisée par une charge. Des alarmes doivent arrêter le processus en cas de condition de fonctionnement dangereuse. Un système de mesure de la tension des cellules doit surveiller le fonctionnement du stack. Ces fonctions sont assurées par un système de contrôle.

1.8.1. Configuration système :

Les différents constituants d'un système pile à combustible sont représentés dans la figure (I.14). Comme cette figure l'indique, un système pile à combustible se compose des sous-systèmes

fondamentaux : le stack présenté précédemment, la production du carburant, la gestion de l'air, la gestion de l'eau, la gestion thermique et le système de conditionnement de l'énergie électrique produite. La conception de chaque sous-système est une partie de la conception du système complet et est un élément fondamental de la réalisation de systèmes pile à combustible performants.

1.8.1.1. Gestion de l'air

En plus du carburant, la pile à combustible exige un oxydant, qui est typiquement de l'air. L'air est fourni à la cathode de la pile à combustible à basse pression par un ventilateur ou à haute pression par un compresseur d'air. Le choix entre basse pression et haute pression n'est pas évident. D'une part, l'augmentation de la pression de l'air améliore la cinétique des réactions électrochimiques et mène à une plus grande densité de puissance et à une meilleure utilisation du stack. D'autre part, la puissance exigée pour comprimer l'air réduit la puissance disponible. Une partie de cette énergie peut être récupérée en plaçant une turbine sur la sortie d'air du côté de la cathode. Néanmoins, le compresseur d'air emploie typiquement plus de puissance que n'importe quel autre dispositif auxiliaire dans le système. Actuellement, la plupart des stacks de pile à combustible fonctionnent à une pression comprise entre 1 et 8 atmosphères. Afin d'obtenir des densités de puissance importantes et pour améliorer la gestion de l'eau, la plupart des systèmes développés pour l'automobile à partir de pile PEM fonctionnent à des pressions de 2 à 3 atmosphères. [8]

1.8.1.2. Gestion de l'eau :

L'eau est nécessaire à plusieurs endroits dans un procédé de reformage. Dans les systèmes de pile PEM, les gaz réactifs doivent être humidifiés afin d'éviter de dessécher la membrane. Si de l'eau est fournie au niveau de la réaction, celle-ci n'est pas toujours suffisante et l'air (et parfois l'hydrogène) doit être humidifié. Dans des systèmes autonomes, elle peut être récupérée dans les gaz d'échappement. [8]

1.8.1.3. Gestion thermique :

Un stack de pile à combustible de type PEM produit pratiquement autant d'énergie thermique que d'énergie électrique. Cette énergie thermique peut être employée de différentes manières. Elle peut être utilisée pour préchauffer les gaz dans un système de reformage, transférée extérieurement pour satisfaire les besoins thermiques d'une application particulière ou être rejetée dans l'environnement.

Pour les systèmes de petite puissance (< 200 W), l'air en excès circulant à la cathode est suffisant pour refroidir le système. Pour des systèmes plus importants la circulation d'air, d'eau ou

d'un liquide de refroidissement dans des canaux spécifiques est nécessaire. Avec un liquide de refroidissement, le stack est plus compact. En outre, avec un liquide, il est plus facile de transférer l'énergie thermique vers d'autres applications telles que le chauffage d'espace ou le chauffage d'eau dans des applications de cogénération.

1.8.2. Interfaces externes:

Les interfaces externes du système sont :

- L'atmosphère pour l'arrivée d'air et le refroidissement
- La sortie du détenteur pour l'arrivée d'hydrogène
- La demande de puissance électrique au groupe électrogène
- L'évacuation d'eau, trop-plein réservoir et purge anodique

1.8.2.1. Circuit d'air :

Le circuit d'air comporte séquentiellement, de l'entrée vers la sortie :

- Un filtre
- Un compresseur (vitesse commandée)
- Un évapo-condenseur à parois (flux d'entrée)
- Un séparateur air/eau liquide
- La pile à combustible
- Un deuxième séparateur (pour récupérer l'eau condensée)
- Un évapo-condenseur à parois (flux de sortie)
- Un troisième séparateur (pour récupérer l'eau condensée)
- Une régulation de pression (vanne commandée)

1.8.2.2. Circuit d'humidification :

Ce circuit sert à la récupération de l'eau produite par la pile afin d'humidifier les gaz en entrée.

Il comporte :

- Trois séparateurs pour récupérer l'eau liquide
- Un réservoir
- Une pompe ou un autre dispositif assurant la circulation
- Un évapo-condenseur à parois

1.8.2.3. Circuit de refroidissement :

Ce circuit est fermé et hydrauliquement indépendant des autres circuits. Il comporte :

- Une pompe avec un dispositif de régulation de débit
- Un radiateur
- La pile à combustible (les plaques)
- Un by-pass en parallèle de la pile (vanne commandée)
- Un by-pass en parallèle du radiateur (vanne commandée) [9]

1.8.2.4. Circuit électrique :

Dans les limites du groupe électrogène, ce circuit comporte le branchement des auxiliaires (pompes, ventilateurs, compresseur, hacheur élévateur) sur la pile.

1.9. Les avantages et les inconvénients des piles à combustibles:**1.9.1. Les avantages :**

Les piles à combustibles sont souvent présentées comme la solution du futur dans les domaines de production d'énergie électrique, de l'automobile. Cet attrait est justifié par leurs nombreux avantages [9]:

- De hauts rendements énergétiques.
- De faibles émissions sonores.
- Peu d'émissions (elles dépendent cependant du combustible utilisé).
- Elles sont de construction modulaire.
- Diverses températures de fonctionnement.
- Pas de parties rotatives.

1.9.2. Les inconvénients :

Si les piles sont si intéressantes, pourquoi ne les trouve-t-on pas sur le marché? En fait, il reste de nombreux points faibles qui sont à régler [9] :

- Le coût.
- Le poids et le volume.
- La durée de vie.
- La gestion thermique du module.

1.10. Conclusion :

Les piles à combustible, plus généralement, la “ filière hydrogène ”, est un moyen intéressant de valoriser l’énergie chimique contenue dans divers combustibles, avec un très bon rendement, sous la forme “ noble ” d’énergie électrique.

Les réactions électrochimiques en jeu ne produisent pas d’émissions polluantes, et elles n’émettent ni bruit ni odeur.

Déjà, de nombreuses installations fonctionnent, et des programmes de recherche ambitieux tentent de développer de nouvelles applications, notamment dans le domaine des transports et des applications statiques (production d’énergie électrique, cogénération).

Enfin le développement de sources autonomes d’énergie, notamment pour un véhicule propre et économe, est l’un des enjeux technologiques majeurs du début de ce siècle. L'utilisation d'un moteur électrique, de rendement énergétique élevé, et de fonctionnement silencieux et non polluant, apparaît être une solution idéale, à condition que soient mis au point des générateurs électrochimiques fiables et de faible coût. Si, dans un premier temps, les accumulateurs électriques peuvent jouer ce rôle, leur utilisation est cependant limitée par leur rendement de charge et décharge, le nombre relativement faible de cycles, et surtout le temps et l'installation électrique nécessaires pour leur recharge. Au contraire, les piles à combustible, dont les éléments production d'énergie (cœur de pile) et stockage d'énergie (réservoir de combustible) sont séparés, permettent une utilisation plus souple, similaire à celle des moteurs thermiques actuels, et pourraient donc bénéficier d'un réseau équivalent pour la distribution du combustible.

2.1. Introduction :

Le tout électrique !

Avec une présence importante au début de l'histoire de l'automobile, le véhicule tout électrique est réapparu ces derniers temps comme une solution potentielle au remplacement du véhicule conventionnel. Même s'il n'est pas encore en mesure de s'imposer sur le marché des véhicules particuliers, il reste sans conteste une bonne solution mais à la condition de disposer d'une source d'énergie embarquée performante.

Les véhicules autonomes tout électriques utilisent la seule énergie électrique des batteries. Cette énergie est utilisée pour alimenter un ou plusieurs moteurs électriques de traction.

2.2. Historique :

L'histoire du véhicule électrique commence en Europe au début du 19^{ème} siècle. Après l'invention de la batterie primaire par Volta en 1800 et la démonstration du principe du moteur électrique en 1821 par Faraday, la première voiture électrique a été construite en 1834 à Brandon, en Grande Bretagne, par un mécanicien nommé Thomas Davenport. Le petit véhicule fonctionnait sur une batterie non rechargeable et réussissait à parcourir un court trajet sur rail.

Puis, en 1859, le français G. Planté inventait la batterie secondaire plomb/acide rechargeable et en 1869 Gramme construit le premier moteur électrique à courant continu ayant une puissance de plus d'un cheval.

Douze ans plus tard, en 1881, Gustave Trouvé, réalisait le premier véhicule électrique alimenté par une batterie secondaire. Le véhicule était propulsé par un moteur électrique à courant continu de 0,1 cheval et pesait 160 kg avec son conducteur. Il a été précédé par Sir David Salomons qui construisit un VE avec une batterie rechargeable en 1874. Plus tard, en 1885, les allemands Daimler et Benz inventaient la première voiture à essence.

Les premières réalisations n'ont pas attiré l'attention du public due à leur technologie encore immature qui ne pouvait pas rivaliser avec les voitures à chevaux. Mais, les choses ont vite changé et dans les années qui ont suivi la course était lancée : les véhicules électriques rivalisaient avec les véhicules thermiques mais aussi avec les véhicules à vapeurs. A titre

d'exemple, parmi les automobiles construites en 1900 aux Etats-Unis, 1575 étaient électriques, 1684 à vapeur et seulement 936 à essence [10]

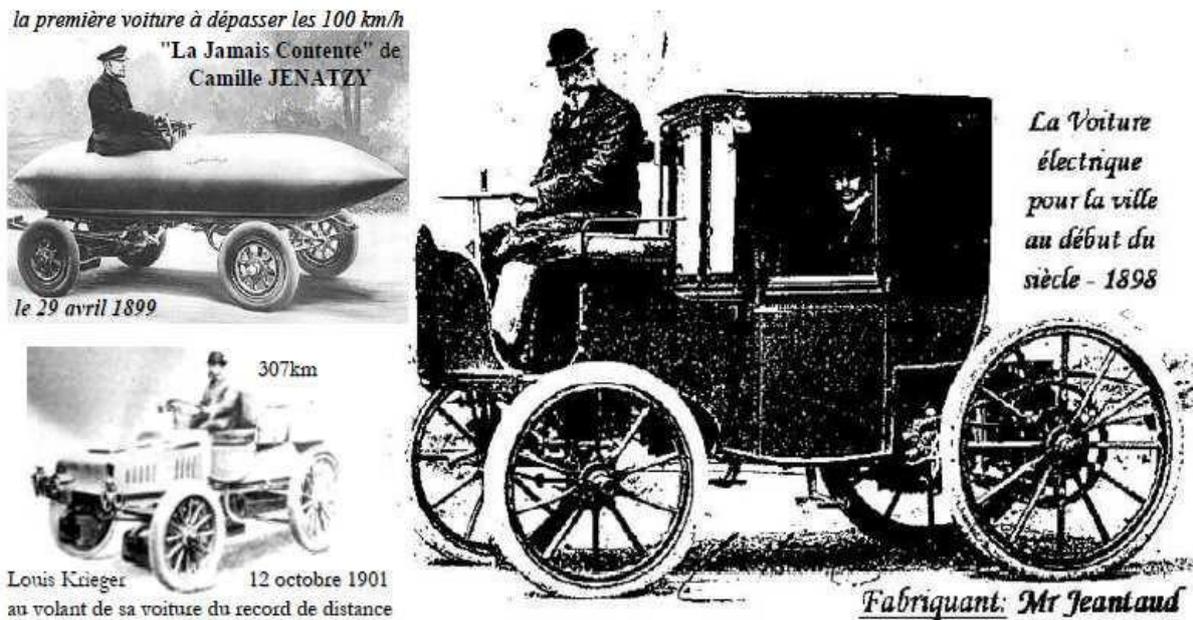


Figure.2.1 : Exemples des voitures électriques du début du 20ème siècle

Sans doute, le début du 20ème siècle a constitué l'âge d'or du VE. En effet, c'est un VE qui pour la première fois a franchi la limite de 100 km/h, le 29 avril 1899, avec le Belge Camille Jenatzy à bord de sa voiture baptisée « La Jamais Contente » en forme d'obus. Ce VE avait deux moteurs entraînant directement les roues arrière, d'une puissance maximale totale de 50 kW (soit 67 chevaux), alimentés par les 80 éléments de la batterie Fulmen pesant près de la moitié du poids total du véhicule de 1,5 tonne.

Deux ans plus tard, le 12 octobre 1901, l'ingénieur français Louis Krieger effectuait, sans recharge, le voyage Paris-Châtelleraut soit 307km à la vitesse moyenne de 17,5km/h. Cette performance lui a valu un statut parmi les plus importants constructeurs de véhicules électriques du début du siècle

Le véhicule électrique était donc bien présent dans le monde de l'automobile. Notamment, à l'occasion de l'Exposition Universelle de Paris, en 1900, la ville est traversée par « des taxis à batteries amovibles, d'élégants et silencieux coupés, des fourgons postaux, des voitures de livraison et des véhicules de pompiers, fonctionnant tous à l'électricité »

Cependant, l'amélioration continue des performances des véhicules à moteur à combustion interne, l'apparition de l'essence bon marché, et la persistance des limites qui affectent la capacité des batteries, font disparaître progressivement les VE du marché. Ainsi, au début des années 30, la production de véhicules électriques est presque complètement interrompue, la période 1921-60 étant dominée par les véhicules à moteur thermique. Dès lors, les VE n'ont connu que des utilisations spécifiques. La dernière production significative de VE, d'un point de vue commercial, a été réalisée autour des années 1905.

De nouvelles possibilités vont apparaître en traction électrique après les années 1945, lorsque les laboratoires Bell inventent le transistor et plus tard, à l'apparition des thyristors capables de commuter des courants et des tensions élevées. Ces découvertes conduisent au développement de l'électronique de puissance qui permet le remplacement des rhéostats et la commande des moteurs à courant alternatif à fréquence variable.

En même temps, dans les années 60-90, à cause de la pollution atmosphérique et surtout des chocs pétroliers des années 70 et 80, de nombreux pays commencent à s'intéresser aux VE. Les recherches sont reprises et le VE commence à réapparaître en petit nombre. L'ère moderne du VE culmine entre les années 80-90 avec quelques véhicules réalisés comme l'EV1 et la Peugeot 106 Electrique. Malgré les progrès, dans les années 90, il devient évident que les véhicules électriques ne peuvent pas rivaliser avec les véhicules conventionnels à cause de leur autonomie et performances insuffisantes. Comme au début du 20ème siècle, le frein à leur développement est, et reste, la source de stockage d'énergie. [10]

2.3. Architecture du véhicule électrique VE :

La solution la plus simple pour réaliser un véhicule électrique est de le construire sur la base d'un véhicule thermique existant, en remplaçant le moteur thermique par un moteur électrique. Cependant, la transmission mécanique peut être simplifiée. La capacité des moteurs électriques à démarrer à couple élevé et de fonctionner sur une large plage de vitesse, comme présentée sur la Figure (2.2), rend possible l'élimination de l'embrayage, voir même de la boîte de vitesses. [11]

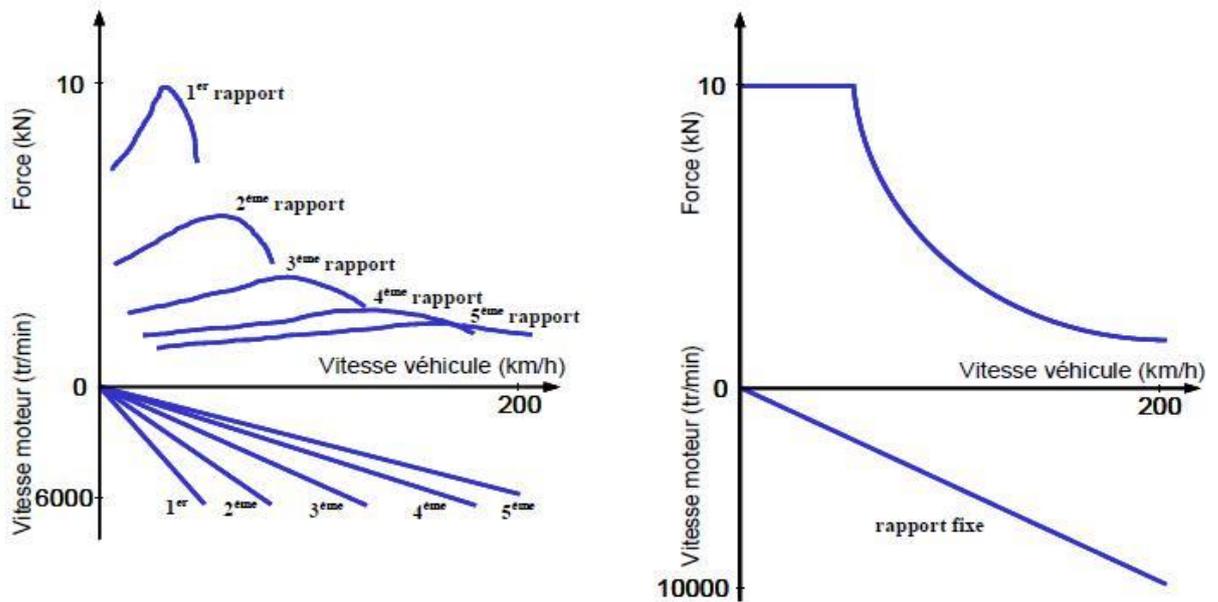


Figure (2.2) : Caractéristiques force – vitesse du véhicule thermique à 5 rapports et du véhicule électrique à rapport fixe

Par contre, comme le couple est une grandeur dimensionnée, l'absence de boîte de vitesse implique un moteur plus lourd, plus encombrant et donc plus coûteux. Aussi, pour réduire la masse embarquée, les VE peuvent être conçus avec un réducteur qui permet au moteur électrique de travailler à grande vitesse. Ce réducteur permet de réduire la taille du moteur grâce à la réduction du couple demandé. Cette chaîne de traction centrée autour d'un seul moteur de traction couplé à un réducteur à rapport fixe représente la solution dite classique pour l'architecture des VE. La chaîne de traction classique d'un VE comprend donc, la source d'énergie, le convertisseur, le moteur électrique, la transmission mécanique englobant le différentiel et les roues. Cette configuration est présentée sur la Figure.2.3. [13]

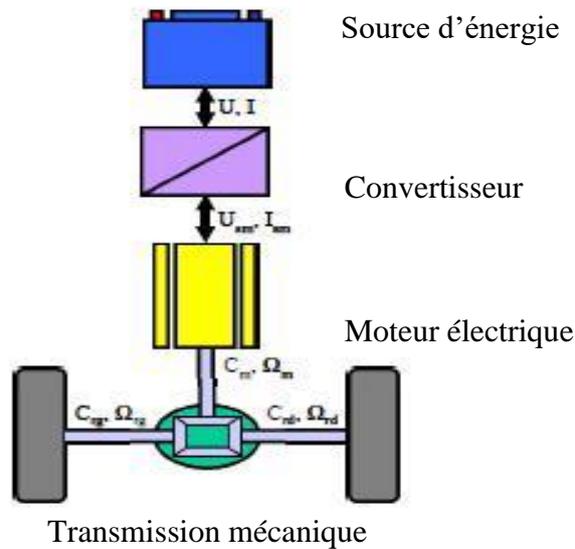


Figure.2.3. Chaîne de traction électrique

2.3.1. Les moteurs roues :

La chaîne de traction tout électrique présentée ci-dessus, peut être encore simplifiée en utilisant un moteur pour chaque roue motrice. Ainsi, le différentiel classique est remplacé par un différentiel électrique réalisé par un contrôle indépendant de chaque moteur.

Dans ce cas, deux configurations sont possibles : soit les moteurs sont fixés au châssis donc suspendu, soit les moteurs sont fixés sur les roues formant ainsi ce qui est connu sous le nom de moteur-roue.

Dans le premier cas la puissance est transmise sur les roues par des cardans. L'avantage de cette configuration est que la suspension isole les roues de la masse du moteur et la conduite du véhicule est plus facile. Dans le deuxième cas où les moteurs et les roues sont confondus la transmission est simplifiée. Mais, pour réduire au minimum les masses non suspendues, les moteurs-roue doivent avoir une forte puissance massique. A cause de ces contraintes, ces derniers sont relativement coûteux limitant leur utilisation.

Concernant les moteurs-roue au moins deux configurations peuvent être envisagés : avec réducteur ou à entraînement direct.

La figure.2.4.a représente un moteur-roue avec réducteur. Le constructeur intègre dans une roue un moteur électrique de traction, un frein à disque et une suspension électronique active située

dans l'axe verticale de la roue. Très compacte, cette architecture nouvelle influe énormément sur celle du véhicule, qui n'a plus besoin de moteur, de boîte de vitesses, d'embrayage, de cardans, d'arbres de transmission mais aussi d'amortisseurs et de barres antiroulis. En plus, elle agit telle une suspension active modifiant à tout instant l'assiette du véhicule pour assurer la tenue de route la mieux adaptée. [13]

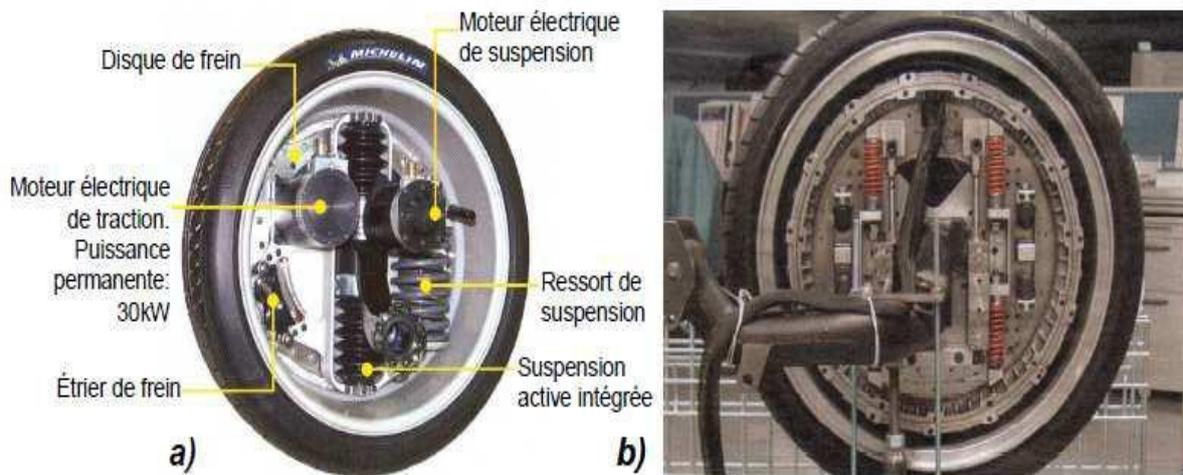


Figure (2.4) : Exemples de roue englobant un moteur-roue : a) Roue active de MICHELIN ; b) Roue motrice nouvelle

La présence d'un réducteur à rapport fixe a permis d'utiliser un moteur ayant un poids extrêmement faible d'environ 5 kg. Cependant, le moteur a besoin d'un système de refroidissement (eau ou air). L'ensemble, avec pneu basse résistance au roulement 195/45 R 17 ou R 18, ne pèse pas plus de 32 kilos

En ce qui concerne le moteur-roue sans réducteur, figure.2.4.b les constructeurs présentent un nouveau concept d'entraînement : un moteur électrique intégré dans la roue et doté d'un système de suspension et d'amortissement. Ils sont parvenus à améliorer la sécurité et le confort en « suspendant » le moteur par quatre ressorts et deux amortisseurs et ainsi résoudre les problèmes de poids des parties tournantes nuisibles à la tenue de route.[13]

2.4. Source d'énergie d'un véhicule électrique :

La question du stockage de l'électricité a mobilisé les scientifiques depuis déjà deux siècles et reste encore l'une des clés de l'évolution du système énergétique en général et du VE en particulier.

Ainsi, si la traction électrique autonome est maintenant disponible, cette technologie bute sur les performances médiocres du stockage de l'énergie par batterie. L'autonomie des VE reste généralement faible, couvrant essentiellement des petits trajets de type urbains. En outre, la recharge des batteries est lente et doit être généralement effectuée la nuit. Ces contraintes d'utilisation ont bloqué le marché du véhicule électrique à moins de 1000 véhicules vendus par an.

Des batteries plus performantes et plus légères arrivent maintenant sur le marché, mais elles sont coûteuses et les progrès sont modestes.

En fait, la pile à combustible remplace la batterie comme élément de stockage avec l'avantage de permettre au FCV une plus grande énergie stockée et donc une plus grande autonomie. Toutefois, si on se reporte à l'énergie initiale produite, le VE à batterie a une autonomie plus que double par rapport au FCV. La Figure 2.5 présente différentes autonomies pour une même énergie initiale, le rendement énergétique de chaque solution crée la différence. [12]

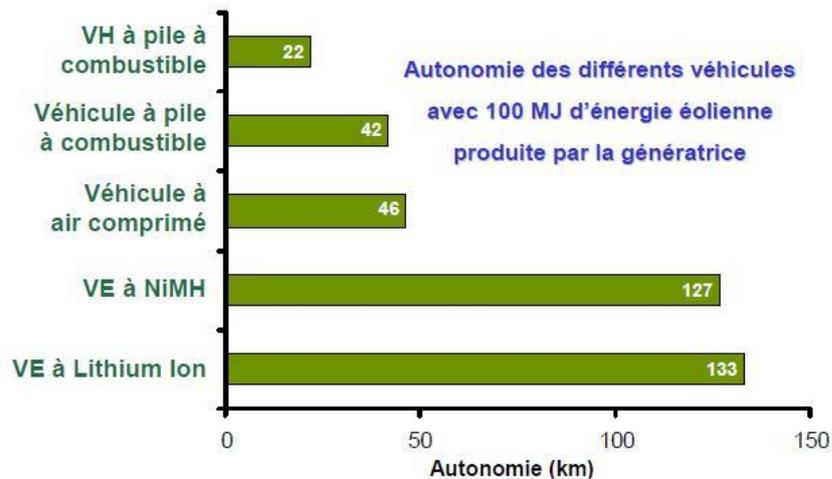


Figure (2.5) : L'autonomie de différents types de voitures avec 100 MJ d'énergie provenant du vent.

2.5. L'architecture d'un véhicule à pile à combustible :

Un véhicule à pile à combustible est essentiellement conçu autour des composants suivants (figure 2.6) :

- Un stockage d'hydrogène ou un système de production d'hydrogène (reformeur par exemple),
- Une pile à combustible,
- Un système de stockage d'électricité fonctionnant en parallèle avec la pile (batterie ou super capacités),
- Un moteur électrique entraînant les roues,

- Un compresseur d'air (les piles fonctionnent avec de l'air à une pression comprise entre 1,2 et 5 bars absolus),

Des échangeurs de chaleurs et un radiateur pour évacuer la chaleur produite par la pile, Divers composants spécifiques : pompes, capteurs, séparateur, convertisseur de courant, contrôle commande...

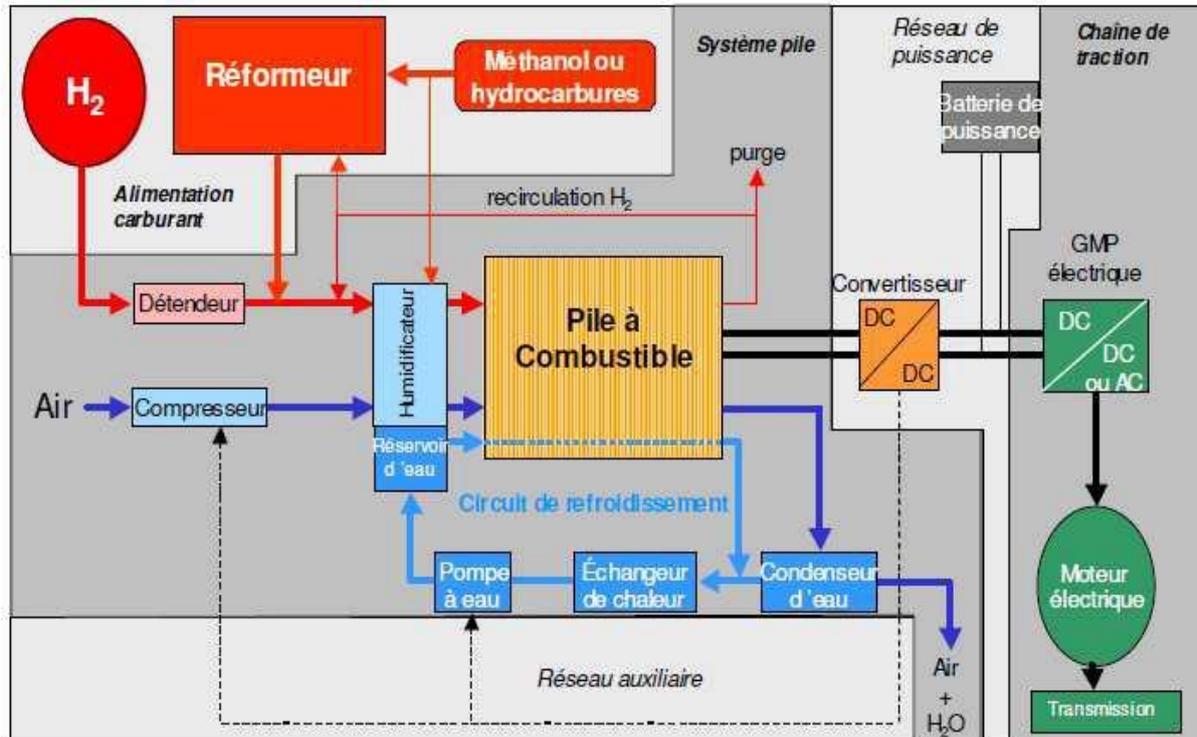


Figure (2.6) : Schéma général d'un véhicule à pile à combustible - Source Renault - PSA, 1998

La qualité, la fiabilité, les coûts de ces composants seront évidemment des facteurs clés d'une introduction plus ou moins rapide de ce type de véhicule.

L'arrangement de ces composants dans un véhicule est montré dans la figure ci-dessous (figure 2.7). On voit, de la droite vers la gauche : les deux réservoirs d'hydrogène (en rouge), les batteries, la pile à combustible au centre, le moteur électrique et divers composants, à l'avant du véhicule, et enfin le radiateur. [13]



Figure.2.7 : L'arrangement des composants sur le véhicule Honda FCX (document Honda, 2005)

2.6. Le véhicule hybride :

Pour palier au problème d'autonomie, d'autres solutions ont été investiguées. Ainsi, les constructeurs se sont orientés vers les véhicules électriques hybrides (VH). Ils représentent un compromis entre le véhicule conventionnel à moteur thermique et le VE. Leur but principal est de diminuer la pollution des véhicules conventionnels ou inversement d'augmenter l'autonomie du VE. Ils peuvent être vus comme une solution intermédiaire, en attendant que les problèmes d'autonomie et d'infrastructure des VE soient résolus.

2.6.1. Historique des véhicules hybrides :

Même si le VH apparaît maintenant comme une solution aux faibles performances des VE actuels le concept de VH n'est pas nouveau. En effet, il est aussi vieux que l'automobile lui-même. A l'origine, son but n'était pas de minimiser la consommation de carburant, mais surtout d'assister les faibles performances des moteurs à combustion de l'époque.

Les premières VH de type série ou parallèle ont été présentées à Paris au Salon de 1899. Le VH parallèle avait un petit moteur thermique refroidi par air, assisté par un moteur électrique et alimenté par des batteries au plomb. Le moteur électrique était utilisé dans le cas où la puissance de traction dépassait la puissance du moteur thermique. Lors d'un stationnement ou d'un roulage au-dessous de la capacité du moteur thermique, la batterie était chargée par le moteur thermique.

Le premier VH série a été conçu pour augmenter l'autonomie d'un VE. Deux moteurs électriques entraînaient séparément les deux roues arrière, la batterie étant rechargée par un moteur thermique de $\frac{3}{4}$ chevaux couplé à un générateur de 1,1 kW.

Ces deux types de VH ont été commercialisés jusqu'en 1914 avant de disparaître complètement, à cause des améliorations des moteurs à combustion interne.

Même si quelques études et prototypes de VH ont vu le jour après les années 70, l'intérêt des constructeurs est réapparu dans les années 90, Le plus gros effort de développement et de commercialisation a été fait par les constructeurs japonais et Américains. Ces efforts se sont concrétisés par des VH commercialisés apportant de réels gains en consommation. Aujourd'hui plusieurs types de voitures hybrides apparaissent. [10]

2.6.2 Définition et classifications des véhicules hybrides :

Les VH constituent une famille recouvrant une grande variété de solution. Ainsi, une définition exhaustive des VH est assez difficile et la majorité des définitions sont incomplètes. Une

définition courante est celle proposée par le Comité Technique 67 (Electric Road Véhicules) de la Commission Internationale d'Electrotechnique : le VH est un véhicule dans lequel l'énergie de propulsion est fournie par deux ou plusieurs types de dispositifs de stockage, sources, ou convertisseurs d'énergie, où au moins un parmi eux fournit de l'énergie électrique. Une autre définition proposée par l'Agence Internationale de l'Energie (IEA) dans un rapport technique : un VH a un groupe motopropulseur dans lequel l'énergie peut être transmise par au moins deux dispositifs de conversion d'énergie différents tirant l'énergie d'au moins deux dispositifs de stockage d'énergie différents. Néanmoins, ces définitions ne sont pas reconnues par tous les constructeurs car elles n'intègrent pas l'hybride « micro » présenté ci-dessous.

Une chaîne de traction hybride peut être réalisée partir à de deux configurations principales, série ou parallèle, en pratiques les solutions retenues sont souvent des combinaisons entre les deux schémas.

Toutefois, une classification souvent utilisée aujourd'hui propose une décomposition en quatre catégories principales en fonction notamment du niveau d'hybridation :

- Micro hybrid.
- Mild hybrid.
- Full hybrid.
- Plug-in hybrid.

Ainsi, le VH, dans le sens classique du terme, devient dans cette classification un « full hybrid » laissant place à des configurations moins complexes comme les hybrides « micro » et « mild ». D'autre part, l'hybride « plug-in » s'intercale entre le « full hybrid » et le VE.

La Figure (2.8), donne une image d'ensemble des solutions existantes pour créer une chaîne de traction et les situe sur un axe véhicule thermique– véhicule électrique. [10]

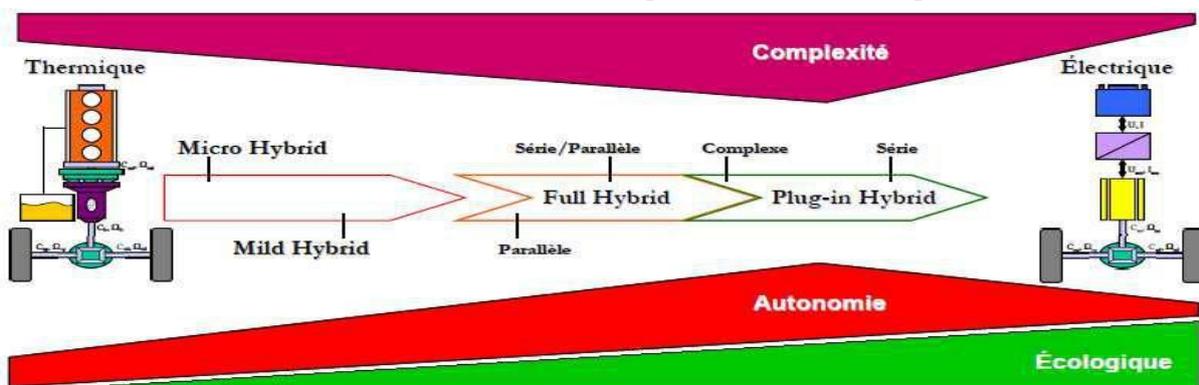


Figure (2.8) : Classification des différents types de chaînes de traction

Cette figure permet de visualiser les quatre niveaux d'hybridation, ainsi que les différents hybrides « full » ou « plug-in » en fonction de l'architecture (série, parallèle, série/parallèle, complexe). Les hybrides « full » et « plug-in » sont liés afin de souligner qu'ils

peuvent avoir la même architecture. Leur différence vient du fait que le VH « plug-in » peut être rechargé à partir d'une source électrique extérieure. Ces véhicules ont souvent une batterie plus grande, donc une autonomie plus importante en régime « zéro émission », étant ainsi plus proche d'un VE. Plus la partie électrique prend de l'importance, plus l'impact environnemental baisse. Par contre, la complexité augmente avec l'introduction successive de la traction électrique et commence à diminuer lorsque le moteur thermique cesse de participer à la traction, notamment dans la configuration série.

Les différents types d'hybrides et d'architecture exposés dans la Figure (2.8) sont présentés ci-dessous.

Toutefois, il est possible d'imaginer d'autres classifications. Il serait également intéressant de qualifier les VH, soit en fonction du nombre de kilomètres qu'ils peuvent parcourir en mode tout électrique (zéro émission), soit en fonction du pourcentage de la puissance électrique par rapport à la puissance totale disponible. Cela permet d'introduire un nouveau vocabulaire :

VH20, pour 20 km d'autonomie,

VH30%, pour 30% de puissance électrique par rapport à la puissance totale.

Ces classifications s'intègrent facilement dans le schéma de la Figure 2.6, trouvant leur place entre les deux technologies situées aux extrémités. [10]

2.6.2.1 Hybride « micro » :

Connu aussi sous le nom de « light hybrid » où « soft hybrid », ce niveau d'hybridation s'apparente aux véhicules ayant la fonctionnalité « Stop&Go » appelé aussi « Stop&Start ».

La caractéristique principale du « micro hybrid » est que l'ancien alternateur et démarreur du véhicule forment maintenant un seul moteur électrique appelé alerno-démarreur, capable de remplir les deux fonctions, celles de démarrer le moteur thermique et de charger la batterie. Cette configuration permet également de remplir la fonction « Stop&Go » représentant le premier niveau d'hybridation. Ainsi, les véhicules qui en sont équipés se mettent en « veille » dès que la vitesse tombe au-dessous de 6 km/h, i.e. à l'approche d'un feu rouge ou dans un embouteillage. Au démarrage, le moteur repart automatiquement dès que le conducteur relâche la pédale de frein. Autre avantage, même si la traction est réalisée complètement par le moteur thermique la configuration « micro » permet de courtes périodes d'accélération où le moteur électrique intervient pour aider le moteur thermique.

Le « Stop&Go » permet de diminuer les nuisances sonores dans les zones urbaines et de réduire d'environ 10% la consommation.

Les constructeurs ayant opté pour l'hybride « micro » n'envisagent pas de rester à ce niveau d'hybridation, mais le voit plutôt comme une première étape. Ainsi, la prochaine étape est le freinage par récupération à l'aide de batteries à hautes performances ou de super condensateurs. Avec ce freinage ils espèrent gagner encore 5% sur la consommation. [10]

2.6.2.2. Hybride « mild » :

La principale différence entre les hybrides « micro » et « mild » est l'alternateur, remplacé par un moteur électrique plus puissant capable d'accomplir de nouvelles tâches. Ainsi, la batterie étant de taille plus grande, le moteur électrique assiste le moteur thermique dans la traction, mais entraîne très rarement le véhicule tout seul. Une autre fonctionnalité importante de l'hybride « mild » est la possibilité de récupérer l'énergie cinétique du véhicule lors du freinage. Le moteur électrique est d'habitude branché sur le même arbre que le moteur thermique entre le moteur thermique et la boîte de vitesse. Cette configuration permet un gain de consommation entre 20% et 25% par rapport à une voiture classique de même catégorie. [10]

2.6.2.3 Hybride « full » :

Le « full hybrid » est équipé d'un moteur thermique et d'un moteur électrique d'une puissance relativement équivalente. Ainsi, par rapport à la configuration « mild » le moteur électrique augmente en importance, le moteur thermique pouvant être diminué de taille, fait connu sous le nom de « downsizing ». La batterie devient aussi plus grande et permet grâce au moteur électrique d'entraîner le véhicule en fonctionnement tout électrique (zéro émission). Ce mode de fonctionnement peut être sous le contrôle de la gestion électronique du véhicule ou sous le contrôle direct du conducteur. Dans le premier cas, le fonctionnement tout électrique couvre des distances courtes aux vitesses faibles, laissant la priorité à l'essence sur route ou quand la circulation est fluide. Dans le deuxième cas, le conducteur peut choisir un mode tout électrique pour des distances plus longues (20 km ou plus), en général compatibles avec l'usage urbain. Le contrôle de tel système est complexe, mais l'amélioration du rendement global entraîne une diminution de consommation de 40% à 45%.

La variété des modes de fonctionnement d'un véhicule « full hybrid », procure une importante flexibilité dans la gestion énergétique. La Figure.2.9 présente une gestion d'énergie sur un VH où la puissance instantanée est décomposée en puissance moyenne et dynamique. Cette décomposition s'accorde avec la théorie des « 3E » ($\Sigma E = E_P + E_t + E_i$) qui divise la fourniture

d'énergie en trois catégories : l'énergie permanente (E_p), transitoire (E_t) et impulsionnelle (E_i). Il est donc avantageux d'optimiser la liaison source et consommation afin d'améliorer l'efficacité énergétique du système entier. Dans ce sens, la puissance totale de la charge est fournie par deux types de sources différentes. Ainsi, l'énergie thermique provenant d'un moteur thermique est bien adaptée pour fournir l'énergie permanente, tandis que l'énergie électrique est bien adaptée pour fournir la puissance dynamique à travers le moteur électrique alimenté par une batterie ou un super condensateur. [10]

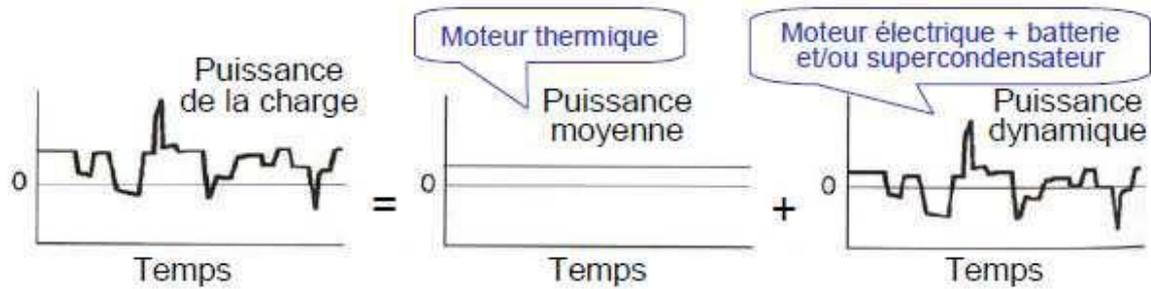


Figure.2.9 : La puissance de la charge décomposée en deux composantes : moyenne et dynamique

2.6.3 Architecture des véhicules hybrides :

Les principales architectures pouvant constituer le « full hybrid » sont détaillées ci-après en commençant avec les architectures classiques, hybride série et parallèle, et en terminant avec l'hybride série/parallèle et l'hybride complexe, combinaison des deux précédentes.

2.6.3.1 Hybride Série :

La configuration série, présentée sur la Figure.2.10. Peut être vue comme étant un VE assisté par un moteur thermique. Elle a l'avantage d'être la configuration hybride la plus simple mais aussi l'inconvénient d'avoir trois machines alors qu'il n'y a qu'un seul moteur fournissant la puissance de propulsion.

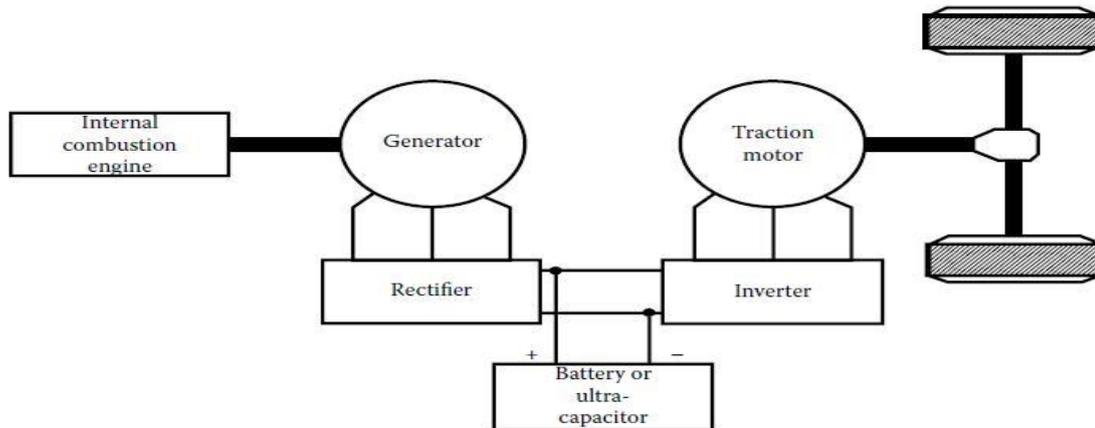


Figure.2.10 : Chaîne de traction hybride série [15]

Le moteur thermique entraîne une génératrice pour produire de l'énergie afin d'assurer l'autonomie du véhicule. L'énergie générée par la génératrice peut charger la batterie ou alimenter directement le moteur électrique afin de propulser la voiture. Le désavantage principal de cette solution est la présence de 3 moteurs devant être surdimensionnés sur parcours sévères. En général, la solution est adaptée pour les véhicules lourds comme les bus.

2.6.3.2 Hybride Parallèle :

L'hybride parallèle (ou dual) est caractérisé par deux motorisations assurant la propulsion. Comme présenté sur la Figure.2.11, le moteur thermique et le moteur électrique sont placés en parallèle et sont liés mécaniquement afin que chacun puisse propulser la voiture indépendamment ou simultanément. L'hybride parallèle est plutôt un véhicule thermique assisté par un moteur électrique afin de réduire les émissions du moteur thermique et d'optimiser la consommation de carburant. Le moteur électrique peut être utilisé comme génératrice pour charger la batterie à partir du moteur thermique ou lorsque le véhicule est en régime de freinage. Le désavantage provient de la complexité du contrôle mais aussi du dispositif mécanique liant les deux moteurs. L'avantage, par rapport à la configuration série, est que cette solution nécessite seulement deux moteurs de plus petite taille car tous deux participent à la traction. L'ensemble est donc plus compact que l'hybride série.

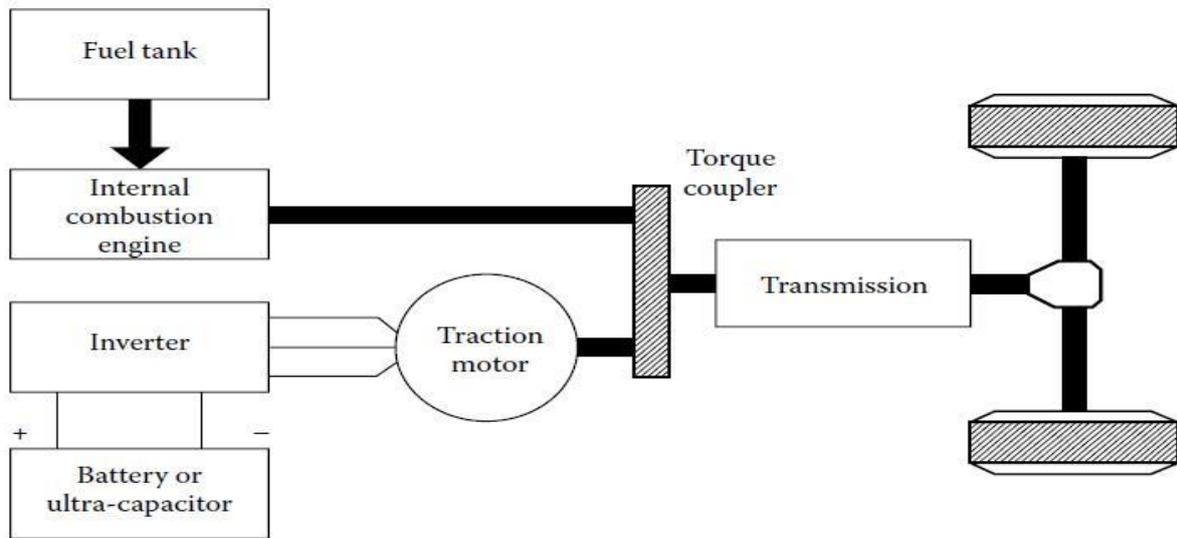


Figure.2.11 : Chaîne de traction hybride parallèle [15]

2.6.3.3. Hybride Série/Parallèle :

A partir de ces deux configurations de base, d'autres configurations ont été réalisées. La combinaison la plus simple est l'hybride série/parallèle, présenté sur la Figure.2.12, rassemblant les deux configurations classiques dans une solution qui incorpore les avantages des VH série et des VH parallèle.

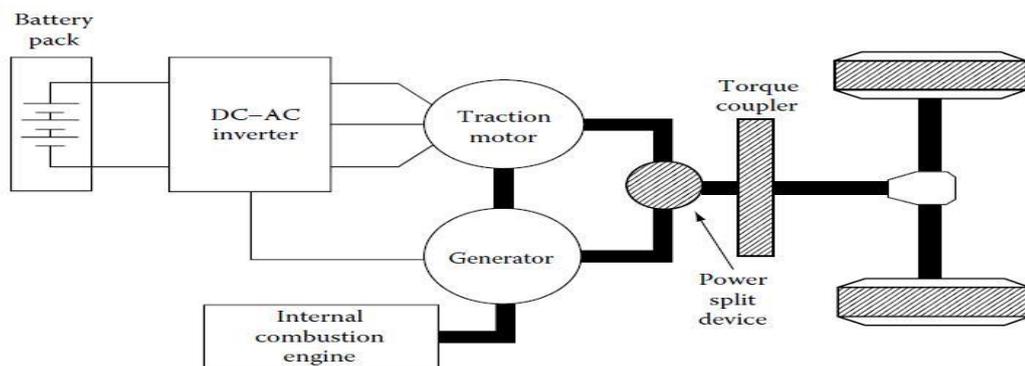


Figure.2.12 : Chaîne de traction hybride série/parallèle [15]

Une comparaison faite par Toyota entre les trois configurations d'hybride décrites ci-dessus est présentée dans le Tableau.2.1 Ce dernier met en évidence l'élimination des désavantages des configurations série et parallèle dans la configuration série/parallèle.

	Economie de carburant				Performances	
	Arrêt	Récupération d'énergie	Gestion de l'énergie	Rendement total	Accélération	Régime permanent
Série	●	⊙	●	●	○	○
Parallèle	●	●	○	●	●	○
Série/Parallèle	⊙	⊙	⊙	⊙	●	●

⊙ Excellent
● Supérieur
○ Défavorable

Tableau.2.1 : comparaison entre les configurations série, parallèle et série /parallèle (source Toyota) [10]

2.6.3.4. Hybride complexe :

La possibilité d'agencer les éléments dans une chaîne de traction hybride reste ouverte, d'autres possibilités de configurations peuvent encore apparaître. Un autre exemple de chaîne de traction hybride qui n'est pas inclus dans les configurations mentionnées est l'hybride complexe. La différence est située au niveau de la génératrice, qui dans le cas de l'hybride complexe peut également fonctionner en moteur avec la possibilité de participer à la traction. Cette configuration peut être appliquée pour entraîner les deux essieux, comme présenté sur la Figure.2.13.

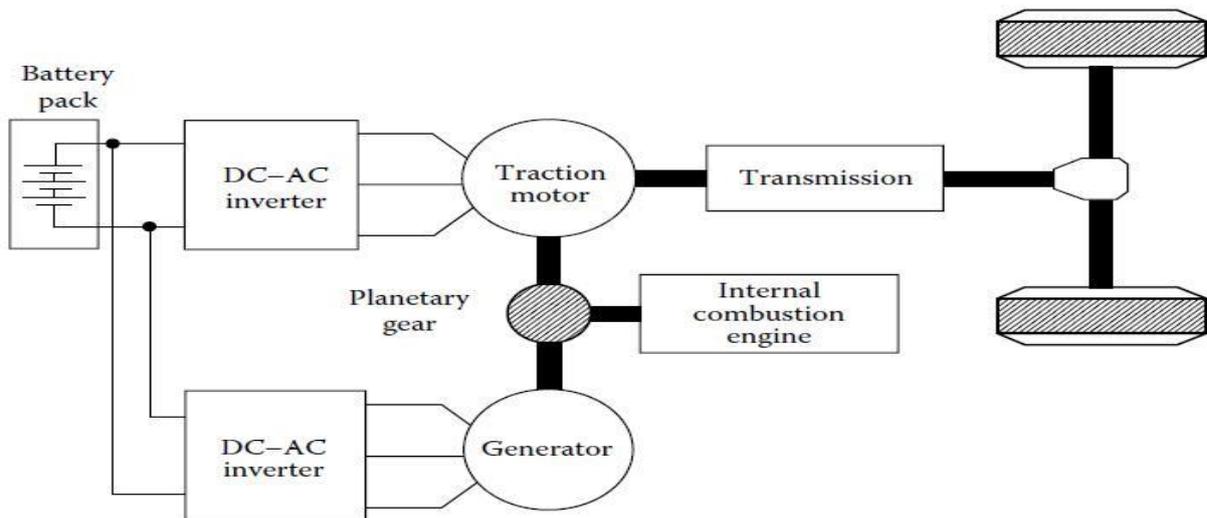


Figure (2.13) : Chaîne de traction hybride complexe [15]

Cette configuration présentée sur la Figure (2.14), représentant le premier système hybride à quatre roues motrices, lancé en 2001 sur le marché japonais. Il consomme 5,6 litres d'essence aux 100 km (sur cycle japonais à 100 km/h), soit deux fois moins que la limite imposée par le gouvernement japonais pour un véhicule de cette catégorie pour 2010. Le

véhicule bénéficie d'une autonomie d'environ 1000 km et d'un niveau d'émissions de plus de 75 % inférieur au seuil spécifié par les dernières réglementations.

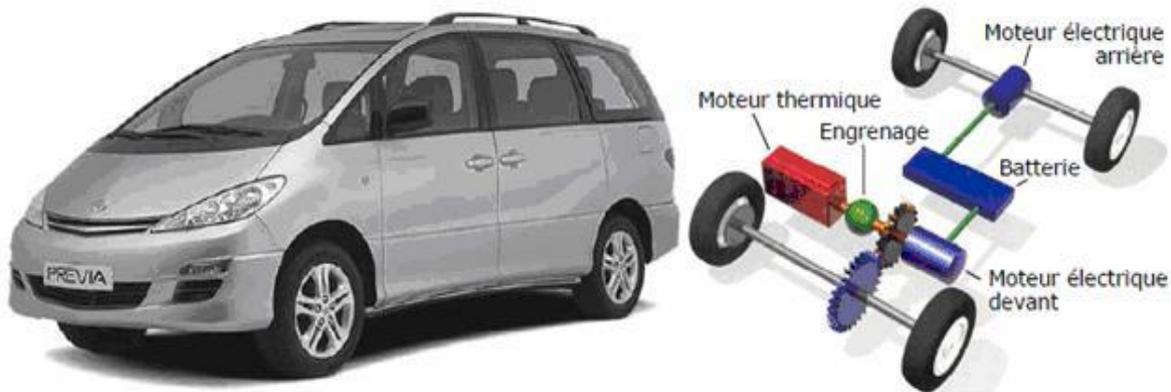


Figure.2.14 : véhicule hybride complexe [14]

2.7 Conclusion :

Les véhicules électriques semblent être la bonne solution en terme de transport au problème d'émissions des gaz à effet de serre et de l'épuisement des ressources fossiles. En effet, le véhicule électrique ne dépend pas nécessairement du pétrole et ne libère pas de gaz à effet de serre. De plus, il possède de nombreux avantages : il est silencieux, sans pollution environnementale locale, sans consommation à l'arrêt et avec un bon rendement énergétique global. Le VE à moteur-roue représente une solution très avantageuse avec une simplification considérable de la chaîne de traction laissant plus d'espace aux batteries. Cependant, le VE souffre de performances faibles dues au problème de stockage de l'énergie électrique dans des batteries et d'un temps de recharge élevé. Ainsi, le concept de VE a été mis en veille par la plupart des constructeurs qui investissent plutôt dans des solutions à piles à combustibles (FCV) et véhicules hybrides (VH).

Le véhicule hybride (VH) commence déjà à apparaître sur le marché. Il représente un compromis entre les véhicules actuels et le VE, et bénéficie donc en partie de l'avantage de la traction électrique sans avoir les limitations des VE.

3.1 Introduction :

Dans ce chapitre on s'intéresse à la modélisation et le dimensionnement de la pile à combustible PEMFC. Ce type de pile retient notre attention pour trois raisons essentielles :

- 1) Sa température de fonctionnement relativement basse laisse envisager une technologie simplifiée pour assurer un démarrage rapide et une évacuation aisée de la chaleur produite à température ambiante, ce premier point est essentiel pour l'application du véhicule électrique que nous traitons.
- 2) Elle est, ensuite, insensible à la présence de CO₂ dans l'air, contrairement à la filière alcaline.
- 3) Enfin elle est de technologie (tout solide) et donc peut à la fois prétendre à des durées de vie supérieures aux piles à électrolyte liquide (pas de pièces mobiles au sein du convertisseur) ainsi qu'une industrialisation plus aisée : ceci permet d'envisager un coup prospectif compatible avec le marché visé, d'autant qu'elle offre une compacité sensiblement supérieure à celle des autres filières. C'est pour toutes ces raisons que nous avons choisi d'étudier l'utilisation d'une pile PEMFC dans notre application.

Dans une pile à membrane échangeuse de protons, le combustible brûlé est l'hydrogène et le comburant l'oxygène, en général prélevé de l'air ambiant, le produit de la réaction chimique étant l'eau. L'hydrogène utilisé est soit, stocké dans des bouteilles de gaz comprimé ou dans des hydrures métalliques, soit produit par reformage à l'eau de différents combustibles : gaz naturel (CH₄), charbon, méthanol, propane, ...

3.2 Modélisation de la PEMFC :

Pour les piles à combustible avec un électrolyte conducteur de protons (PEMFC), l'hydrogène est oxydé à l'anode et les protons sont transportés à travers la membrane vers la cathode selon la réaction:



Et à la cathode, l'oxygène est réduit selon la réaction:



Les électrons circulent par le circuit externe durant ces réactions. Une fois arrivés à la cathode, les protons se recombinaient avec les ions d'oxygène pour former de **l'eau selon la réaction:**



3.2.1 Modèle de base :

La fig 3.1 présente les emplacements des états d'un système PàC (Pile à combustible) composé de quatre sous-systèmes principaux : le système d'hydrogène qui alimente l'anode en hydrogène gaz, le système d'air qui alimente la cathode en oxygène, l'humidificateur et le système de refroidissement qui maintiennent respectivement le degré d'humidité et la température de la pile à combustible. Ce système global est représenté par un modèle dynamique de 9 états, proposé dans [thèse pukruchpain], et qui est principalement basé sur les équations thermodynamiques des fluides. Les 9 variables d'états, dont les dynamiques en interaction représentent le comportement du système, sont les suivantes :

$$[m_{O_2}, m_{H_2}, m_{N_2}, \omega_{cp}, p_{sm}, m_{sm}, m_{\omega,an}, m_{\omega,ca}, p_{rm}] \quad (3.4)$$

où :

m_{O_2} est la masse d'oxygène,

m_{H_2} est la masse d'hydrogène au niveau de l'anode,

m_{N_2} est la masse d'azote,

ω_{cp} est la vitesse angulaire du groupe moto-compresseur,

p_{sm} est la pression d'air dans les tuyaux d'alimentation entre le compresseur et la cathode de la pile,

m_{sm} est la masse d'air dans les tuyaux d'alimentation entre le compresseur et la cathode de la pile,

$m_{w,an}$ est la masse d'eau au niveau de l'anode,

$m_{w,ca}$ est la masse d'eau au niveau de la cathode,

p_{rm} est la pression de l'air dans les tuyaux de retour à la sortie de la cathode.

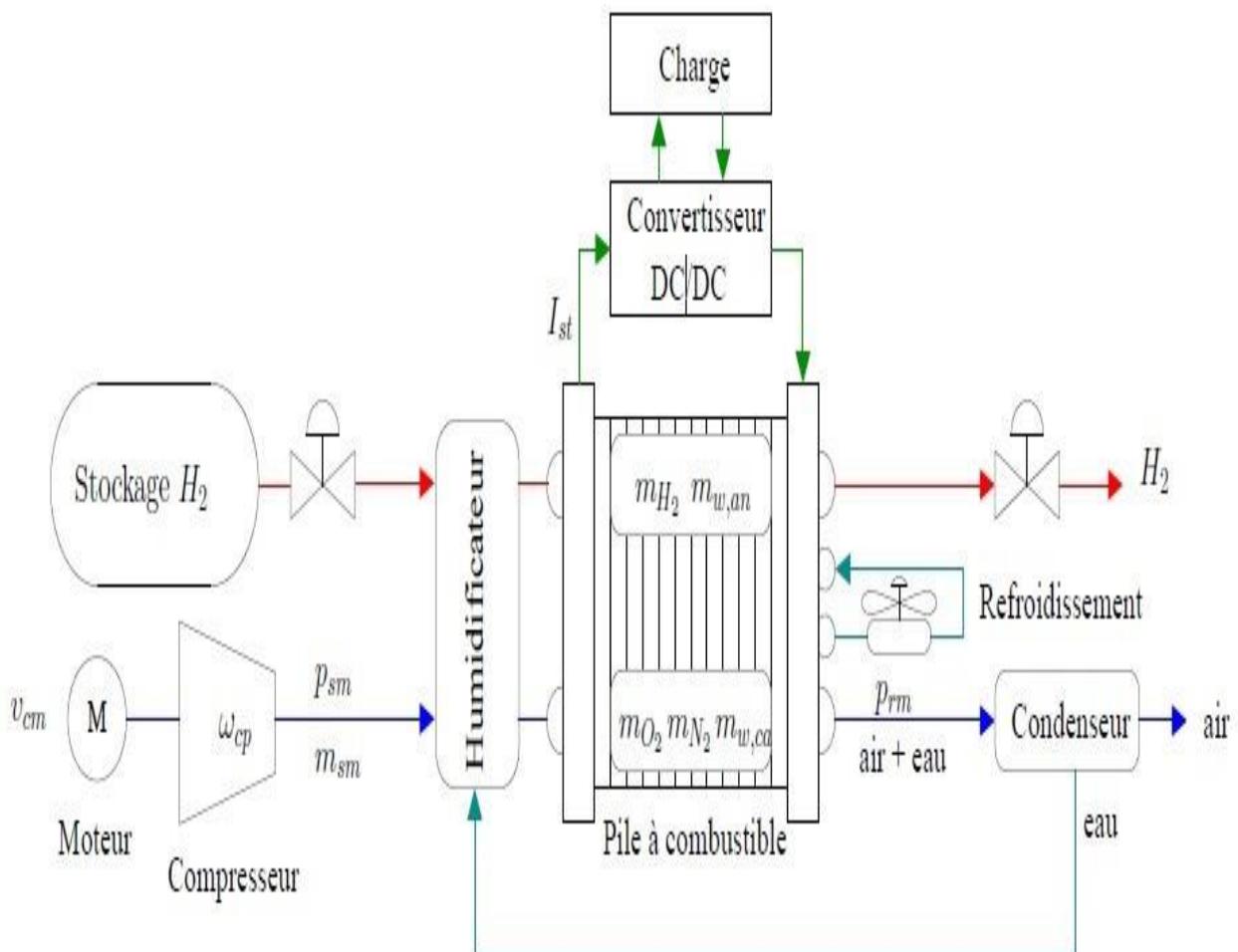


Figure 3.1 Représentation des états dans le système à PàC

3.2.2 Modèle de tension :

Il existe un grand nombre de modèles quasi statiques pour décrire la réaction chimique présente dans une cellule de pile à combustible. Dans le cadre de cette étude, le modèle d'évolution de la tension choisi est issu des travaux présentés par Amphlett [18].

Ce modèle est décrit en utilisant la combinaison des lois élémentaires et des modèles empiriques. Dans le développement des modèles élémentaires, les transports de matière sont pris en compte via les équations de Maxwell. Les potentiels d'équilibre thermodynamique sont définis en utilisant l'équation de Nernst. Les surtensions d'activation sont calculées par les équations de Tafel. La résistance interne est déterminée par les équations de Nernst-Planck [19]. En utilisant la loi d'Ohm, nous pouvons exprimer la tension de cellule par : $V_{FC} = E_{nernst} - V_{act} - V_{ohm} - V_{conc}$

Les pertes, appelées souvent polarisation, proviennent principalement de trois sources: la polarisation d'activation (V_{act}), la polarisation ohmique (V_{ohm}) et de la polarisation de concentration (V_{conc}). Ces pertes entraînent, pour une pile de potentiel idéal E_{nernst} , une chute de la tension: $V_{fc} = E_{nernst} - \text{pertes}$.

➤ **Tension de Nernst :**

E_{nernst} dite tension réversible : est le potentiel d'équilibre thermodynamique défini en utilisant l'équation de Nernst :

$$E_{Nerst} = \frac{A_G - A_S}{2.F} (T - T_{ref}) + \frac{R.T}{2.F} [\ln(PH_2) + \frac{1}{2} \ln(PO_2)] \quad (3.5)$$

Où:

ΔG : Est changement d'énergie libre (J/k.mol). F: est la constante de faraday (96,487 C/K mol).

ΔS : est le changement d'entropie (J/k.mol).

R: est la constante universelle du gaz (8,3 14 J/K.mol).

P_{H_2} , P_{O_2} : sont respectivement les pressions partielles de hydrogène et l'oxygène (atm). T:

indique la température de fonctionnement de la pile (K)

T_{ref} : est la température de référence (K)

En utilisant les valeurs standards de la température et de la pression. L'équation peut être simplifiée comme suit :

$$E_{nerst} = 1.229 - 0.85 \cdot 10^{-3} (T - 298.15) + 4.31 \cdot 10^{-5} \cdot T \left[\ln(P_{H_2}) + \frac{1}{2} \ln(P_{O_2}) \right] \quad (3.6)$$

Il faut noter que la température de la membrane et les pressions partielles du gaz varient en fonction du courant: avec l'augmentation du courant les pressions d'hydrogène et de l'oxygène diminuent, bien que la température augmente.

➤ **Polarisation d'activation (Charge transfert kinetics) :**

La polarisation d'activation est donnée par la relation de Tafel: [20]

$$V = - [\zeta_1 + \zeta_2 \cdot T + \zeta_3 \cdot T \cdot \ln([CO_2]) + \zeta_4 \ln(I_{stack})] \quad (3.7)$$

Avec:

I_{ctack} est le courant de fonction de la pile, les ξ représentent les coefficients paramétriques pour chaque modèle de pile. [21]

$[Co_2]$ est la concentration de l'oxygène dans l'interface du catalyseur de la cathode donnée par la relation:

$$[Co_2] = \frac{p_{O_2}}{2 \cdot 5,08 \cdot 10^6 \cdot e^{(-498/T)}} \quad (3.8)$$

➤ **Polarisation ohmique :**

Les pertes ohmiques sont dues à la résistance que rencontre le flux d'ions en traversant la membrane et à la résistance que rencontrent les électrons dans les électrodes et le circuit

électrique. La membrane et les électrodes obéissant à la loi d'Ohm, on peut exprimer les pertes ohmiques par l'équation suivante:

$$V_{oMm} = I_{stack} \cdot (R_m + R_c) \quad (3.9)$$

Avec R_m est la résistance équivalente de la membrane pour le flux d'ions, elle est calculée par la relation :

$$R = \frac{\rho_M \cdot l}{A} \quad (3.10)$$

Où ρ_M est la résistivité spécifique de la membrane pour le flux d'électron, A est la surface active de la pile en (cm^2), et l est la largeur de la membrane en (cm). I_{stack} est le courant de fonction de la pile.

➤ **Polarisation de concentration (Mass Transport):**

La polarisation de concentration est donnée par la relation suivante:

$$V_{con} = -B \cdot \ln \left(1 - \frac{J}{J_{max}} \right) \quad (3.11)$$

Avec:

J : la densité de courant (A/cm^2)

J_{max} : la densité de courant maximale (A/cm^2)

B : Désigne la constante électrochimie (V) et donné par la relation suivant. [22]

$$B = \frac{R \cdot T}{n \cdot F} \quad (3.12)$$

Avec :

R : est la constante universelle des gaz ($8.314\text{J/K} \cdot \text{mol}$)

T : est la température (K)

n : Nombre des cellules élémentaires de la pile .

F : Le constant de Faraday ($96.487\text{C/K} \cdot \text{mol}$)

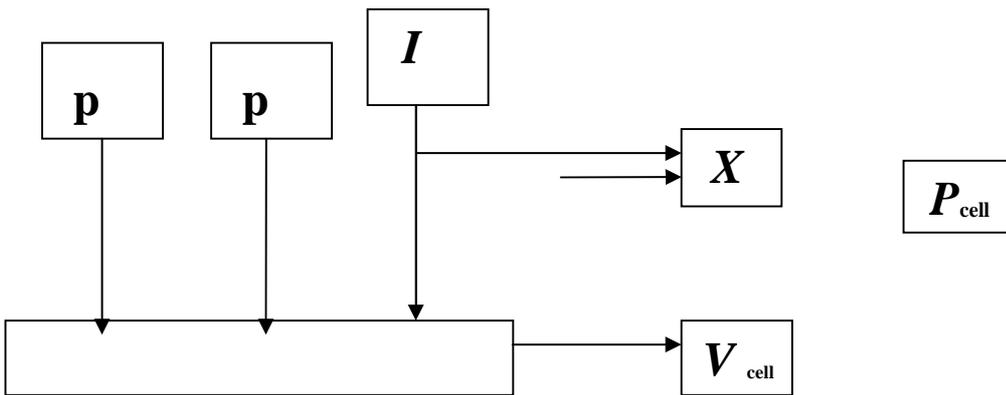
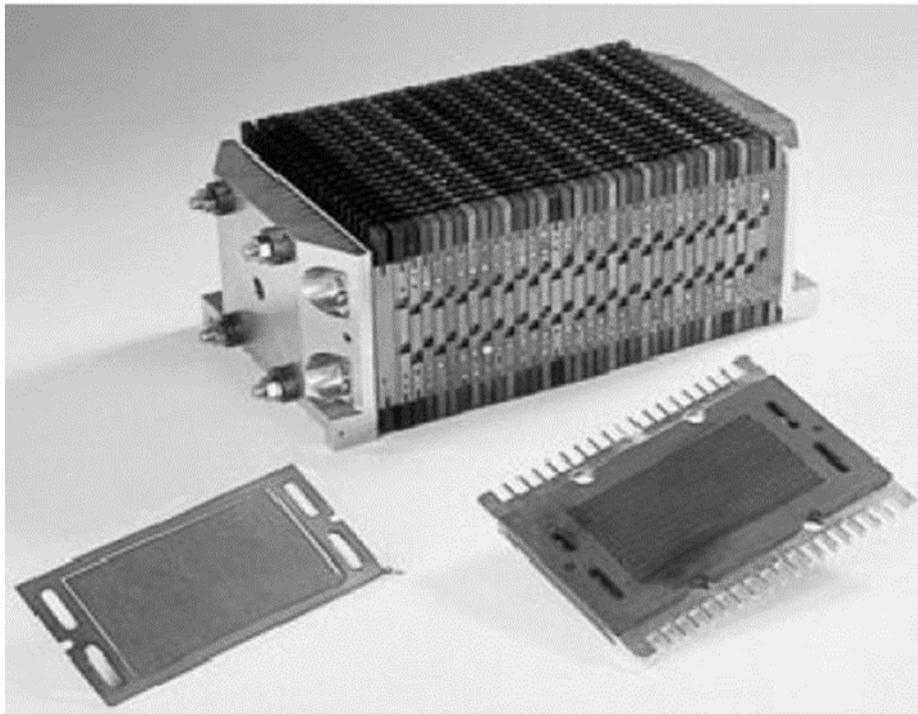


Fig.3.2: modèle statique simplifié de la pile à combustible (PEMFC) [23]



3.3.Simulation de Pile à combustible par SIMULINCK MATLAB :

Nous présentons dans Cette partie, une simulation du modèle sélectionnée de la pile à combustible. Pour réaliser la simulation, les composants principaux ont été étudiés pour connaitre leurs caractéristiques

3.3.1 Caractéristiques tension-densité de courant et puissance-densité de courant d'une cellule PEM :

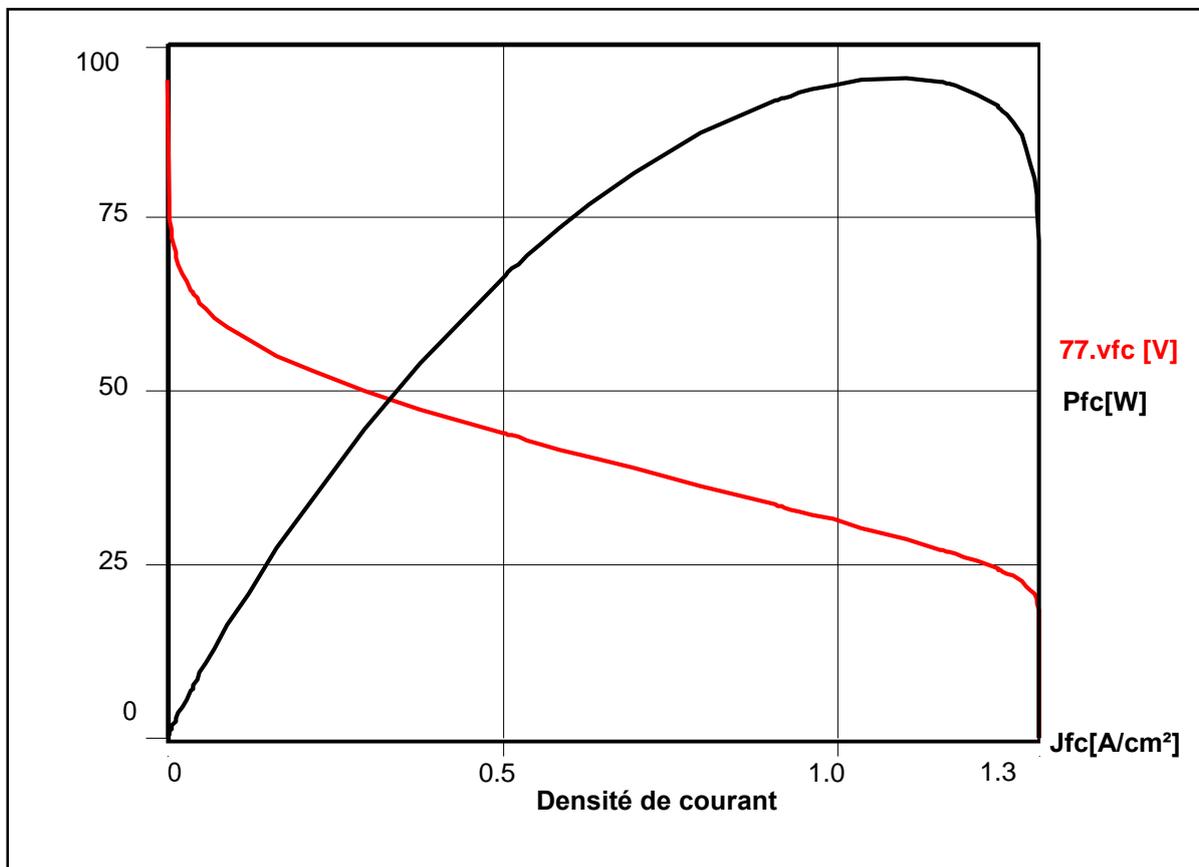


Fig 3.3 : Caractéristiques tension-densité de courant et puissance- Densité de courant d'une cellule PEM

La figure 3.3 donne la tension et la puissance d'une cellule PEM en fonction de la densité de courant. Dans la région de la tension d'activation et à des densités de courant non nulles, il y a

ce qu'on appelle une "surtension d'activation" où une certaine énergie d'activation doit être dépassée pour assurer la dissociation de l'oxygène et conduire les molécules d'hydrogène à diffuser rapidement à travers les pores, dans le catalyseur métallique. Dans la région de concentration ohmique et selon la loi d'Ohm, la quantité de perte de tension varie linéairement

jusqu'à ce que la densité de courant se rapproche de la densité de courant limite (la concentration des réactifs à la surface du catalyseur atteint zéro). Dans ce cas, les pertes de concentrations deviennent dominantes (les réactifs sont consommés plus rapidement qu'ils sont fournis). On voit aussi, à partir de ces courbes, qu'à des faibles densités de courant, la tension est maximum et la puissance est minimum, mais à des fortes densités de courant la tension est minimum et la puissance est maximum.

3.3.2 Rendement d'une cellule PEM :

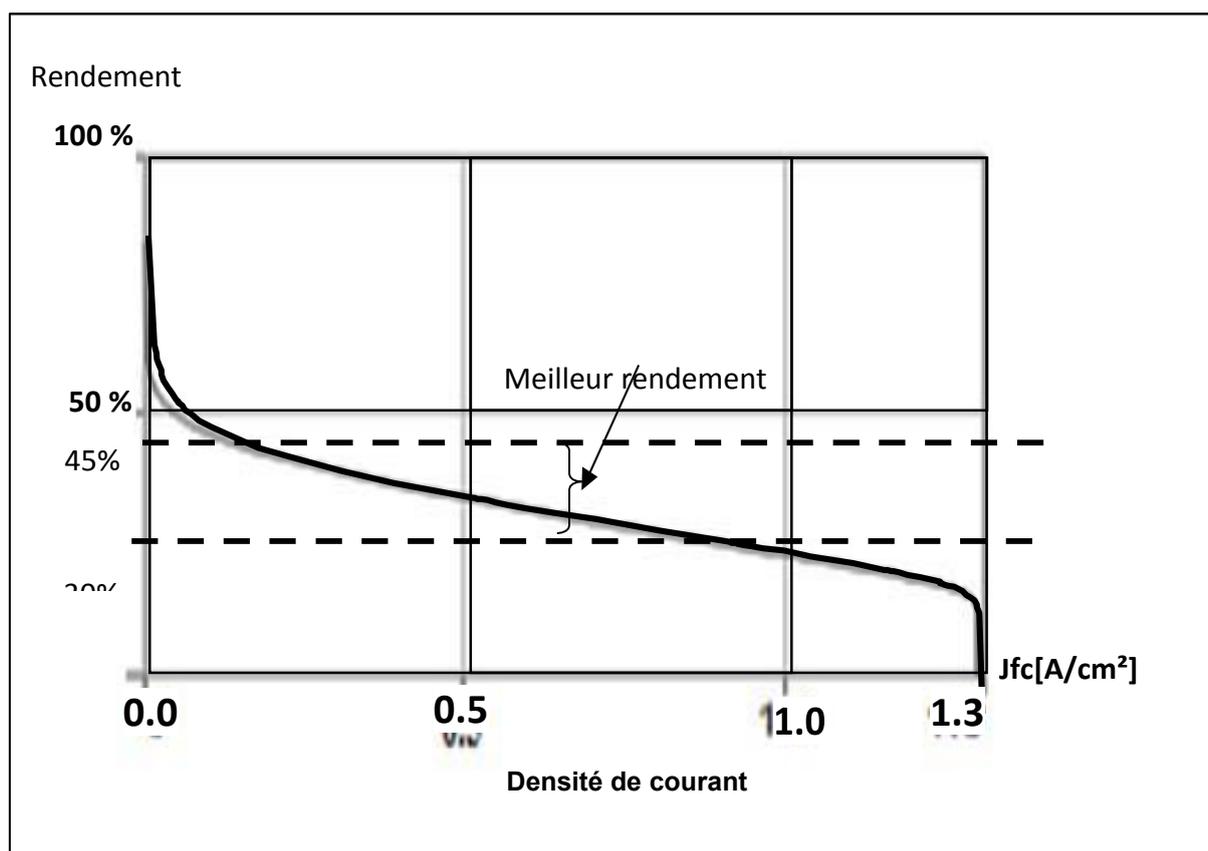


Fig 3.4 : Rendement d'une cellule PEM.

La figure présente le rendement d'une cellule qui fonctionne à température et pression constante.

D'après la figure 3.4, le rendement pratique d'une pile dépend directement de la densité du courant qui traverse la pile. En général comprise entre 30% et 45%.

3.3.3 La tension de 25 cellules mises en série :

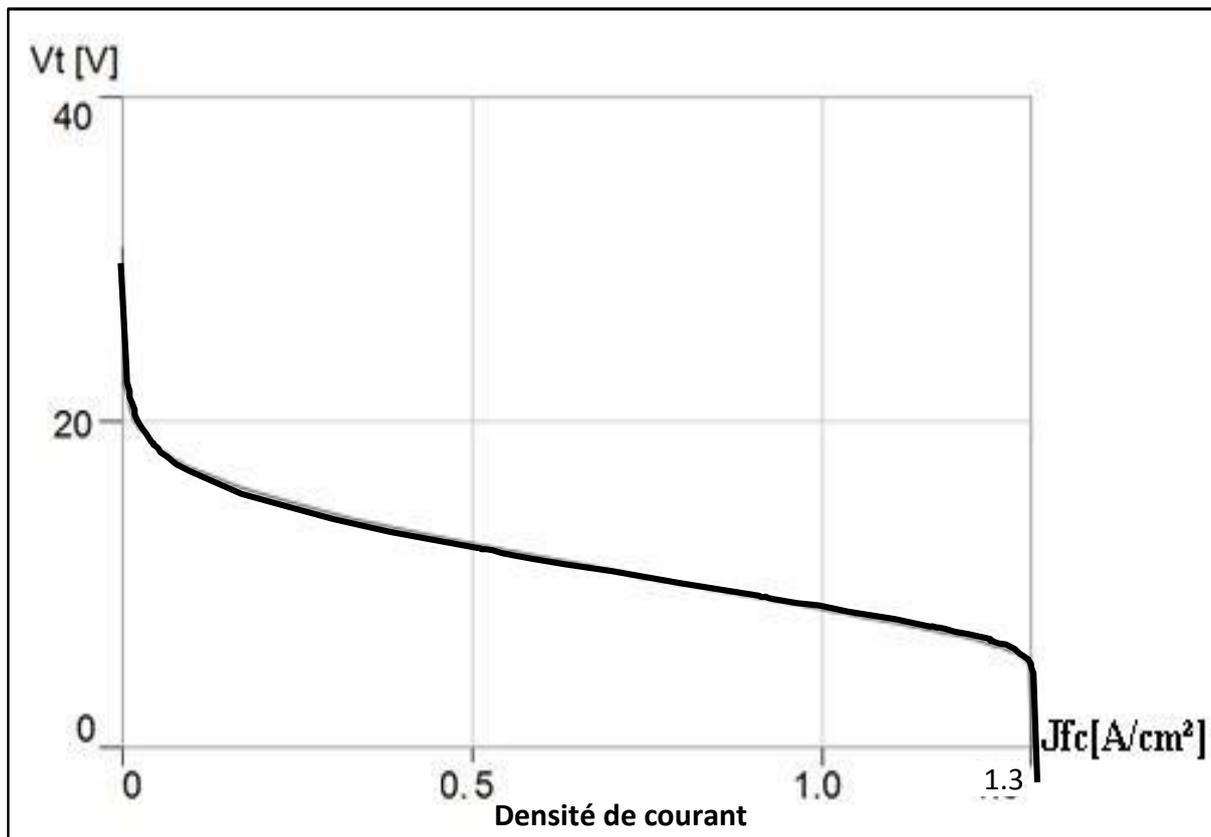


Fig 3.5 : Tension de 25 cellules PEM.

La figure 3.5 présente la tension de 25 cellules PEM mises en série, en additionnant des cellules identiques en série, le courant de la branche reste la même mais la tension augmente proportionnellement au nombre de cellules en série.

3.3.4 Effet de la température sur la caractéristique de la cellule :

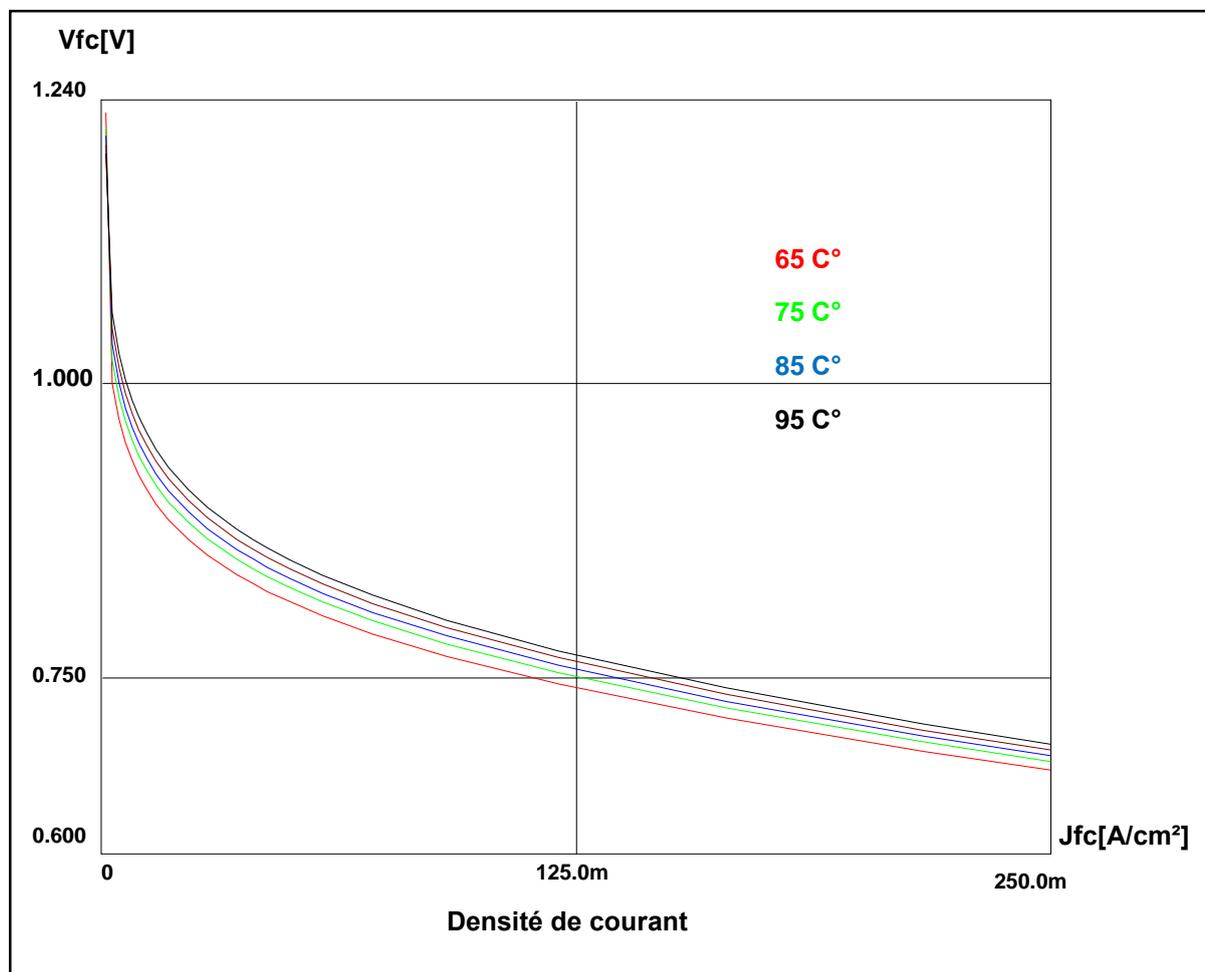


Fig 3.6 : Effet de la température sur la tension de la cellule avec $P_{H_2}=P_{O_2}= 3$ atm.

D'après la figure 3.6, on constate bien que l'augmentation de la température de la pile joue un rôle important sur la tension de cette dernière, ceci est expliqué par la forte conduction ionique de l'ensemble (électrodes, électrolyte).

3.3.5 Effet de la pression sur la caractéristique de la cellule :

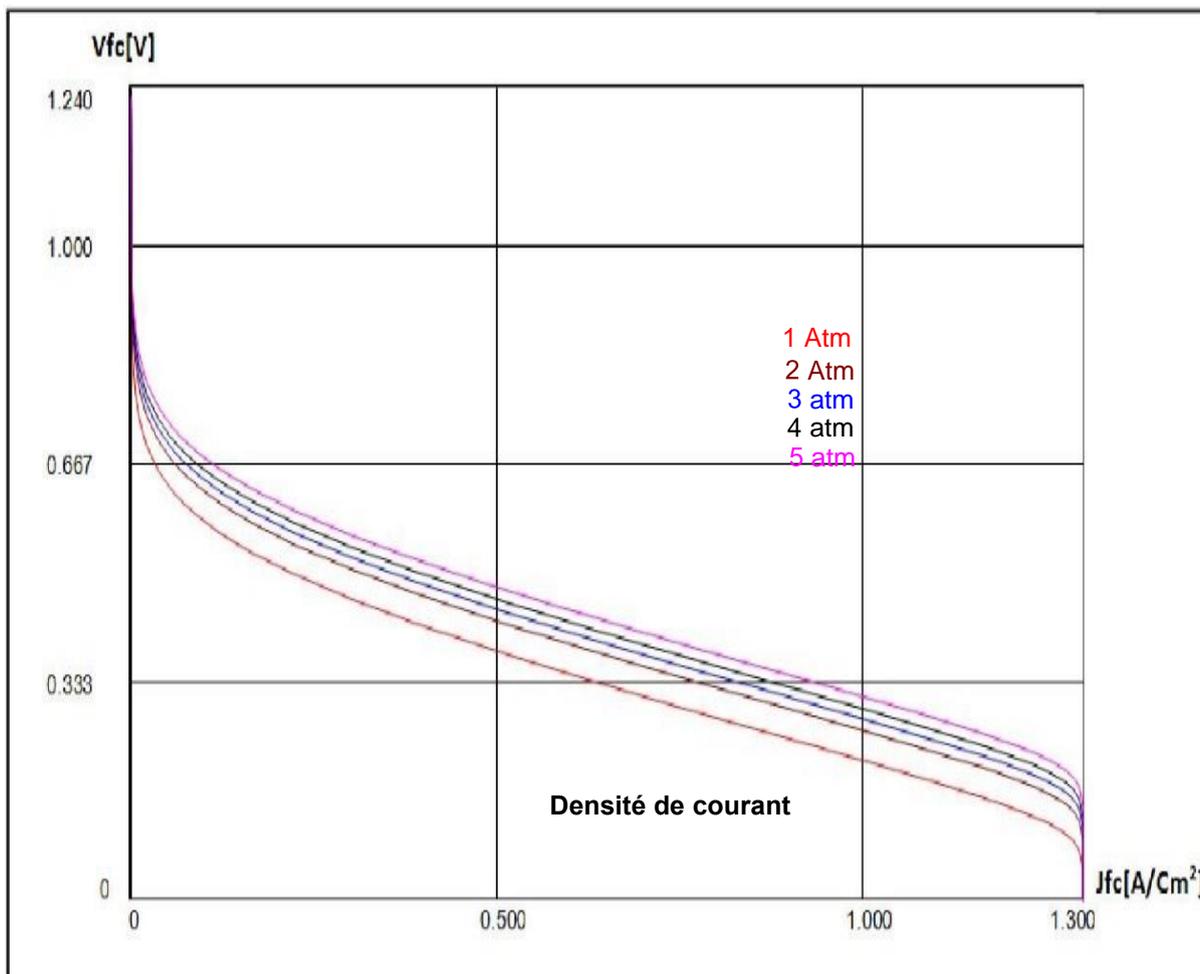


Fig 3.7 : Effet de la pression sur la pile à combustible.

D'après la figure 3.7, la tension de la cellule augmente avec l'augmentation de la pression cela peut s'exprimer par l'augmentation du nombre d'électrons transférés par la réaction chimique.

La courbe du rendement est semblable de la courbe de tension, lorsque la pression de la cellule augmente, le rendement de la cellule augmente.

3.4 Conclusion :

Le modèle statique proposé dans ce chapitre nous a permis de décrire : la courbe caractéristique tension/densité de courant d'une cellule de pile à combustible PEMFC, la courbe Caractéristique densité de Puissance /Densité de courant (par cellule). Ce qui nous a permis de faire dimensionner la pile pour notre application. Par la suite nous avons donné la caractéristique statique de notre pile, en tenant compte de l'influence de la pression et de la température. Cette caractéristique montre que la tension et la puissance sont très sensibles à la variation de la température et de la pression, ce qui nous entraîne à faire des régulations afin de stabiliser la tension de sortie.

Après nous avons présenté la simulation de la pile et les caractéristiques tension-densité de courant et puissance-densité de courant d'une cellule PEM, rendement d'une cellule PEM, la caractéristique tension de 25 cellules mises en série, l'effet de la température sur la caractéristique de la cellule et l'effet de la pression sur la caractéristique de la cellule.

4.1 Introduction :

Dans ce chapitre nous allons présenter un système de traction électrique à pile à combustible PEMFC. Ce modèle contient en plus de la pile à combustible, un hacheur, un onduleur commandé en MLI et un moteur asynchrone.

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.

4.2. Modèle de la chaîne de traction :

La figure (4.1) représente le modèle complet de la chaîne de traction du véhicule électrique qui comporte en plus d'une bouteille d'hydrogène, la pile a combustible, un hacheur, un onduleur et la machine asynchrone.

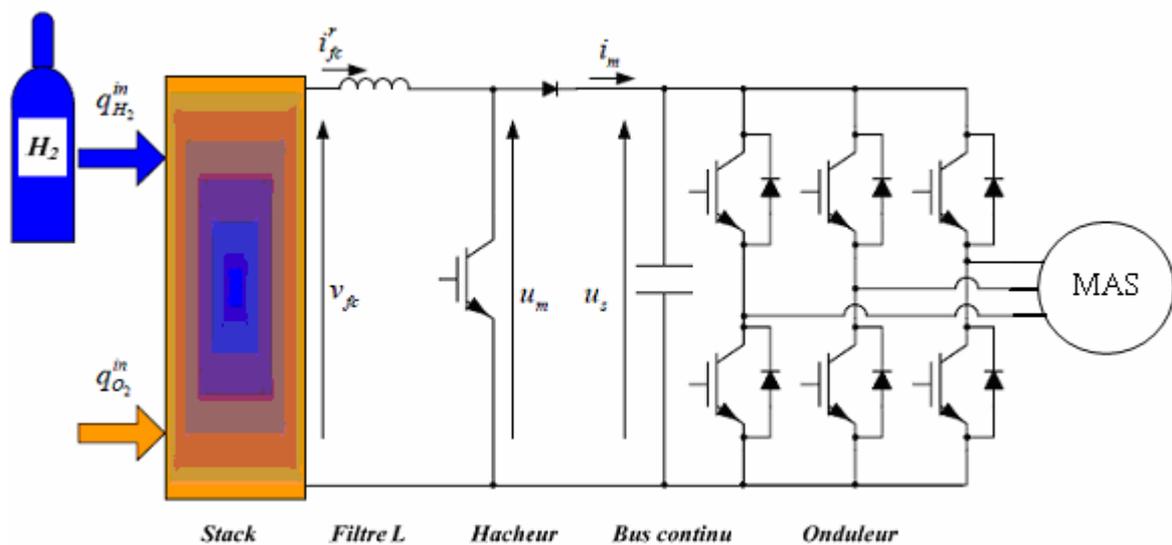


Figure (4.1) : modèle complet du véhicule électrique.

4.3. Modèle dynamique de la pile à combustible PEMFC :

Le model de contrôle de la pile est représentée dans la figure (4.2)

La puissance et la tension de la pile à combustible sont contrôlées à partir de la réaction de courant à l'aide d'un régulateur PID comme il est illustré sur la figure (4.2)

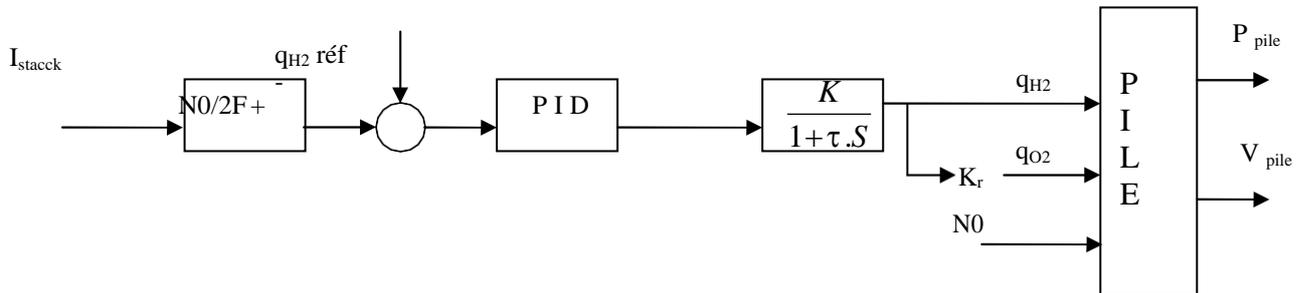


Figure (4.2) : Modèle de contrôle de la pile à combustible PEMFC.

Les valeurs des constantes physiques utilisées dans la simulation de la pile [PEMFC] sont données dans le tableau (4.1)

4.4. Modélisation des convertisseurs :

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

4.4.1. Hacheur élévateur de tension (BOOST) :

Le placement d'une inductance de valeur suffisante permet que le courant ne s'annule pas et une capacité de forte valeur pour avoir la tension de sortie V_s constante.

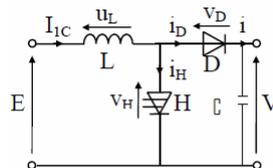


Figure (4.3) : montage de l'hacheur parallèle.

Pour obtenir les courbes de la figure (4.4), 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 $U_L = E - V_C$.

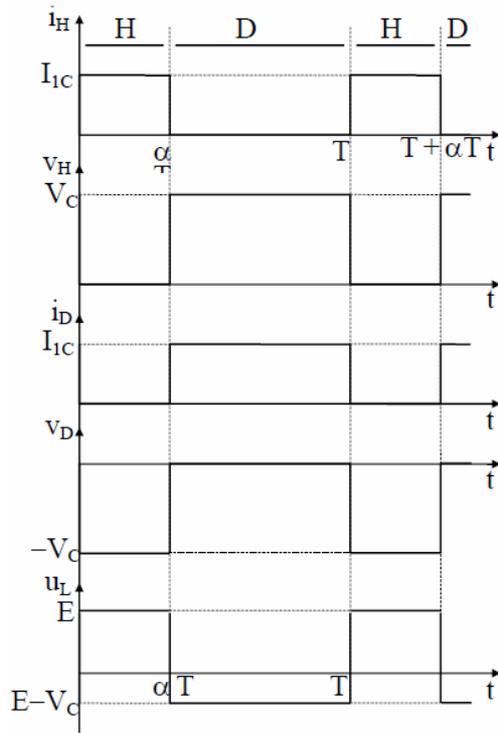


Figure (4.4) : l'allure des tensions et des courants au niveau de l'hacheur

La valeur moyenne de la tension de sortie est constante, sa valeur moyenne est aussi égale à sa valeur instantanée V_C . Il suffit donc de déterminer la relation liant V_C 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

$$V_C = \frac{E}{1 - \alpha} \tag{4.1}$$

La régulation de l'hacheur est faite par un correcteur PI comme suit

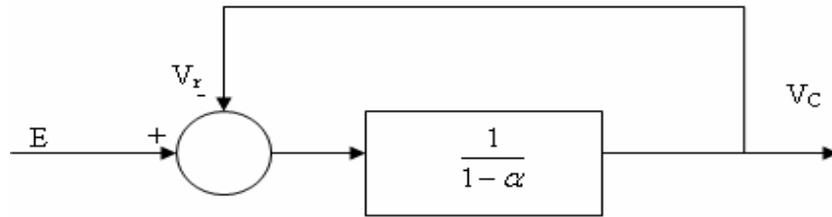


Figure (4.5) régulation de la tension V_c au niveau de l'hacheur

4.4.2. 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 S_i comme le montre la figure (4.6). [18]

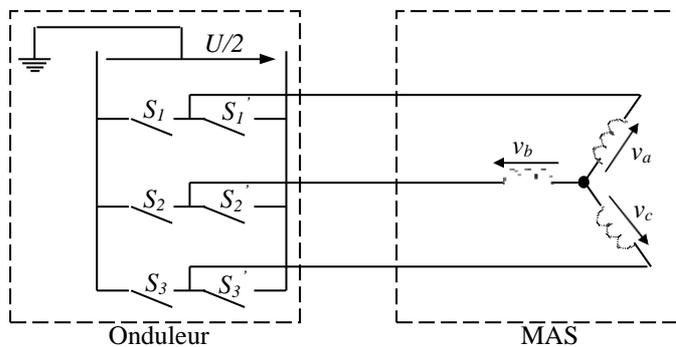


Figure (4.6) : représentation simplifier de l'onduleur

On attribue à chaque interrupteur de l'onduleur une fonction logique de connexion F_i . 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 :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{1}{3} U_{dc} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

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

$$i_e = [F][I] = F_1 i_a + F_2 i_b + F_3 i_c \quad (4.3)$$

4.4.2.1. Commande par MLI :

La stratégie de la commande MLI est basée sur la comparaison des trois signaux (tensions) V_a , V_b et V_c avec un signal triangulaire (souvent appelé porteuse) 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 (4.7). [19]

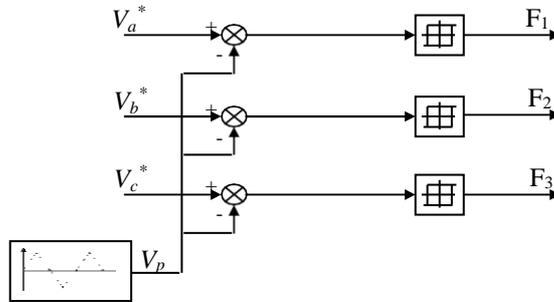


Figure (4.7) : Principe de commande de l'onduleur par MLI

L'association de l'onduleur à commande MLI avec la MAS est schématisée par la figure (4.8), les tensions de référence sont calculées par une transformation de coordonnées.

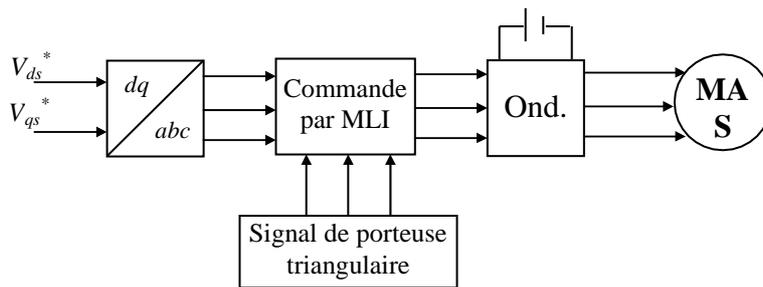


Figure (4.8) : Association de l'onduleur à hystérésis avec la MAS

Les tensions de sortie de l'onduleur avec la commande MLI sont schématisées par la figure (4.9)

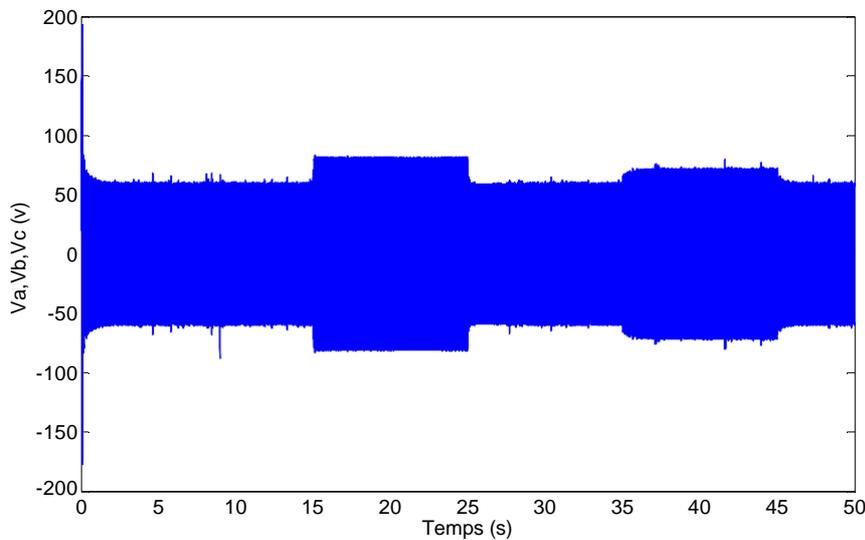


Figure (4.9) : Résultats de simulation des tensions avec la commande MLI

4.5. La machine asynchrone :**4.5.1 Constitution et principe de fonctionnement :****4.5.1.1. 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. [16,17]

4.5.1.2. Constitution :

Elle comporte un inducteur fixe nommé stator et un induit mobile nommé rotor, c'est un transformateur à champ tournant dont le primaire est 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 extérieure du cylindre, des conducteurs passent dans ces encoches, ils sont réunis en court-circuit, l'ensemble forme un bobinage polyphasé 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 boîte à bornes par l'intermédiaire de bagues collectrices (Figure (4.10)). [16,17]

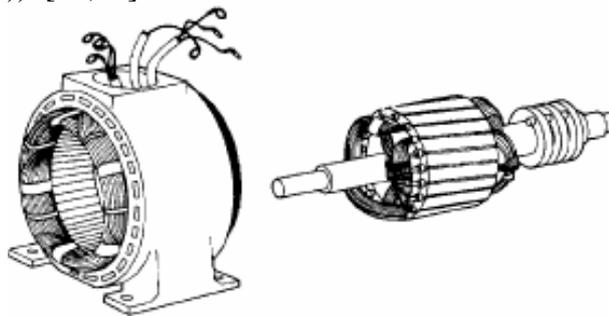


Figure (4.10) : Machine asynchrone à bagues

-à cage d'écureuil où chaque encoche comporte une barre Figure (4.11).

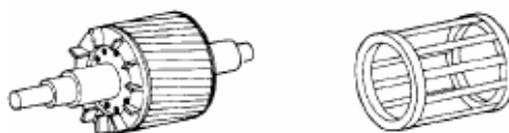


Figure (4.11) rotor d'une machine asynchrone à cage

4.5.1.3. 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

$$w_s = \frac{2 \cdot \pi \cdot f}{P} \quad [rad/s] \quad (4.4)$$

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. [16]

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

$$g = \frac{w_s - w_m}{w_s} \quad (4.5)$$

Avec :

w_m : La vitesse angulaire du rotor.

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

$$w_g = w_s - w_m = g \cdot w_s \quad (4.6)$$

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

$$f_r = \frac{P(w_s - w_m)}{2 \cdot \pi} \cdot g = g \cdot f \quad (4.7)$$

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 :

$$w_g = \frac{2 \cdot \pi \cdot f_r}{P} = \frac{2 \cdot \pi \cdot f}{P} \cdot g = g \cdot w_s \quad (4.8)$$

La vitesse du rotor est :

$$w_m = (1 - g)w_s \tag{4.9}$$

4.5.1.4. Caractéristiques mécaniques :

Le schéma équivalent de la MAS par phase est présenté par la figure (4.12), les équations qui régissent le système peuvent s'écrire comme suit : [16]

$$V_s = R_s \cdot I_s + jL_s \cdot \omega_s \cdot I_s + jL_m \cdot \omega_s \cdot I_r \tag{4.10}$$

$$V_r = (R_r / g) \cdot I_r + jL_r \cdot \omega_s \cdot I_s + jL_m \cdot \omega_s \cdot I_s = 0 \tag{4.11}$$

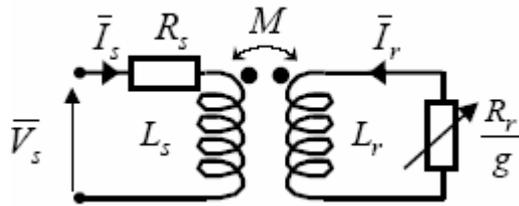


Figure (4.12) : Schéma par phase en régime permanent [16]

On peut ramener ce schéma au stator avec les fuites magnétiques totalisées au rotor ($N_r \cdot \omega_s$) (figure 4.13). Pour ce faire on pose :

$$N_r = L_r \sigma = L_r - \frac{L_m^2}{L_s}, N'_r = N_r \left| \frac{L}{L_m} \right|, R'_r = R_r \left| \frac{L}{L_s} \right| \tag{4.12}$$

On obtient donc les équations du schéma de la figure (4.13).

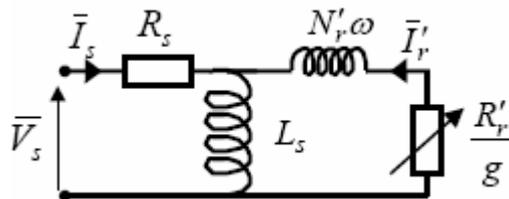


Figure (4.13) : Schéma équivalent au stator avec les fuites magnétiques totalisées au rotor

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

$$C_{em} = \frac{P_{em}}{\Omega} = 3 \frac{P}{\omega_s} \cdot \frac{R'_r}{g} \cdot I_r'^2 \tag{4.12}$$

$$I'_r = \frac{V_s - R_s \cdot I_s}{\frac{R'_r}{g} + jN \omega_s} \tag{4.13}$$

Si on néglige la résistance statorique on a :

$$I_r'^2 = \frac{V_s^2}{\left(\frac{R_r'}{g}\right)^2 + (N_r'ws)^2} \quad (4.14)$$

Donc le couple électromagnétique devient :

$$C_{em} = 3 \frac{P}{ws} \cdot V_s^2 \frac{R_r'}{g} \frac{1}{\left(\frac{R_r'}{g}\right)^2 + (N_r'ws)^2} \quad (4.15)$$

La caractéristique mécanique est le graphe de la fonction $C_{em}=f(n)$, figure (4.14). Le diagramme de cercle nous a permis de construire la courbe $C_{em}=f(g)$, figure (4.15).

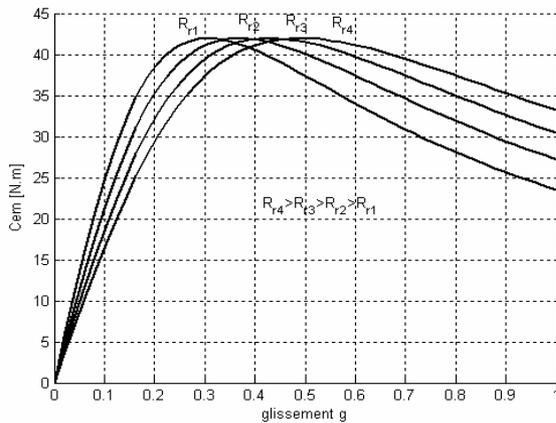


Figure (4.14) : couple électromagnétique en fonction du glissement [16]

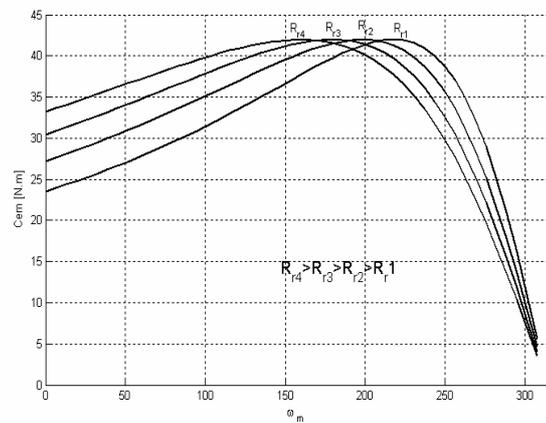


Figure (4.15) : couple électromagnétique en fonction de la vitesse de rotation[16]

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

4.5.1.4.1. 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 (4.16).

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

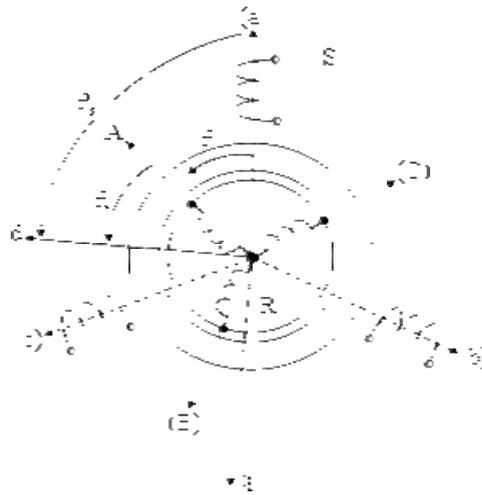


Figure (4.16) : Représentation schématique du circuit rotoriques et statorique d'une machine asynchrone triphasée

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

4.5.2. 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 calculs 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. [17]

4.5.2.1. 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 :

$$[v_{abc}] = R_s [i_{abc}] + \frac{d}{dt} [\phi_{abc}] \tag{4.16}$$

De même pour le rotor

$$[v_{ABC}] = R_R [i_{ABC}] + \frac{d}{dt} [\phi_{ABC}] \tag{1.17}$$

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

$$[v_{abc}] = \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad [i_{abc}] = \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad [\phi_{abc}] = \begin{bmatrix} \phi_a \\ \phi_b \\ \phi_c \end{bmatrix}$$

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

$$[\phi_{ABC}] \text{ et } [i_{ABC}]$$

4.5.2.2. Equations magnétiques :

$$[\phi_{abc}] = [L_s] \cdot [i_{abc}] + [L_m][i_{ABC}] \quad (4.18)$$

$$[\phi_{ABC}] = [L_r] \cdot [i_{ABC}] + [L_m]^T [i_{abc}] \quad (4.19)$$

$[L_s]$, $[L_r]$: 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 θ .

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

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

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

En introduisant (4.18) et (4.19) dans (4.16) et (4.17), on obtient :

$$[v_{abc}] = R_s [i_{abc}] + [L_s] \frac{d[i_{abc}]}{dt} + \frac{d}{dt} \{ [L_m] \cdot [i_{ABC}] \} \quad (4.20)$$

$$[v_{ABC}] = R_r [i_{ABC}] + [L_r] \frac{d[i_{ABC}]}{dt} + \frac{d}{dt} \{ [L_m]^T \cdot [i_{abc}] \}$$

4.5.2.3. Equation mécanique :

Le fonctionnement de la MAS en charge est régi par l'équation fondamentale suivante : [17]

$$J \frac{d\Omega}{dt} = C_{em} - C_r - f_c \cdot \Omega \quad (4.21)$$

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

$$C_{em} - C_r = \frac{J}{P} \frac{dw_m}{dt} + \frac{f_c}{P} \cdot w_m \quad (4.22)$$

4.5.2.4. 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 $\frac{d\theta_r}{dt} = w_s - w_m = g \cdot w_s.$

4.5.3. 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, en 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 : [16,17]

$$[A] = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \left(\theta - \frac{4\pi}{3} \right) \\ \sin \theta & \sin \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) & \sin \left(\theta - \frac{4\pi}{3} \right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (4.23)$$

Et la matrice de transformation inverse est : [16,17]

$$[A]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 1 \\ \cos \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) & \sin \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) & \frac{\sqrt{2}}{1} \\ \cos \left(\theta - \frac{4\pi}{3} \right) & \sin \left(\theta - \frac{4\pi}{3} \right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (4.24)$$

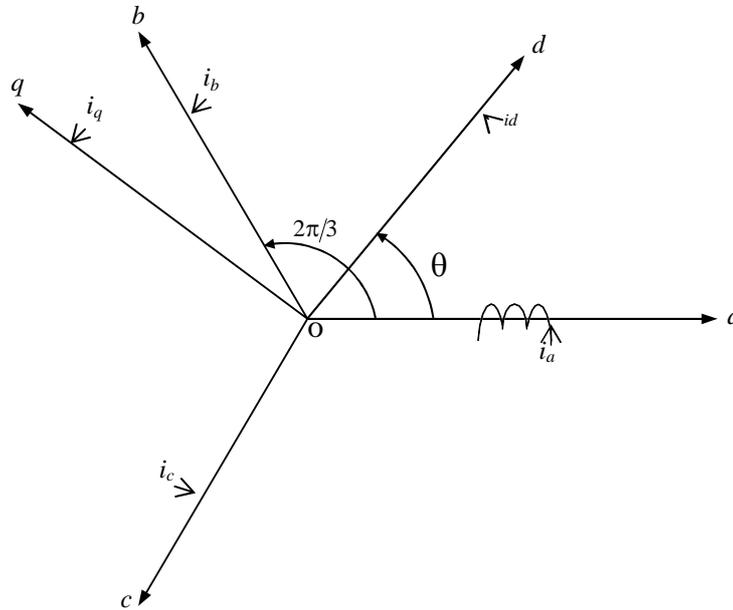


Figure (4.17) : système triphasé (O_{abc}) et diphasé (O_{dq})

Posons :

$$\begin{bmatrix} x_{dqo} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_d \\ x_q \\ x_o \end{bmatrix} \quad \text{et} \quad \begin{bmatrix} x_{abc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} \quad (4.25)$$

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

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

$$\begin{bmatrix} x_{dqo} \end{bmatrix} = [A] \cdot \begin{bmatrix} x_{abc} \end{bmatrix} \quad (4.26)$$

La transformation inverse est définie par :

$$\begin{bmatrix} x_{abc} \end{bmatrix} = [A]^{-1} \begin{bmatrix} x_{dqo} \end{bmatrix} \quad (4.27)$$

4.5.3.1 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 :

$$[v_{abc}] = [R_s][I_{abc}] + \frac{d}{dt}[\phi_{abc}] \quad (4.28)$$

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

$$[A][v_{abc}] = [A][R_s][i_{abc}] + [A]\frac{d}{dt}[\phi_{abc}] \quad (4.29)$$

Dans un référentiel lié au champ tournant, on a :

$$v_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d\phi_{ds}}{dt} - \omega_s \phi_{qs} \quad (4.30)$$

$$v_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d\phi_{qs}}{dt} - \omega_s \phi_{ds} \quad (4.31)$$

$$v_{dr} = 0 = R_r i_{dr} + \frac{d\phi_{dr}}{dt} - \omega_g \phi_{qr} \quad (4.32)$$

$$v_{qr} = 0 = R_r i_{qr} + \frac{d\phi_{qr}}{dt} - \omega_g \phi_{dr} \quad (4.33)$$

$$\text{Avec } \omega_g = \omega_s - \omega_m$$

a. Equation magnétique

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

$$[\phi_{abc}] = [L_s][I_{abc}] + [L_m][I_{ABC}] \quad (4.34)$$

En multipliant les deux membres par [A]

$$[A][\phi_{abc}] = [A][L_s][I_{abc}] + [A][L_m][I_{ABC}] \quad (4.35)$$

L'expression des flux statoriques prend la forme :

$$\phi_{ds} = L_s I_{ds} + L_m I_{dr} \quad (4.36)$$

$$\phi_{qs} = L_s I_{qs} + L_m I_{qr} \quad (4.37)$$

On obtient de la même manière pour le rotor

$$\phi_{dr} = L_r I_{dr} + L_m I_{ds} \quad (4.38)$$

$$\phi_{qr} = L_r I_{qr} + L_m I_{qs} \quad (4.39)$$

a. Couple électromagnétique

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

$$P_e = v_{ds} \cdot i_{ds} + v_{qs} \cdot i_{qs} + v_{dr} \cdot i_{dr} + v_{qr} \cdot i_{qr} \quad (4.40)$$

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

$$\begin{aligned}
 P_e = & R_s \cdot i_{ds}^2 + i_{ds} \frac{d\phi_{ds}}{dt} - i_{ds} \cdot w_s \cdot \phi_{qs} + R_s \cdot i_{qs}^2 + i_{qs} \frac{d\phi_{qs}}{dt} - i_{qs} \cdot w_s \cdot \phi_{ds} \\
 & + R_r \cdot i_{dr}^2 + i_{dr} \frac{d\phi_{dr}}{dt} - i_{ds} \cdot w_s \cdot \phi_{qr} + R_r \cdot i_{qr}^2 + i_{qr} \frac{d\phi_{qr}}{dt} - i_{qs} \cdot w_s \cdot \phi_{dr}
 \end{aligned} \quad (4.41)$$

Elle se décompose en trois séries de termes.

✚ **Puissance dissipée en perte joule.**

$$P = R_s \cdot (i_{ds}^2 + i_{qs}^2) + R_r \cdot (i_{dr}^2 + i_{qr}^2) \quad (4.42)$$

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

$$P_{em} = i_{ds} \frac{d\phi_{ds}}{dt} + i_{qs} \frac{d\phi_{qs}}{dt} + i_{dr} \frac{d\phi_{dr}}{dt} + i_{qr} \frac{d\phi_{qr}}{dt} \quad (4.43)$$

✚ **Puissance mécanique.**

$$P_{mec} = w_s \cdot (i_{ds} \cdot \phi_{qs} - i_{qs} \cdot \phi_{ds}) + w_r \cdot g \cdot (i_{dr} \cdot \phi_{qr} - i_{qr} \cdot \phi_{dr}) \quad (4.44)$$

En tenant compte des équations des flux on peut écrire que :

$$P_m = w (i_{ds} \cdot \phi_{qs} - i_{qs} \cdot \phi_{ds}) \quad (4.45)$$

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

$$C_{em} = P (i_{ds} \cdot \phi_{qs} - i_{qs} \cdot \phi_{ds}) \quad (4.46)$$

En remplaçant les équations (4.37) et (4.37) dans (4.46), on obtient alors :

$$C_{em} = P [(L_s i_{ds} + L_m i_{dr}) i_{qs} - (L_s i_{qs} + L_m i_{qr}) i_{ds}] \quad (4.47)$$

Donc :

$$C_{em} = P \cdot L_m (i_{dr} \cdot i_{qs} - i_{qr} \cdot i_{ds}) \quad (4.48)$$

$$\phi_{dr} = L_r i_{dr} + L_m i_{ds}, \text{ soit } i_{dr} = \frac{\phi_{dr} - L_m i_{ds}}{L_r} \quad (4.49)$$

$$\phi_{qr} = L_r i_{qr} + L_m i_{qs}, \text{ soit } i_{qr} = \frac{\phi_{qr} - L_m i_{qs}}{L_r} \quad (4.50)$$

En remplaçant les équations (4.49) et (4.50) dans (4.48), nous obtenons :

$$C_{em} = \frac{P \cdot L_m}{L_r} (\phi_{dr} \cdot i_{qs} - \phi_{qr} \cdot i_{ds}) \quad (4.51)$$

4.5.4. Modèle d'état de la machine asynchrone :

Nous considérons comme variables d'état les courants statorique (i_{ds} , i_{qs}), les flux rotorique (ϕ_{dr} , ϕ_{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 comme suit : [17]

$$\left\{ \begin{aligned}
 \frac{di_{ds}}{dt} &= \frac{1}{\sigma L_s} \left(-R_s + \left(\frac{L_m}{L_r} \right)^2 \cdot R_r \right) i_{ds} + \sigma \cdot L_s \cdot \omega \cdot i_{qs} + \frac{L \cdot R}{L^2} \phi_{dr} + \frac{L}{L_r} \cdot \phi_{qr} \cdot \omega + V_{ds} \\
 \frac{di_{qs}}{dt} &= \frac{1}{\sigma L_s} \left(-\sigma L_s \omega i_{ds} - \left(R_s + \left(\frac{L_m}{L_r} \right)^2 \cdot R_r \right) i_{qs} - \frac{L}{L_r} \cdot \phi_{dr} \cdot \omega + \frac{L \cdot R}{L^2} \phi_{qr} + V_{qs} \right) \\
 \frac{d\phi_{dr}}{dt} &= \frac{L_m \cdot R_r}{L_r} i_{ds} - \frac{R_r}{L_r} \phi_{dr} + (\omega_s - \omega_m) \phi_{dr} \\
 \frac{d\phi_{qr}}{dt} &= \frac{L_m \cdot R_r}{L_r} i_{qs} - (\omega_s - \omega_m) \phi_{qr} - \frac{R_r}{L_r} \cdot \phi_{qr} \\
 \frac{\delta \lambda_m}{dt} &= \frac{\lambda_m}{L_r \cdot J} (i_{qs} \cdot \phi_{dr} - i_{ds} \cdot \phi_{qr}) - \frac{c}{J} \cdot \omega_m - \frac{C}{J} r
 \end{aligned} \right. \quad (4.52)$$

Où σ est le coefficient de dispersion : $\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_r \cdot L_s}$

$$K = PL_m / (L_r).$$

4.5.5. 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 ;

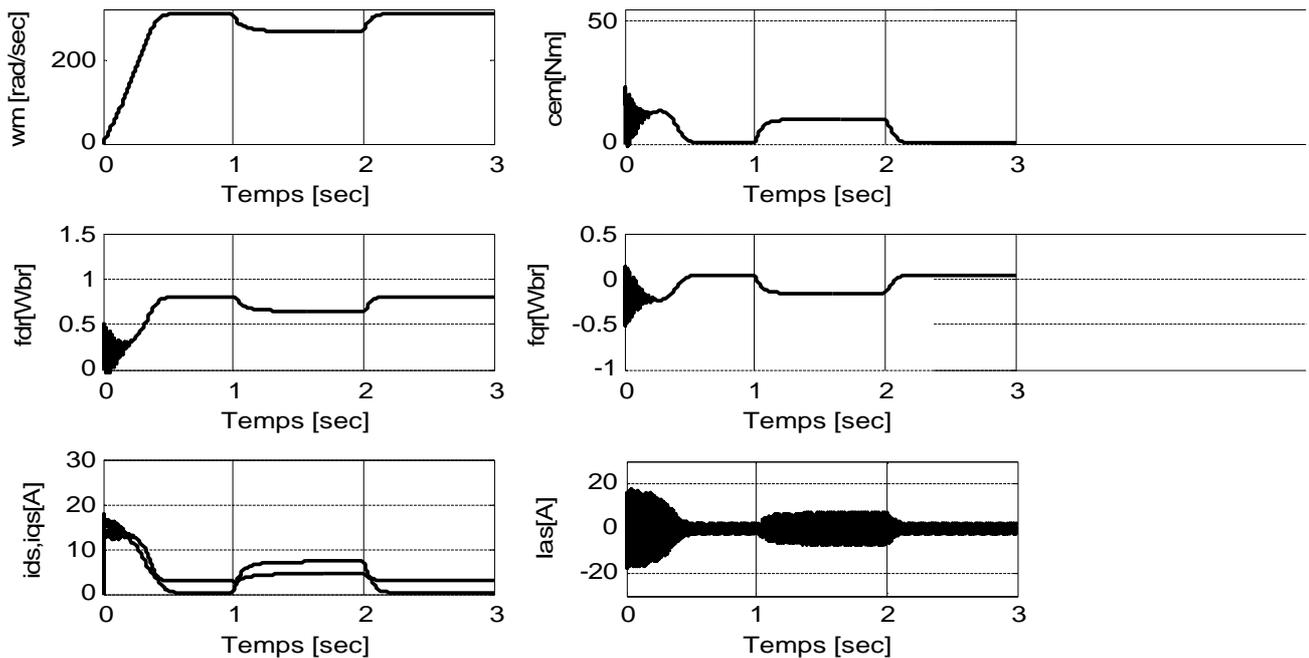


Figure (4.18) : Comportement dynamique de la MAS avec une alimentation sinusoïdale

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.

4.6. La commande vectorielle de la machine asynchrone :

4.6.1. Introduction

Dans le but de commander la machine asynchrone, les chercheurs ont développés des transformations mathématiques pour extraire des courants de ligne des variables a fin de commander indépendamment le flux et le couple et avoir le découpage qui existe naturellement dans une machine à courant continu.

Ce type de contrôle est connu sous le nom de contrôle vectoriel. Bien avant il existait des méthodes très simples et limitées à certaines applications qui ont connus après un développement au fur et à mesure que le développement de l'électronique de puissance et de la micro-électronique.

4.6.2. Principe de la commande vectorielle

La commande par flux orienté est une technique qui apparaît de nos jours dans la littérature traitent les méthodes de contrôle des machines électriques à courant alternatif, dont l'étymologie nous ramène à une notion élémentaire très importante de l'électromagnétique. [20]

La force exercée sur un conducteur parcouru par un courant et placé dans un champ magnétique, est égale au produit vectoriel du vecteur courant par le vecteur champ. Elle donc sera maximale quand le vecteur courant sera perpendiculaire au vecteur champ.

Le principe d'orientation du flux est apparu par les travaux de Blaschke au début des années 70. Il consiste à placer dans le repère ($d-q$) tel que l'axe (d) avec la direction du flux ou le courant a fin de rendre le comportement de la machine asynchrone similaire à celui d'une machine à courant continu à excitation séparée. Le flux est donc contrôlé par le courant inducteur et le couple par le courant induit. Le but de cette commande est d'éliminer le couplage entre l'induit et l'inducteur et de ramener son fonctionnement comparable a celui d'une MCC en décomposant le courant statorique en deux composantes, dont l'une contrôle le flux et l'autre contrôle le couple.

Plusieurs types d'orientation ont été utilisés dans la littérature, à savoir l'orientation du flux rotorique, l'orientation du flux statorique et l'orientation du flux d'entrefer.

4.6.3. Orientation du flux rotorique

Dans la machine asynchrone, le principe d'orientation consiste à aligner le flux rotorique sur l'axe direct du repère de Park.

Il s'agit d'imposer la pulsation de glissement comme suit :

$$w = \frac{L_m R_r}{L_r \cdot \phi_r} \cdot i_{qs} \quad (4.53)$$

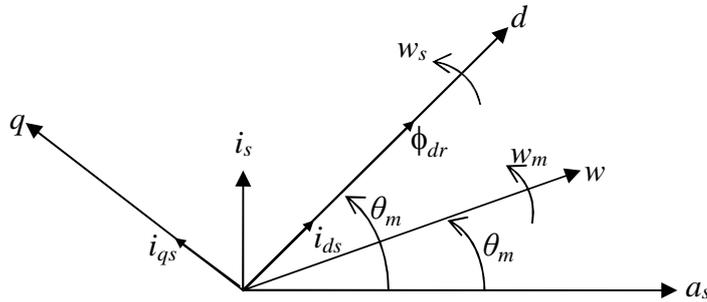


Figure (4.19) : Principe d'orientation du flux rotorique

Nous obtenons :

$\phi_r = \phi_{dr}$ et $\phi_{qr} = 0$, et l'expression du couple électromagnétique devient :

$$C_{em} = \frac{P \cdot L_m}{L_r} \phi_{dr} \cdot i_{qs} \quad (4.54)$$

Ainsi, le modèle devient : [20]

$$\begin{cases} v_{qs} = \sigma L_s \frac{d i_{qs}}{dt} + w_s \sigma L_s i_{qs} + \left(R_s + R_r \frac{m}{L_r^2} \right) i_{qs} + \frac{m}{L_r} w \phi_r \\ T_r \frac{d \phi_r}{dt} + \phi_r = L_m i_{ds} \\ w = w_s + \frac{L_m i_{qs}}{T_r \cdot \phi_r} \end{cases} \quad (4.55)$$

Après transformation de la place, nous pouvons écrire :

$$\phi_r = \frac{L_m}{1 + \frac{L_r}{R_s}} i_{ds} \quad \text{et} \quad C_{em} = \frac{P L_m}{L_r} \phi_r i_{qs} \quad (4.56)$$

D'après l'équation (4.55) et (4.56), nous constatons qu'il est possible d'agir indépendamment sur le flux rotorique et le couple électromagnétique par l'intermédiaire des composantes du courant statoriques i_{ds} et i_{qs} respectivement.

Trois méthodes de la commande vectorielle peuvent être distinguées, à savoir la :

- ✚ Méthode directe,
- ✚ Méthode indirecte,
- ✚ Méthode simplifiée.

4.6.4. Commande vectorielle indirecte (IFOC) :

La stratégie appliquée dans ce travail est la commande vectorielle indirecte. Le principe de cette méthode de commande est de négliger l'utilisation de l'amplitude du flux rotorique et considère uniquement sa position calculée en fonction des grandeurs de référence. Cette méthode présente l'avantage que l'emploi d'un capteur de flux (capteur physique ou modèle dynamique) n'est pas nécessaire. Cependant l'utilisation d'un capteur de position du rotor est inévitable.

Cette méthode consiste à générer à l'aide d'un bloc IFOC (Indirect Field Oriented Control), les tensions d'alimentation afin d'obtenir un flux et un couple désirés.

Le schéma de principe de la loi de commande vectorielle indirecte est présenté dans la figure (4.20) [16]

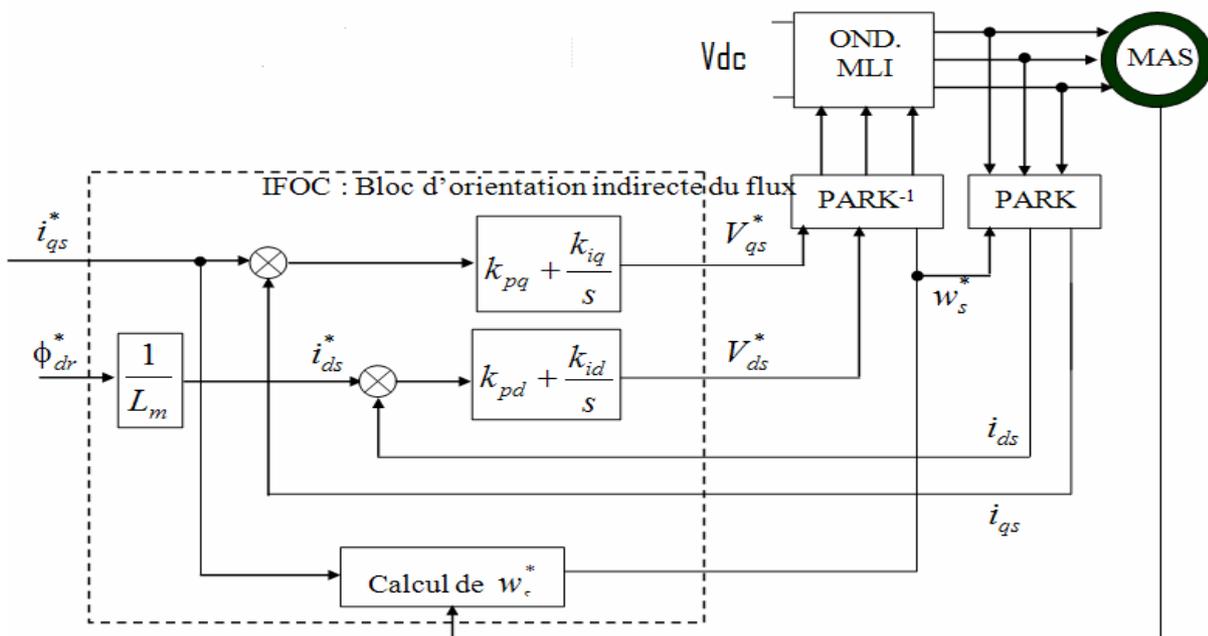


Figure (4.20) : Schéma de principe de la commande vectorielle indirecte.

Le bloc de contrôle IFOC (génère les trois grandeurs de commande V_{qs}^* , V_{ds}^* et w_{qs}^* en fonction des deux entrées de référence (i_{qs}^* , ϕ_{dr}^*) qui assurent le découplage.

Ces grandeurs de commande générées par le IFOC sont utilisées pour contrôler les composants direct i_{ds} et quadratiques i_{qs} du courant statorique de façon à obtenir des courants identiques aux courants de référence, et par conséquent, le flux et le couple maintenus à leurs valeurs de référence.

Le calcul des régulateurs est effectué à l'aide du principe d'imposition des pôles.

4.6.4.1. Régulateur du courant i_{qs} :

Le régulateur du courant en quadrature fournit la tension v_{qs}^r nécessaire pour maintenir le couple à sa valeur de référence. La fonction de transfert i_{qs} / v_{qs}^r est donnée par :

$$\frac{i_{qs}}{v_{qs}^r} = \frac{1/\sigma L_s}{s + \rho_s} \quad (4.57)$$

Avec : $\rho_s = R_s / \sigma L_s$

La boucle de régulation du courant est représentée par la figure (4.21)

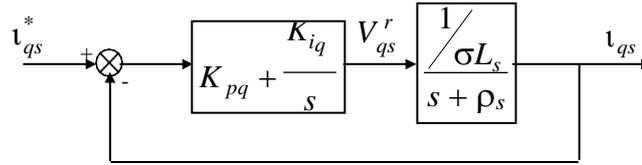


Figure (4.21): Schéma de régulation du courant i_{qs}

La fonction de transfert en boucle fermée est donnée comme suit :

$$\frac{i_{qs}}{i_{qs}^*} = \frac{(K_{pq} \cdot s + K_{iq}) \left(\frac{1}{\sigma L_s} \right)}{s^2 + \frac{R_s + K_{pq}}{\sigma L_s} \cdot s + \frac{K_{iq}}{\sigma L_s}} \quad (4.58)$$

L'équation caractéristique est du deuxième ordre, donc en imposant deux pôles complexes conjugué à partir réelle négative $s_{1,2} = -\rho \pm j \cdot \rho$ d'où :

$$\rho(s) = s^2 + 2 \rho s + 2 \rho^2 \quad (4.59)$$

Par identification, nous obtenons les paramètres du régulateur PI :

$$K_{iq} = 2 \cdot \sigma \cdot L_s \cdot \rho^2 \quad \text{et} \quad K_{pq} = 2\rho \cdot \sigma \cdot L_s - R_s \quad (4.60)$$

4.6.4.2. Régulateur du courant i_{ds}

Le régulateur du courant direct fournit la tension v_{ds}^r nécessaire pour maintenir le flux à sa valeur de référence.

La fonction de transfert i_{ds} / v_{ds}^r est donnée par :

$$\frac{i_{ds}}{v_{ds}^r} = \frac{1/\sigma L_s}{s + \rho_s} \quad (4.61)$$

Avec : $\rho_s = R_s / \sigma L_s$

Les mêmes calculs effectués pour le régulateur du courant i_{qs} sont appliqués à ce régulateur.

Les paramètres du régulateur sont donc les mêmes. Il sont donnés par :

$$K_{id} = 2\sigma L_s \cdot \rho^2 \quad \text{et} \quad K_{pq} = 2\rho \cdot \sigma L_s - R_s \quad (4.62)$$

Pour tester l'efficacité du découplage à l'aide du bloc IFOC une simulation des flux ϕ_{dr} et ϕ_{qr} , du couple et des courants i_{ds} , i_{qs} est présentée sur la figure (4.22)

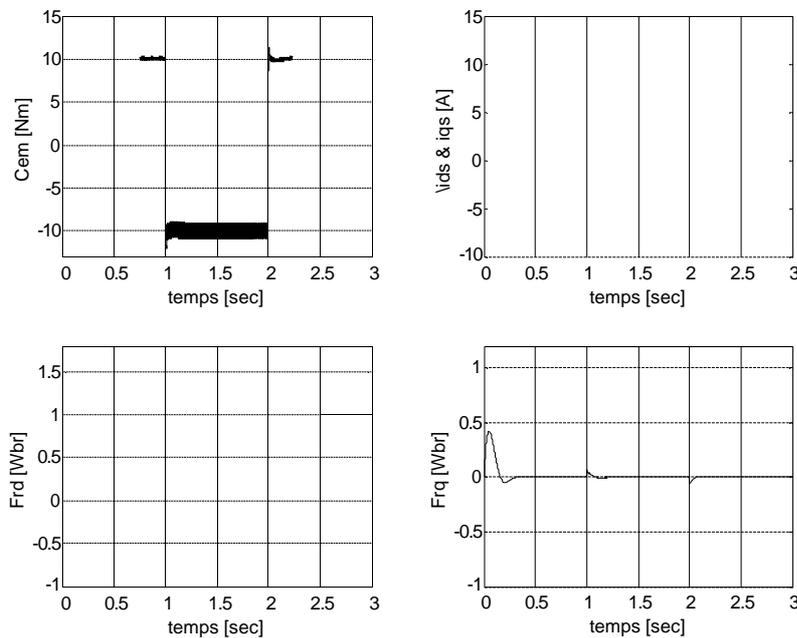


Figure (4.22) : Orientation du flux rotorique par la méthode indirecte.

Les résultats montrent que le flux rotorique et le couple suivent ses valeurs de consigne et ils présentent des dépassements pendant le démarrage moins importants que aux obtenus par la méthode directe.

4.6.5. Réglage de la MAS par la commande vectorielle indirecte :

Le schéma de principe de la commande en vitesse et en position de la machine asynchrone par la méthode indirecte est présenté par la figure (4.23).

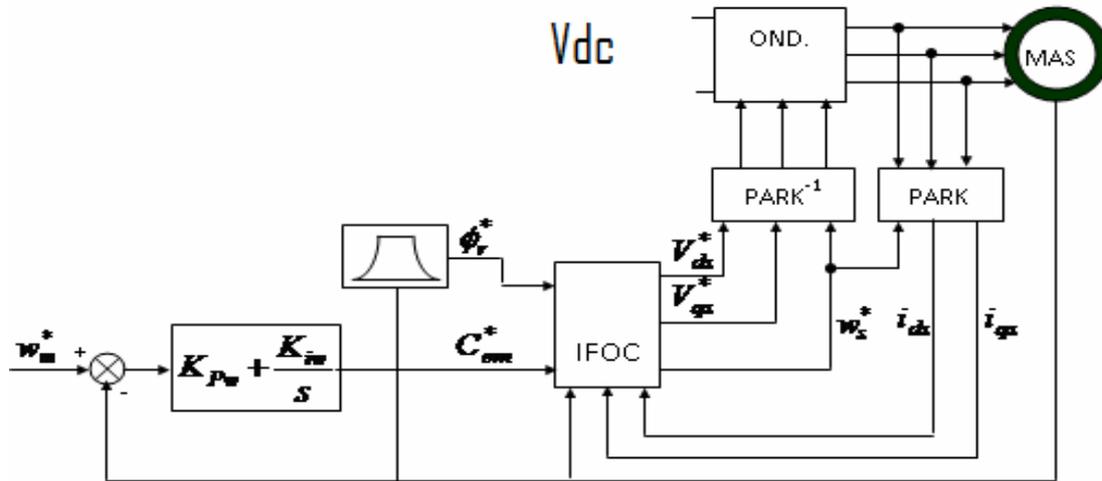


Figure (4.23): Schéma de principe de la commande vectorielle indirecte d'une MAS

4.6.6. Calcul du régulateur de vitesse :

Le régulateur de vitesse permet de déterminer le couple de référence, afin de maintenir la vitesse correspondante. Pour que la cascade soit justifiée, il faut que la boucle interne soit très rapide par rapport à celle de la vitesse.

L'équation mécanique donne :

$$\frac{w_m}{C_{em}} = \frac{P}{f_c + J \cdot s} \quad (4.63)$$

Le schéma bloc de régulation de la vitesse est donc réalisé comme indiqué par la figure (4.24).

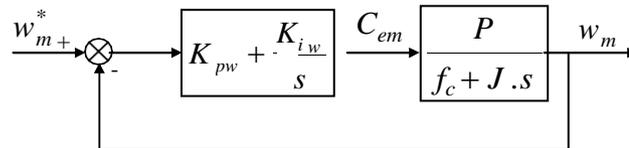


Figure (4.24) : Schéma bloc de régulation de la vitesse.

La fonction de transfert en boucle fermée est donnée par :

$$\frac{w_m}{w_m^*} = \frac{(K_{pw} \cdot s + K_{iw}) \frac{P}{J}}{\rho(s)} \quad (4.64)$$

L'équation caractéristique $\rho(s)$ est :

$$\rho(s) = s^2 + \frac{f_c + K_{pw} P}{J} \cdot s + \frac{K_{iw} P}{J} = 0 \quad (4.65)$$

Par imposition de deux pôles complexes conjugués $s_{1,2} = \rho \pm j\beta$ en boucle fermée et par identification, on obtient les paramètres du régulateur PI :

$$K_{iw} = \frac{2 \cdot J \cdot \rho^2}{P} \quad \text{et} \quad K_{pw} = \frac{2 \cdot \rho \cdot J - f_c}{P} \quad (4.66)$$

4.6.7. Résultat de simulation avec la commande MLI:

Les paramètres du régulateur de vitesse sont calculés par un emplacement de pôle ($\rho = 16$).

Les mêmes testes de simulation effectués pour la commande directe ont été effectués pour la commande vectorielle indirecte de la vitesse. Pour évaluer les performances de réglage, nous avons simulé un démarrage à vide (vitesse consigne $w^* = 200$ rad/s) suivi par une application et élimination d'une charge ($C_r^i = 10 N.m$) aux instants $t = 1s$ et $t = 2s$, respectivement. Puis une application d'un changement de consigne à l'instant $t = 3 s$ (figure (4.25)).

Les résultats nous montrent clairement que la vitesse suit sa valeur de référence avec un dépassement et un bon rejet des perturbations. En plus, le courant est maintenu à sa valeur admissible. Le découplage entre le flux et le couple est maintenu, mais affecté par rapport à la commande directe, dû à l'absence de régulateur de flux.

On note aussi, une amélioration visible apportée sur la dynamique du couple et en conséquence sur la dynamique de la vitesse par le réglage direct par rapport au réglage indirecte.

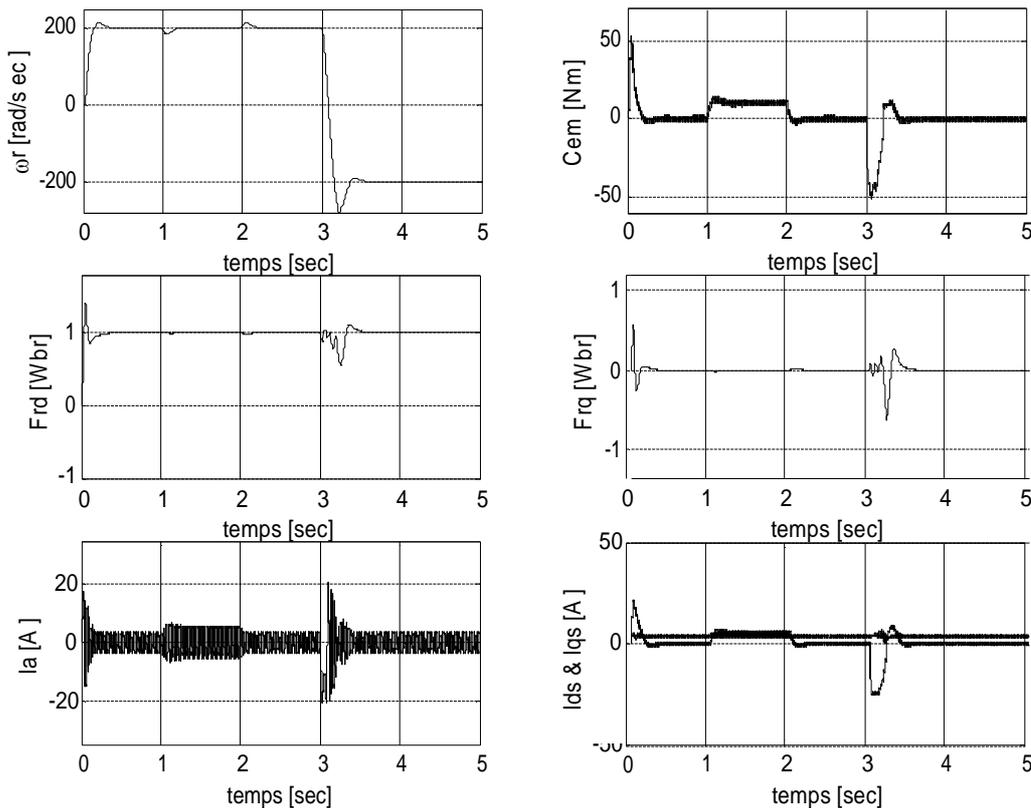
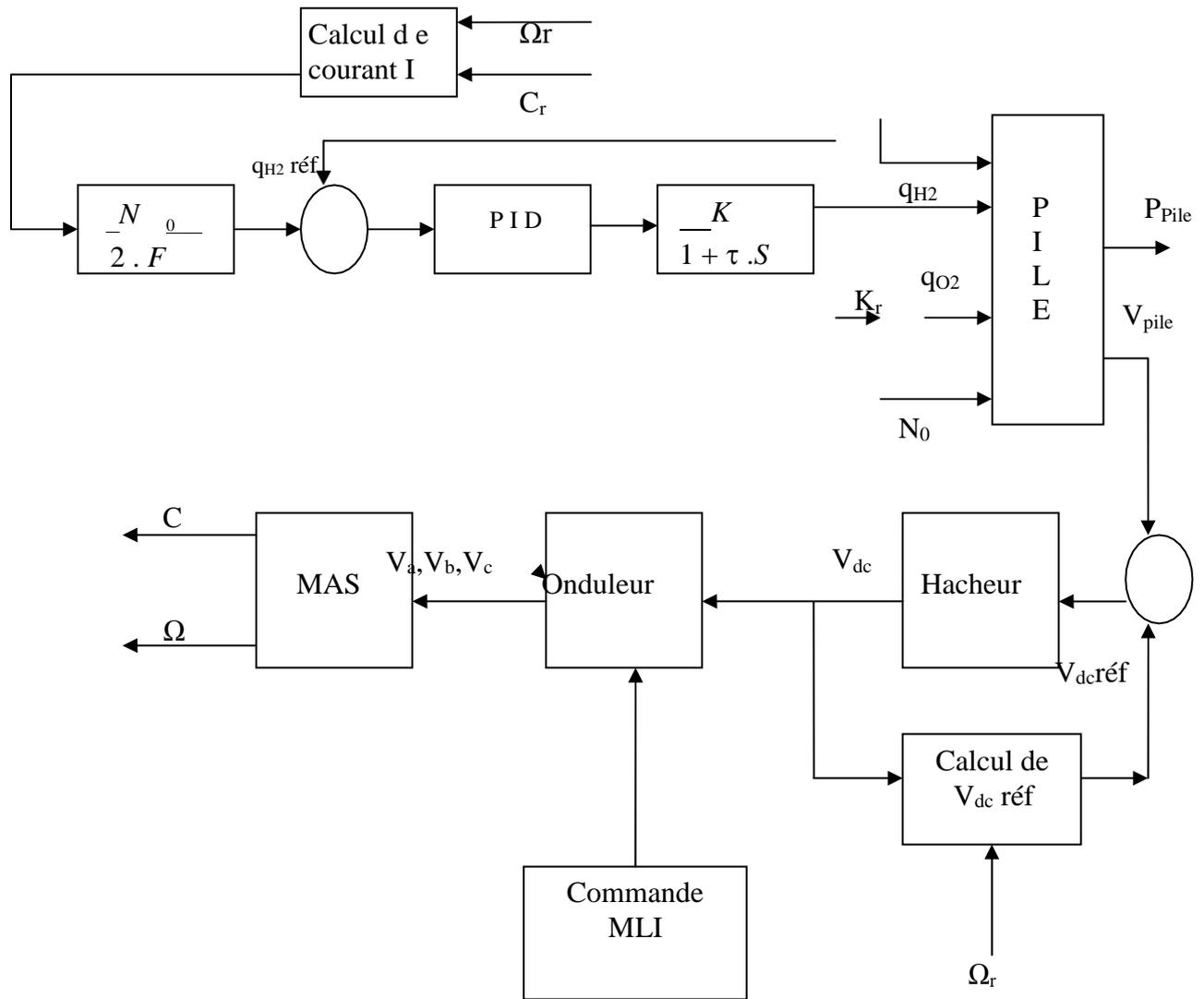


Figure (4.25) : Réglage de vitesse de la MAS par la commande vectorielle indirecte

4.7. Résultats de simulation :

La figure (4.27) représente le schéma global du système de traction à pila a combustible qui comporte en plus de la bouteille de l'hydrogène, la pile a combustible, l'hacheur, l'onduleur et la machine asynchrone,



La figure (4.27) : le schéma global du système de traction à pile a combustible

Durant la simulation du système global, on veut voir la réponse dynamique de la pile a combustible PEMFC devant un changement de couple et une variation de vitesse.

Les figures (4. 28) et (4. 29) représentent respectivement un changement de vitesse et un changement de couple en fonction de temps.

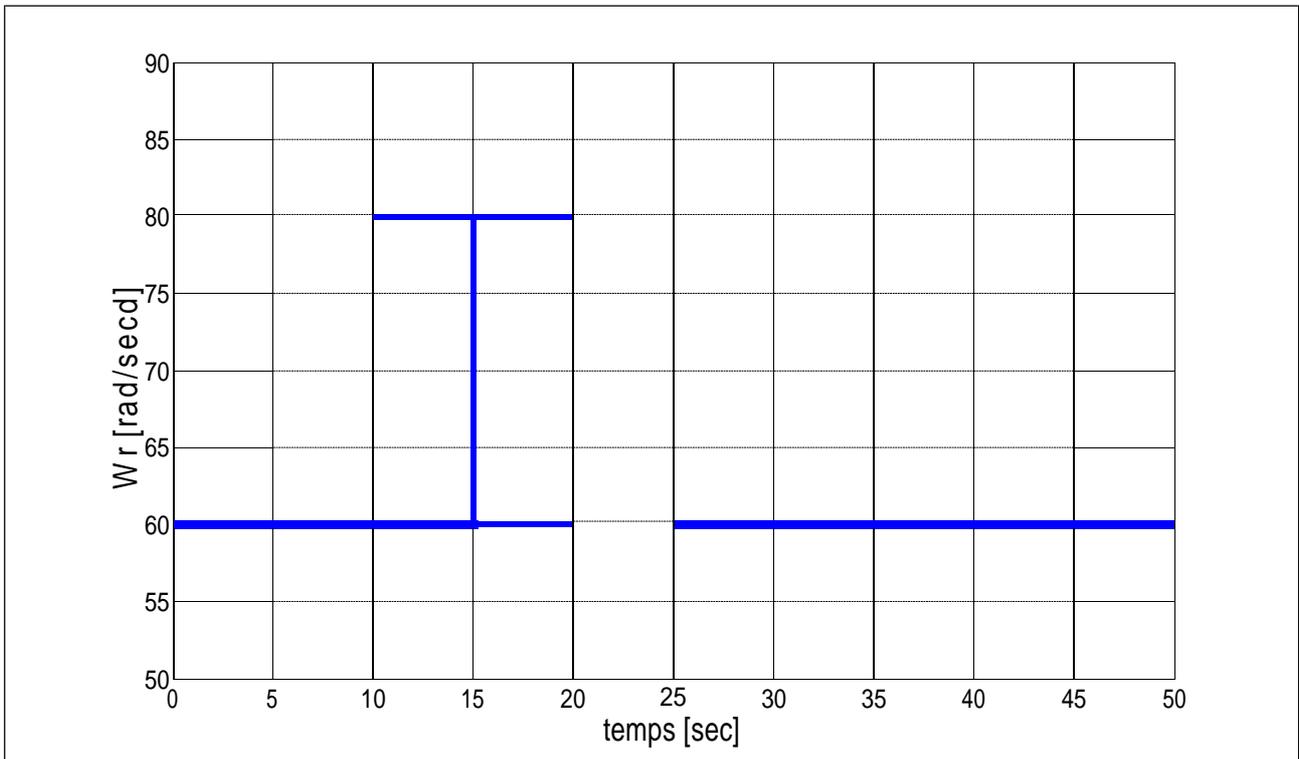


Figure (4.28) : variation de vitesse en fonction de temps

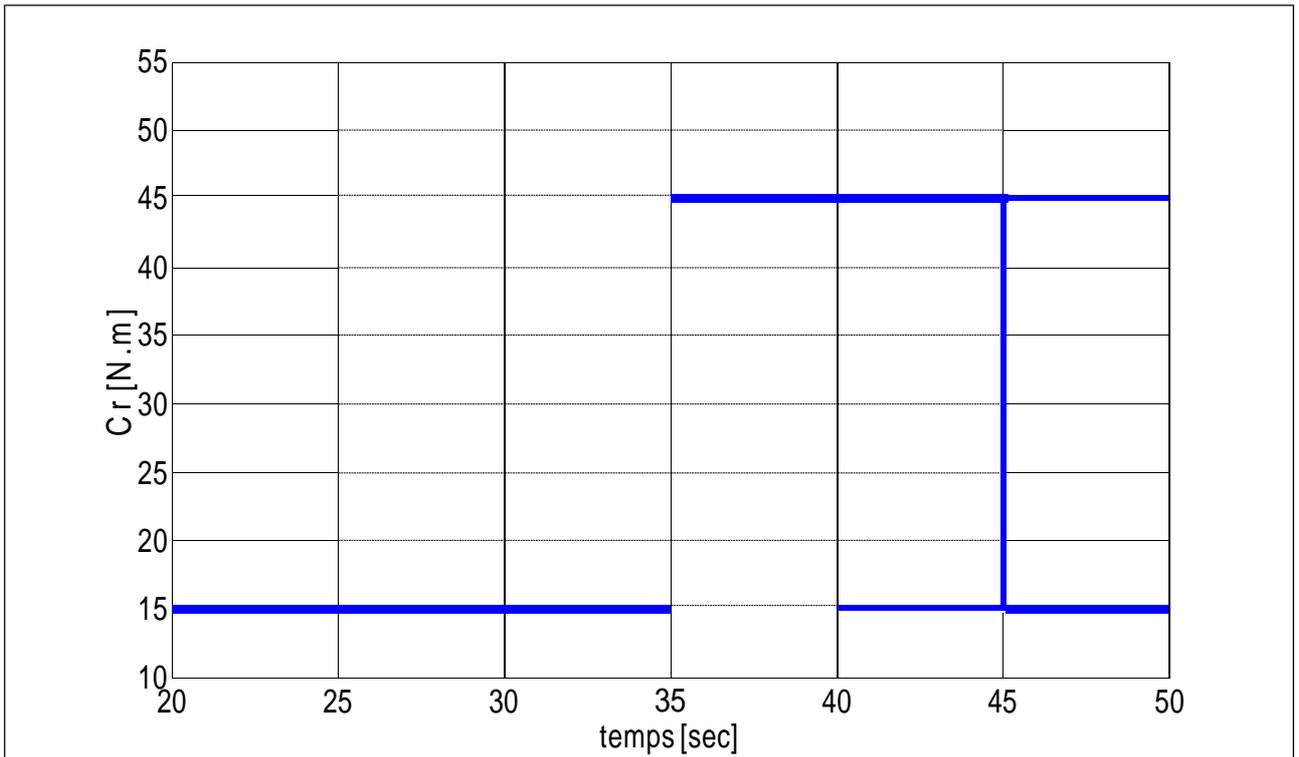


Figure (4.29) : variation de couple résistant en fonction de temps

4.8. 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.

La pile à combustible PEMFC a pu délivrer une puissance selon la demande de la MAS (variation de couple et variation de puissance) et la MAS a bien suivi les consignes (vitesse et couple).

Conclusion:

Dans ce mémoire nous avons présenté les piles à combustible, leurs différentes technologies, leurs caractéristiques électriques et chimiques et les différentes pertes. Un modèle de la pile PEM qui prend en considération l'effet de la température et de la pression sur les caractéristiques de la pile, écrit en Matlab, a été développé. La simulation sous l'environnement Matlab a permis d'obtenir un rendement compris entre 30% et 45%. Le modèle a été utilisé pour étudier le commande d'un système hybride ultérieure : Une véhicule électrique .

Bibliographie

- [1]. Observ'ER, « La production d'électricité d'origine renouvelable dans le monde », Collection chiffres et statistiques, Onzième inventaire, Edition 2009.
- [2]. W. Friede, « Modélisation et caractérisation d'une pile à combustible de type PEM ». Thèse INPL, Nancy, 28 août 2003
- [3]. A. LACHICHI, « Modélisation et stabilité d'un régulateur hybride de courant - Application aux convertisseurs pour pile à combustible », thèse de doctorat, université de Franche-Comté, novembre 2005
- [4]. Observatoire européen LEADER/AEIDL « Sources d'énergies renouvelables, source de développement durable », 1999.
- [5]. Commission Européenne, Communication de la Commission, « Énergie pour l'avenir : Les sources d'énergies renouvelables », Livre Blanc établissant une stratégie et un plan d'action communautaires, 1997.
- [6]. K. W. E. Cheng, D. Sutanto, Y. L. Ho, K. K. Law Exploring, « the power conditioning system for fuel cell ». Power Electronics Specialists Conference, PESC'01, 2001, vol. 4, pp. 2197-2202.
- [7]. ENERGIE 21 Centre France, « L'éolien, énergie du futur », 2008.
- [8]. EDF, Direction Participations & Activités Nouvelles, « La biomasse : production d'électricité », 2006.
- [9]. R. Benchrifa, A. Bennouna, et D. Zejli, « Rôle de l'hydrogène dans le stockage de l'électricité à base des énergies renouvelables », conférence 2IWH 2007, 27-29 Octobre 2007, Ghardaïa (Algérie).
- [10]. Victor Mester, « Conception Optimale Systémique des Composants des Chaînes de Traction Electrique », thèse de doctorat, Ecole centrale de Lille, mai 2007.
- [11]. Nicolas Romani, « Modélisation et Commande du Système d'Alimentation en Air pour le Module de Puissance d'un Véhicule à Pile à Combustible avec Reformeur Embarqué », thèse de doctorat, Université de Paris Sud, 24 Septembre 2007

- [12]. Julien Scorida , « Approche systématique de l'optimisation du dimensionnement et de l'élaboration de lois de gestion d'énergie de véhicules hybrides », thèse de doctorat, Université Henri Poincaré- Nancy 1, 10 novembre 2004.
- [13]. Jérôme BERNARD, « Véhicules hybrides à pile à combustible : dimensionnement et stratégies de commande », thèse de doctorat, l'université de valenciennes et du hainaut-cambresis, 03 décembre 2007du
- .
- [14]. BACHER PIERRE : L'ENERGIE EN 21 QUESTIONS, Paris, Odile Jacob, avril 2007.
- [15]. Muhammad H. Rashid , « FUEL CELLS Modeling, Control, and Applications», Series Editor. University of West Florida.
- [16]. K. Kordesch et G. Simader, « Fuels Cells and Their Applications », ed VCH (1996).
- [17]. Cours disponible sur: www.ulb.ac.be/infosciences/files/piles.pdf
- [18]. Cours disponible sur: <https://tpepilecombustible.wordpress.com>
- [19]. P.THONTHONG, « conception d'une source hybride utilisant une pile a combustible et des supercondensateurs », these de doctorat, l'institut national polytechnique de lorraine, 2005.
- [20]. M.ZANDI, « contribution Au Pilotage des sources Hybrides d'énergie électrique », thèse de doctorat, Université NANCY Institut National Polytechnique de LORRAINE, 2010.
- [21]. B.WAHDAME, « Analyse et optimization du fonctionnement de piles à combustible par la méthode des plans d'expériences », thèse de doctorat, université de technologie de belfort montbeliard et de l'université de France – Comté, 2006.
- [22]. J.LACHAIZE, « Etude des stratégies et des structures de commande pour le pilotage des systèmes énergétiques à Pile à Combustible (PAC) destinés à la traction », thèse de doctorat, L'institut National Polytechnique de Toulouse, 2004.

[23]. R. Benchrifa, D. Zejli, A. Bennouna; "Piles à combustible, mode efficace et propre de production d'électricité", International Congress on the Renewable Energies and the Environment, Sousse, Tunisia, March 2005.

[24]. I.SADLI; « modélisation par impédance d'une pile a combustible PEM pour utilisation en électronique de puissance »; thèse de doctorat, l'institut national polytechnique de lorraine; 2006

[25]. A.LACHICHI, « Modélisation et stabilité d'un régulateur hybride de courant application aux convertisseurs pour pile à combustible », thèse de doctorat université de franche-comté, 2005.