



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République algérienne démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

LE MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR

ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

جامعة عمار تليجي الأغواط

AMAR TELIDJI UNIVERSITE DE LAGHOUAT

كلية التكنولوجيا

FACULTÉ DE TECHNOLOGIE

DÉPARTEMENT D'ÉLECTROTECHNIQUE



Mémoire de master

Domaine: Science et technologie

FILIERE: Automatique

Option: Automatique et Systèmes

Par:

Barkat Hadjer

Khalifa fatma ezahra

THEME

Commande par mode glissant du système d'alimentation en air d'une pile à combustible

Soutenu publiquement devant un jury composé de:

Mr. Benmiloud Mohamed

Mr. Bendjedia Bachir

Mr. Bougrine Mohamed Djameledine

Mr. Baroud Zakaria

Président

Examineur

Superviseur

Co-superviseur

Année académique 2019/2020

Remerciement

Nous tenons à remercier tout d'abord le Dieu tout puissant qui nous a aidés à la réalisation de ce travail.

Nous tenons à remercier Monsieur Bougrine Mohamed Djameleddine qui a dirigé et suivi ce travail, merci pour votre aide, votre intelligence et votre patience et soutien ; soyez assuré de nos respects et nos reconnaissances. Nous voudrions vous exprimer tous nos sincères remerciements pour vos encouragements incessants et vos conseils précieux, merci également, cher enseignant d'avoir suivi notre travail, malgré vos multiples occupations, et cela prouve vos nobles qualités professionnelles et humaines. Meilleures salutations aux membres du jury pour l'honneur qu'ils nous ont fait en participant à l'évaluation de notre travail.

Nous remercions aussi les enseignants du département de génie électrique de l'université de Laghouat et à tous les enseignants qui nous ont enseignés durant notre cursus universitaire.

Dédicace

A mes chers parents, pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien et leurs prières tout au long de mes études,

À mon cher fiancé, Bachir pour son soutien et son assistance morale et matérielle pour achever le mémoire

A mes chères sœurs pour leurs encouragements permanents, et leur soutien moral,

A mes chers frères, pour leur appui et leur encouragement,

A toute ma famille pour leur soutien tout au long de mon parcours universitaire,

Que ce travail soit l'accomplissement de vos vœux tant allégués, et le fruit de votre soutien infailible,

Merci d'être toujours là pour moi

Hadjer Barkat

Dédicace

**Tout d'abord, je rends grâce à Allah pour toutes ses bénédictions
et la grâce de la réussite.**

**A ma chère mère, pour ses sacrifices depuis qu'elle m'a mise au
monde ;**

**A mon cher père, qui m'a toujours soutenu et m'a aidé à affronter
les difficultés ;**

**A mes chères sœurs Messaouda, Hanan , Bouchra et mes chers
frères Abdallah, Mustapha, Bachir**

A toute ma famille.

Pour tous ceux qui ont fait pour que je puisse les honorer ;

A tous mes amis et mes collègues.

A tous les enseignants du département électrotechnique ;

Je dédie ce modeste travail.

Fatma Ezahra Khalifa

Résumé

Ce mémoire vise à développer une commande par mode glissant afin de contrôler le rapport d'excès d'oxygène et le stabiliser à sa valeur optimale. L'étude a utilisé une pile à combustible de type PEM, à laquelle ont été appliquées deux techniques de commande par mode glissant, l'une est d'ordre 2 basé sur l'algorithme de twisting et l'autre est une commande par mode glissant simple.

Les deux commandes ont montré leur efficacité à commander d'excès d'oxygène d'une manière robuste. La commande par Twisting, bien que ses supériorités théoriquement prouvées, elle ne présente pas d'avantages pratiques par rapport à la commande par mode glissant simple. Nous montrons dans ce mémoire que la commande par mode glissant simple aurait une supériorité pratique dans le contrôle du rapport d'excès d'oxygène dans une PEM.

Mots clé

1- Algorithme du twisting. 2- Commande par mode glissant. 3- Pile à combustible. 4- Rapport d'excès d'oxygène.

الملخص

تهدف هذه الأطروحة إلى تطوير تقنية تحكم باستخدام الوضع المنزلق من أجل التحكم في نسبة الأكسجين الزائد وتنظيمه عند قيمته المثلى. استخدمت الدراسة خلية وقود من نوع PEM ، حيث تم تطبيق تقنيتين للتحكم باستخدام الوضع الانزلاقي ، أحدهما من الدرجة 2 تعتمد على أساس خوارزمية الالتواء والأخرى تعتمد على التحكم باستخدام الانزلاق البسيط ذو درجة أولى

لقد ثبت أن التقنيتين فعالتان في التحكم في الأكسجين الزائد بطريقة متينة. على الرغم من أن التحكم في الالتواء قد أثبت تفوقاً نظرياً و تلقى شعبية واسعة من المجتمع العلمي ، إلا أنه لا يقدم أي مزايا عملية على حسب التحكم البسيط في وضع الانزلاق. نوضح في هذه الأطروحة أن التحكم البسيط في وضع الانزلاق سيكون له تفوق عملي في التحكم في نسبة الأكسجين الزائد في PEM.

الكلمات المفتاحية

1- التحكم في وضع الانزلاق. 2- خلية الوقود. 3- خوارزمية الالتواء. 4- نسبة الأكسجين الزائد

Abstract

This thesis aims to develop a sliding mode control in order to control the excess oxygen ratio and stabilize it at its optimum value. The study used a PEM type fuel cell, to which two sliding mode control techniques were applied, one is of second order based on the twisting algorithm and the other is a simple first order sliding mode.

Both controls have been shown to be effective in controlling excess oxygen in a robust manner. The Twisting control, although its theoretically proven superiorities, does not present any practical advantages over the simple sliding mode control. We show in this thesis that simple sliding mode control would have practical superiority in controlling the excess oxygen ratio in a PEM.

Keywords

1- Fuel cell. 2- Oxygen excess ratio 3- Sliding mode control.. 4- Twisting algorithm.

SOMMAIRE

Remerciement.....	i
Dédicace	ii
Dédicace	iii
Résumé.....	iv
Sommaire.....	vi
Liste de figure.....	viii
Liste de tableaux.....	x
Introduction générale.....	12

Chapitre I. Généralités sur les piles à combustible

I.1. Introduction.....	16
I.2. Historique.....	16
I.3. Généralités sur les piles à combustible.....	17
I.3.1.Principe de fonctionnement.....	17
I.3.2.Différent type des piles à combustible	19
I.3.3.Les différences types de PàC.....	24
I.4. Structure générale.....	26
I.4.1.La structure fondamentale d'une PàC de type PEM.....	26
I.5. Caractéristique électrique.....	28
I.5.1.Tension électrique de la PEMFC.....	29
I.6. Système à PàC.....	30
I.6.1.Système d'alimentation en air.....	31
I.6.2.Système d'alimentation en hydrogène.....	31
I.6.3.Système de refroidissement.....	32
I.6.4.Système d'humidification.....	32
I.6.5.Convertisseur.....	33
I.6.6.Système de contrôle commande.....	33
I.7. Configuration électrique du FC hybride.....	33
I.8. Applications de PàC.....	36
I.8.1.Applications stationnaires.....	36
I.8.2.Applications mobiles.....	36
I.8.3.Applications portables.....	36
I.9. Conclusion.....	37

Chapitre II. Modèle de système de pile à combustible PEM

II.1. Introduction.....	39
II.2. La tension du système pile à combustible.....	39
II.2.1. pertes d'activation.....	41
II.2.2. pertes ohmiques.....	42
II.2.3. pertes de concentration.....	42
II.3. Dynamique interne de la pile.....	42
II.3.1. Etat dynamique.....	45
II.3.2. Relation statiques non linéaires.....	46
II.3.3. Entrée et sortie dans la pile à combustible.....	50
II.3.4. Différents Type des compresseurs.....	51
II.3.5. Etude du compresseur d'air.....	52
II.4. Modélisation de compresseur.....	52
II.5. Simulation.....	53
II.6. Conclusion.....	57

Chapitre III. Commande par mode glissant.

III.1. Introduction.....	59
III.2. Introduction à la commande par mode glissant.....	59
III.3. Commande par mode glissant d'ordre supérieur.....	59
III.3.1. Synthèse de la commande.....	60
III.4. L'algorithme du Twisting.....	61
III.5. Application du twisting	61
III.5.1. Estimation par filtre passe haute	63
III.5.2. contrôle de twisting	65
III.6. Résultats et simulation.....	67
III.7. Conclusion.....	70
Conclusion général.....	72
Référence.....	74

Liste de figure

Figure I-1 Expérience de sir WILLIAM GROVE en 1839.....	16
Figure I-2 Principe de fonctionnement de la pile à combustible.....	18
Figure I-3 Schéma de fonctionnement d'une PEMFC (Pile CEAd80kWeGenepac composée de deux modules de 40 kW).....	21
Figure I-4 Schéma de principe de fonctionnement de la pile DMFC.....	21
Figure I-5 Schéma de fonctionnement de la PAFC (PAC PureCell model 400).....	22
Figure I-6 Schéma de fonctionnement d'une pile AFC (Module de PAC du « SpaceShuttle » de la NASA).....	22
Figure I-7 Schéma de fonctionnement d'une MCFC (Pile MTU à l'OPAC de la Porte Briançon (Paris)).....	23
Figure I-8 Schéma de fonctionnement d'une SOFC (Module plan testé par le Centre de Jülich).....	24
Figure I-9 la classification des différentes piles à combustible selon leur puissance électrique, leur rendement et leurs applications.....	25
Figure I-10 Structure générale d'une cellule d'une pile à combustible.....	26
Figure I-11 Structure d'un empilement des cellules PEM.....	27
Figure I-12 Caractéristiques courant - tension d'une pile à combustible.....	29
Figure I-13 Placement des cellules élémentaires.....	29
Figure I-14 Courbe de polarisation 80oC pour une pression de la cathode 1 bar.....	30
Figure I-15 Système à pile à combustible.....	31
Figure I-16 Configurations électriques pour le système d'alimentation hybride à pile à combustible.....	35
Figure II.1 Courbe de polarisation typique des piles à combustible.....	40
Figure II.2. Les différentes pertes et la tension totale correspondent à une cellule : (a) pertes d'activation, (b) pertes ohmiques, (c) pertes de concentration et (d) tension totale.....	41
Figure II.3. Polarisation de pile.....	44
Figure II.4. Système d'alimentation en réactif à pile à combustible.....	45
Figure II.5. Turbomachine.....	51
Figure II.6. Compresseur volumétriques.....	51
Figure II.7. Cartographie du débit de compresseur en fonction de la pression à la sortie du compresseur et la vitesse angulaire du compresseur.....	53

Figure II 8 Validation par simulation de modèles d'alimentation en réactifs de pile à combustible.....	55
Figure III.1.Allure du régime glissant : MG classique (gauche) et MGOS (droite).....	60
Fig. III.2 : Ensemble de glissement d'ordre 2.....	60
Fig. III.3 : Algorithme du Twisting : plan de phase ($s, \dot{s}$).....	61
Fig. III.4 estimation par filtre passe haute d'excès d'oxygène λ_{O_2}	64
Fig.III.5 bloc simulink.....	67
Fig.III.6 Résultats de performance d'ordre 2	68
Fig.III.6 Résultats de performance d'ordre 1	69

Liste des tableaux

Tableau I.1 : principe de fonctionnement d'une pile.....	19
Tableau I.2 : Caractéristiques des différents types de piles à combustible.....	25
Tableau II 1 paramètre de modèle statique de PàC.....	42
Tableau II 2 Paramètres du système de pile à combustible.....	56

INTRODUCTION

La consommation de l'énergie au niveau mondial est liée étroitement à la population. L'accroissement de la population mondiale ainsi que l'activité industrielle des pays en voie de développement ont entraîné une explosion des besoins en énergie. L'exploitation excessive des ressources fossiles pour satisfaire ces besoins est le responsable majeur des rejets des gaz polluants; dont la pollution est à l'origine du réchauffement de la planète et des bouleversements climatiques. Outre les problèmes liés à l'environnement, les réserves d'énergies fossiles sont limitées et ne pourront satisfaire à moyen terme la demande mondiale.

Ces raisons ont fortement relancé, depuis quelques années l'intérêt pour les piles à combustible qui est une technologie à faibles émissions de gaz nocifs et à faible nuisance sonores. Pourtant, elles ne sont pas une technologie nouvelle, puisque leur principe de fonctionnement a été découvert par le scientifique allemand Christian Friedrich Schönbein en 1838 [1].

Par définition, les piles à combustible sont des dispositifs électrochimiques qui convertissent en électricité l'énergie issue d'une réaction chimique entre l'hydrogène et l'oxygène. Les piles à combustible sont présentées comme l'énergie de demain, en parallèle avec l'hydrogène.

L'hydrogène est une source énergétique idéale pour remplacer à long terme les énergies fossiles, d'autant qu'il est l'élément le plus abondant de notre univers.

C'est dans le domaine des applications de puissance que les avancées les plus marquantes se font ressentir. L'efficacité énergétique de la PàC est bien meilleure que celle des moteurs thermiques. De plus, la PàC peut produire de l'électricité en continu et cela la rend plus efficace qu'une batterie. Les ressources primaires du système sont peu coûteuses, disponibles et ne produisent pas d'émissions polluantes et de déchets. La réaction chimique dans la PàC produit de l'eau, de la chaleur, de l'azote.

Dans ce mémoire, nous nous sommes intéressés plus particulièrement à l'axe qui traite les problématiques de la commande du système à PàC, afin d'améliorer sa performance et son rendement. Un système à PàC est constitué d'un cœur de pile et d'auxiliaires (compresseur, humidificateur, réservoir d'hydrogène, refroidisseur, etc.). Plus précisément, nous ciblons le système d'alimentation en air, celui-ci est composé d'un

compresseur motorisé (moto-compresseur). Le compresseur est l'auxiliaire qui consomme le plus de puissance. Celle-ci peut atteindre 20% de la puissance fournie par la PàC.

Pour ces raisons, le contrôle du compresseur est impératif pour optimiser l'énergie et ainsi augmenter le rendement. Evidemment, comme dans chaque système mécanique, il existe des contraintes physiques, qui peuvent surgir et ainsi endommager le système. Cela nous a conduits à développer un système de contrôle pour protéger la PàC et ses auxiliaires afin de prolonger sa durée de vie.

Dans la commande des systèmes non linéaires ou ayant des paramètres non constants, les lois de commande classique peuvent être insuffisantes car elles sont non robustes surtout lorsque les exigences sur la précision et autres caractéristiques dynamiques des systèmes sont strictes. On doit faire appel à des lois de commande insensibles aux variations des paramètres, aux perturbations et aux non linéarités.

La commande par mode de glissement fait partie de la famille des contrôleurs à structure variable, c.à.d. des commandes commutant entre plusieurs lois de commande différentes. L'importance des contrôleurs par mode glissant réside dans : la grande précision, la réponse dynamique rapide, la stabilité, la simplicité de la conception et l'implantation, et la robustesse vis-à-vis des variations des paramètres internes ou externes.

Donc comment appliquer la commande par mode glissant pour traiter les problématiques de la commande dans le système d'alimentation en air du système à PàC ?

Pour répondre à ce problème, nous avons divisé le mémoire en 3 chapitres comme suit : Chapitre 1 présente l'état de l'art des piles à combustible : son histoire, son principe de fonctionnement, sa construction, ses types, ses applications.

Chapitre 2 sera consacré à la modélisation dynamique de la pile à combustible et la modélisation de compresseur. Ensuite, on présente la simulation du modèle de la PàC avec une commande en boucle ouverte à l'aide du logiciel MATLAB/Simulink.

Chapitre 3 le but de ce chapitre est de l'application de la commande par mode glissant d'ordre supérieur. Ces lois de commande sont dédiées aux systèmes non-linéaires incertains. Ce chapitre est divisé en deux parties. La première partie, présente l'algorithme par mode glissant d'ordre 2 (Twisting) .on a appliqué dans deuxième partie l'algorithme de d'ordre 1 et d'ordre 2 sur le système de PàC dont l'objectif est de contrôler l'excès

d'oxygène et d'approximation à sa valeur optimale. La validation de ces lois de commande est effectuée sur MATLAB simulink.

Chapitre I

Etat de l'Art d'un Système à Pile à Combustible

I.1. Introduction

La pile à combustible est un générateur qui permet à travers une équation électrochimique (Combustion:oxydo-réduction) de produire de l'énergie électrique avec un rendement élevé et une faible émission de 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.

Dans ce chapitre, nous écrivons un bref historique sur l'évolution des piles à combustible. On présente ensuite leur principe de fonctionnement, leurs types, leur structure générale et leur système, ainsi que leurs différents domaines d'application.

I.2. Historique de la pile à combustible

L'histoire des piles à combustible a commencé en 1839, lorsque William Robert Grove réalisa l'expérience de l'électrolyse inverse de l'eau, qui a donné naissance à la batterie à gaz (**Figure I.1**), qui est devenue plus tard une pile à combustible.

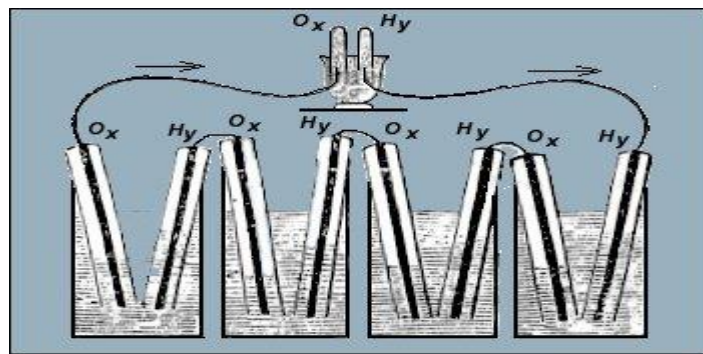


Fig. I.1 : Expérience de sir WILLIAM GROVE en 1839.

Durant l'année 1889, des améliorations sont portées sur le système existant, par L. MOND et C. LANGER en lui introduisant un catalyseur en platine, dans ce cas-là, l'électrolyte pouvait être contenu dans des matrices poreuses en plâtres ou en amiante [1].

Après 1945, trois groupes de chercheurs (Etats Unis, 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. Les premières applications des piles à combustible sont les programmes spatiaux (NASA: les années 60, APOLLO: 1968)[2].

En premier temps, les piles à combustible sont réservées exclusivement aux applications spatiales, mais avec le temps leurs domaines d'utilisation commencent à s'étendre grâce aux progrès liés à leurs techniques de fabrication [3]. et malgré la réussite de la technologie des PàC pendant les années 80, la recherche sur les PàC a été abandonnée dans les applications de transport du fait de leur prix élevé, leur faible durée de vie, leur volume et leur poids, trop important pour ce type d'application. Cependant, les piles à combustible ont continué à évoluer notamment dans les domaines des électrodes et des catalyseurs. Cette évolution a permis de réduire le prix de fabrication et d'augmenter le rendement et la fiabilité.

D'autres producteurs de véhicules à pile à combustible se font remarquer: Renault présente le prototype FEVER en 1996 et PSA le modèle Hydrogène en 2001. General Motors propose également en 2001, via Opel, un prototype Hydrogène. Toyota lance en 2002 les modèles FCHV-3,4 et 5 et Honda sort la FCX-V3. Ford et Ballard construisent une Ford Focus à pile à combustible en 2000 [4].

I.3. Généralité sur les piles à combustible

I.3.1.Principe de fonctionnement de la PàC

On peut dire que le fonctionnement de toutes les piles à combustible, quelle que soit leur technologie (alcaline, carbonate fondu, polymère, céramique, etc.), repose sur le même principe, à savoir qu'elles sont alimentées en Hydrogène et en Oxygène qui en se combinant dans le cœur de la pile donne lieu à des dégagements de chaleur, d'eau et d'électricité [5].

Il existe divers types de pile à combustible, Toutes ces piles gardent en commun les caractéristiques suivantes :

- Elles sont essentiellement constituées de deux plaques (plaques bipolaires) permettant notamment l'amenée des gaz, la collecte du courant et assurant la tenue mécanique, et de deux électrodes (anode et cathode) séparées par un électrolyte.

Sur l'anode, on déclenche une réaction d'oxydation électrochimique d'un composé hydrogéné (le combustible). Cette réaction produit des électrons et met en jeu un ion.

Sur la cathode, on déclenche une réaction de réduction électrochimique en présence d'oxygène (le comburant) et des électrons venus de l'anode via la charge extérieure, et qui met en jeu le même ion qu'à l'anode. Le comburant est généralement l'oxygène de l'air.

Les réactions électrochimiques nécessitent un catalyseur sur chaque électrode, de plus elles produisent de la chaleur et de l'eau.

Entre ces deux électrodes, un électrolyte permet le transfert de l'ion mis en jeu tout en étant un isolant électrique vis-à-vis des électrons générés à l'anode. Cet électrolyte peut être solide ou liquide [6].

On rencontre deux équations de principe selon que l'électrolyte soit acide ou alcalin.

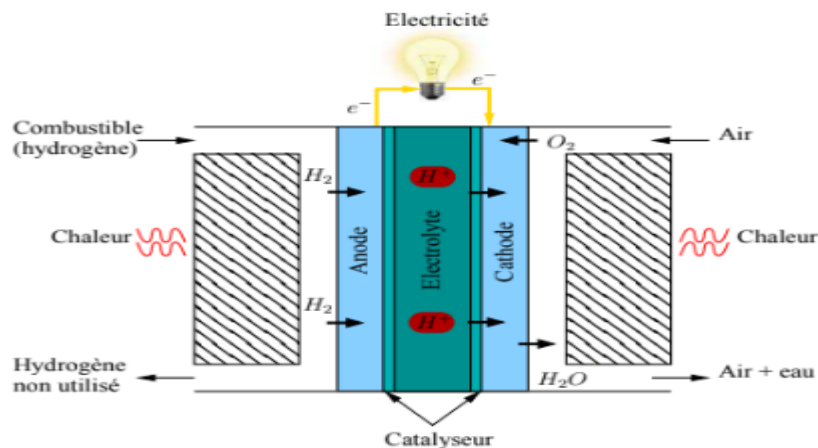


Fig. I.2 : Principe de fonctionnement de la pile à combustible.

1) Pour un électrolyte acide, on a :

Au niveau de l'anode, la molécule d'hydrogène, au contact d'un catalyseur, se décompose et libère des électrons qui vont créer le courant électrique. C'est l'oxydation.



Il y a libération de deux électrons qui vont circuler dans l'électrode vers la charge Extérieure. Les ions Hydrogène H^+ ou proton vont migrer vers la cathode à travers l'électrolyte.

Les électrons passent ensuite par le circuit extérieure et arrivent à la cathode.

Au niveau de la cathode, l'oxygène, au contact avec les électrons libérés par la précédente réaction réagit. C'est la réduction.



Enfin, les protons hydrogène, lorsqu'ils arrivent à la cathode, se recombinent avec les ions d'oxygène et forment de l'eau.



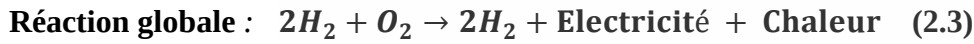
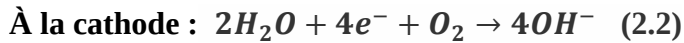
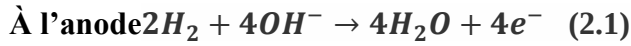
L'eau formé est un liquide dans les conditions normal de température et pression (0°C et 1 atm ou 273K et 1013 pa).

Réaction globale:

Hydrogène + Oxygène → Electricité + Eau + Chaleur



2) Pour un électrolyte alcalin, on a :



Le tableau (Tableau I.1) présente les réactions à l'anode et à la cathode.

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

Tableau I.1 : principe de fonctionnement d'une pile [7].

I.3.2. Différents types des piles à combustible

Depuis le début des programmes de recherche et développement sur les piles à combustible, plusieurs types de classifications ont été utilisées, basées sur des critères tels que le combustible, leur température de fonctionnement (basse ou haute), la nature d'électrolyte utilisé (liquide ou solide), la géométrie des systèmes, etc. A présent, la communauté scientifique a adopté une classification par type d'électrolyte. Le choix de l'électrolyte et du combustible utilisés détermine la nature des réactions aux électrodes, le type d'ions qui traversent l'électrolyte et conditionne de plus la température de fonctionnement de la pile [8].

Nous pouvons distinguer six types de pile [9] :

- 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).
- Les piles au méthanol direct (**DMFC** Direct Methanol Fuel Cell).
- Les piles à membranes polymère échangeuse de protons (**PEMFC** Proton Exchange Membranes Fuel Cell).

I.3.2.1. Les piles à combustible à Basse Température

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

1. Pile à membrane à électrolyte polymère (PEMFC)

C'est la technologie la plus prisée surtout après l'avènement des membranes Nafionau 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 [10].

En comparaison avec d'autres types des piles à combustibles, la pile de PEM a plusieurs caractéristiques attractives comme :

- Densité de puissance plus élevée.
- Fort rendement de transformation d'énergie chimique en énergie électrique.
- Basses températures, rapide et facile à démarrer.
- Polymère solide ce qui réduit les soucis liés à la construction, au transport et à la fiabilité.
- Plus compacte et légère : une meilleure densité de puissance volumique.
- Modulaire donc facile à installer [11].

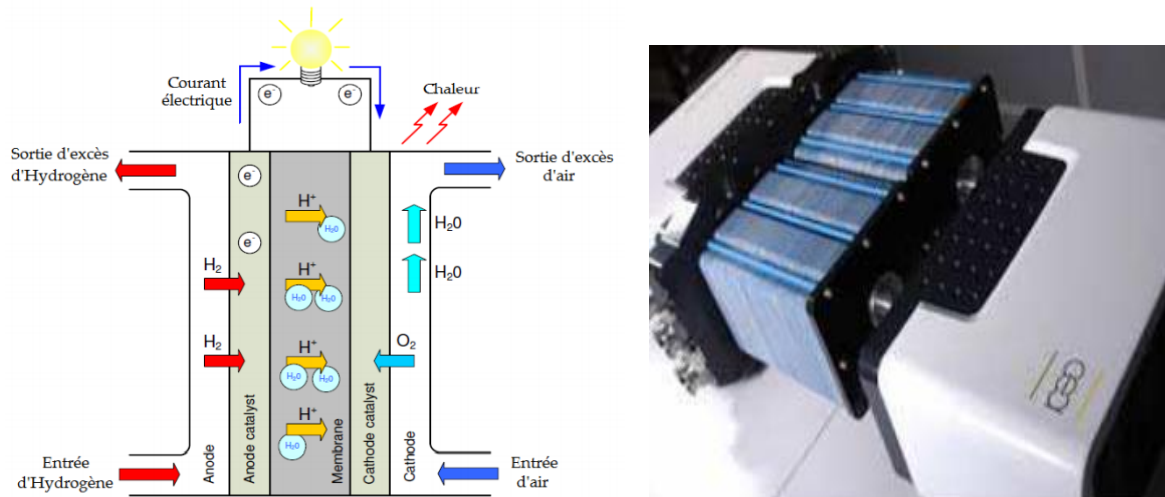


Fig. I. 3 : Schéma de fonctionnement d'une PEMFC (Pile CEA de 80 kW Genepac composée de deux modules de 40 kW).

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 [10].

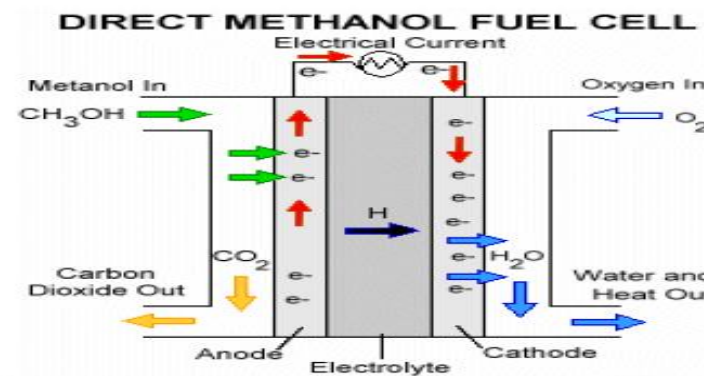


Fig. I.4 : Schéma principe de fonctionnement de la pile DMFC.

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. 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.

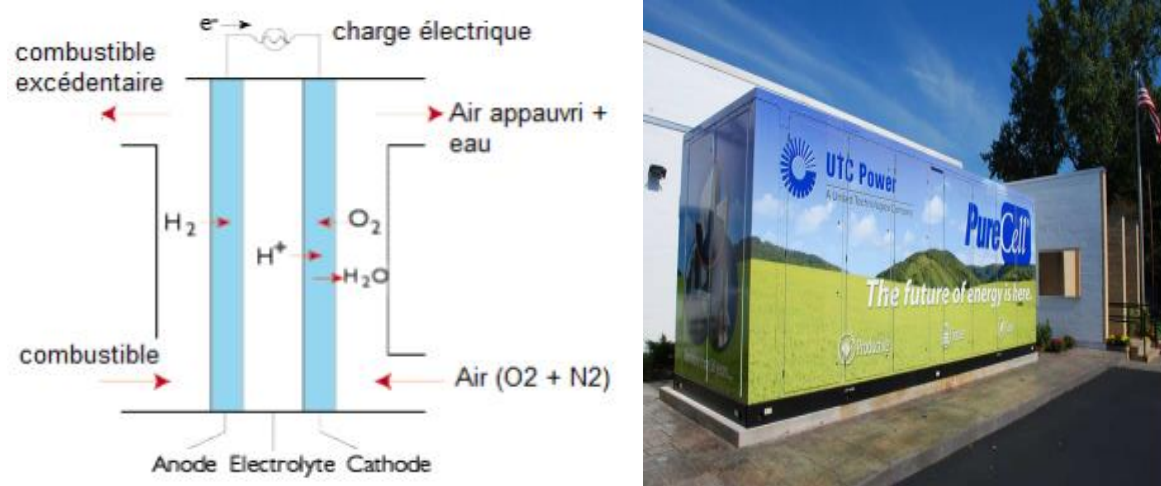


Fig. 1.5 : Schéma de fonctionnement de la PAFC (PACPureCell model 400).

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) [10].

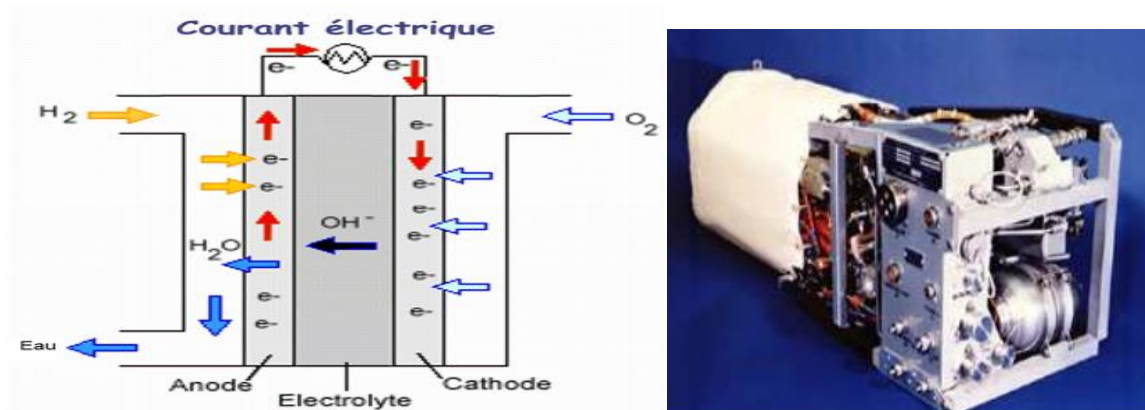


Fig. I.6 : Schéma de fonctionnement d'une pile AFC (Module de PAC du « SpaceShuttle » de la NASA).

I.3.2.2. Piles à combustible à haute température

On distingue deux types qui sont : MCFC et SOFC

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 [10].

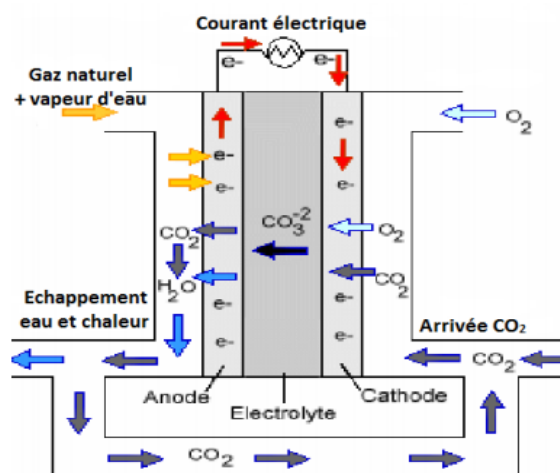


Fig. I.7 : Schéma de fonctionnement d'une MCFC (Pile MTU à l'OPAC de la Porte Briançon (Paris)).

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 Zircone (ZrO_2) dopé avec de l'yttrium (Y^{3+}), lequel joue le rôle de conducteur pour l'anion oxygène (O^{2-}). Contrairement aux autres technologies, la pile à oxyde solide peut être de forme tubulaires ou planaires [12] [13].

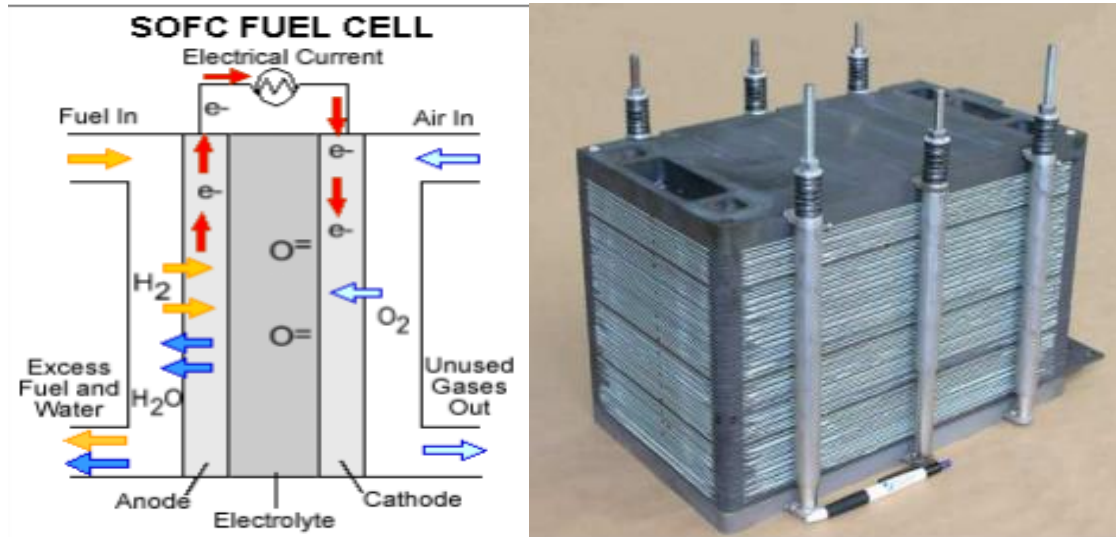


Fig. I.8 : Schéma de fonctionnement d'une SOFC (Module plan testé par le Centre de Jülich).

I.3.3. les différences entre les types de pile à combustible

Le tableau suivant donne les caractéristiques principales des différents types des piles citées précédemment.

		PEMFC	DMFC	PAFC	AFC	SOFC	MCFC
		Basse Température				Haute Température	
Température		70 à 100°	70 à 90°	150 à 220°	50 à 250°	700 à 1050°	600 à 800°
Electrolyte		Membrane en polymère solide	Membrane en polymère solide	Acide Phosphorique (PO ₄ H ₃) liquide	Potasse (KOH) liquide	Céramique solide	Mélange de Li ₂ CO ₃ et K ₂ CO ₃
Combustibles possibles		H ₂	CH ₃ OH	H ₂ (pur ou reformé)	H ₂ (pur)	H ₂ (pur ou reformé)	H ₂ (pur ou reformé)
Oxydant		Air/O ₂	Air/O ₂	Air/O ₂	O ₂ (pur)	Air/O ₂	Air/O ₂
Réaction à l'anode		H ₂ → 2H ⁺ + 2e ⁻	CH ₃ OH + H ₂ O → 6H ⁺ + 6e ⁻ + CO ₂	H ₂ → 2H ⁺ + 2e ⁻	H ₂ + 2(OH ⁻) → 2H ₂ O + 2e ⁻	H ₂ + O ₂ → H ₂ O + 2e ⁻	H ₂ + CO ₃ ²⁻ → H ₂ O + CO ₂ + 2e ⁻
Réaction à la cathode		½O ₂ + 2H ⁺ + 2e ⁻ → H ₂ O	3/2O ₂ + 6e ⁻ + 6H ⁺ → 2H ₂ O	½O ₂ + 2H ⁺ + 2e ⁻ → H ₂ O	½O ₂ + H ₂ O + 2e ⁻ → 2OH ⁻	½O ₂ + 2e ⁻ → O ₂ ²⁻	½O ₂ + CO ₃ ²⁻ + 2e ⁻ → CO ₃ ²⁻
Ion mobile		H ⁺	H ⁺	H ⁺	OH ⁻	O ₂ ²⁻	CO ₃ ²⁻
Catalyseur	anode	platine	Mélange de ruthénium et platine	platine	Nickel ou Platine-palladium	nickel-zircone (Cermet)	Nickel et l'oxyde de nickel
	cathode	Platine	Platine	Platine	Charbon actif	(LaSr)MnO ₃	l'oxyde de nickel + ions Li

Tableau I.2 : Caractéristiques des différents types de piles à combustible [14].

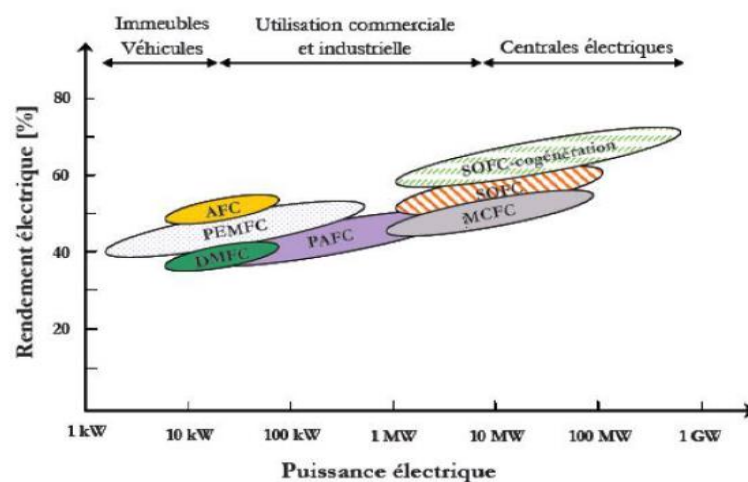


Fig. I.9 : La classification des différentes piles à combustible selon leur puissance électrique, leur rendement et leurs applications [10].

I.4. Structure générale

Une pile à combustible est constituée d'un empilement de cellules. Chaque cellule est constituée de :

- Deux plaques bipolaires.
- Deux électrodes (anode et cathode).
- Electrolyte.

Alimentée par :

- Combustible : on utilise le méthanol ou H_2 (pur ou reformé) ;
- Oxydant : soit l'oxygène pur ou l'air.

La figure suivante montre la structure générale d'une cellule d'une pile à combustible

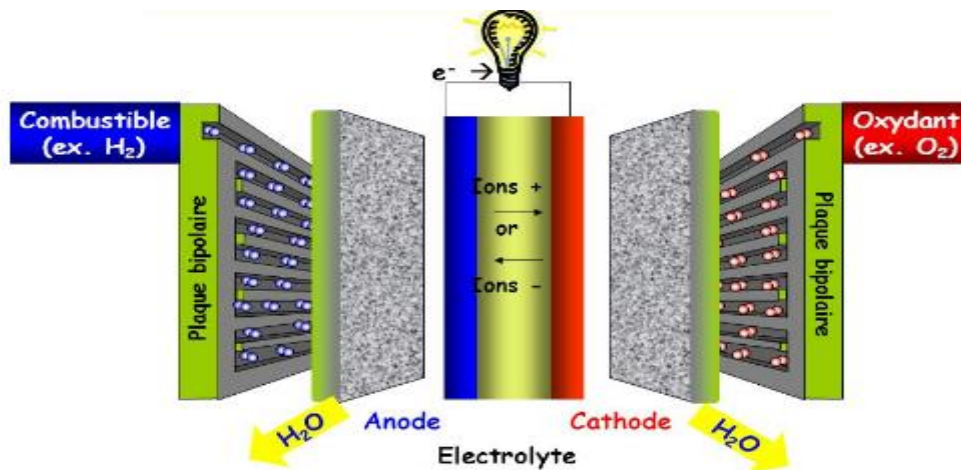


Fig. I.10 : Structure générale d'une cellule d'une pile à combustible.

I.4.1. La structure fondamentale d'une pile à combustible de type PEM

Peut être décrite comme deux électrodes (anode et cathode) séparées par une membrane solide agissant comme un polymère électrolyte. Le carburant (l'hydrogène) circule à travers un réseau de canaux à l'anode, où il se dissocie en protons qui, à son tour, migre à travers la membrane vers la cathode. Les électrons sont collectés en tant que courant électrique par un circuit externe qui relie les deux électrodes. L'oxydant (Oxygène provenant de l'air) circule à travers un réseau similaire de canaux vers la cathode où l'oxygène se combine avec les électrons venant du circuit électrique externe et les protons traversant la membrane d'électrolyte, produisant ainsi de l'eau et de la chaleur [15].

La figure suivante représente la structure d'un empilement de deux cellules :

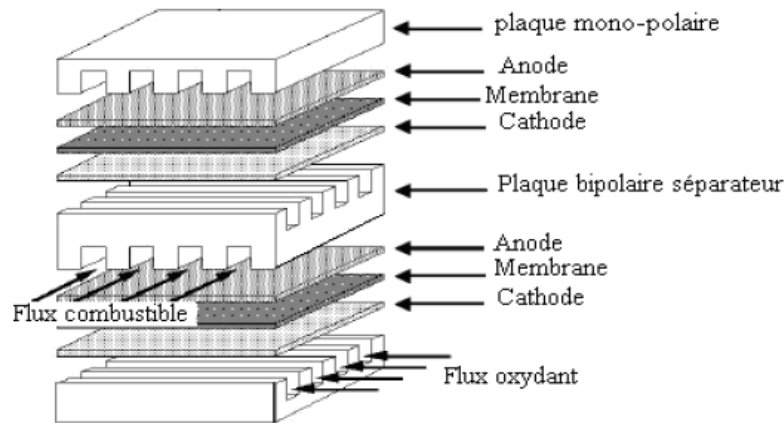


Fig. I.11 : Structure d'un empilement des cellules PEM.

1. Membrane polymère échangeuse de protons

Le rôle de la membrane est de transporter les protons résultants de la demi-réaction d'oxydation de l'hydrogène du l'anode vers la cathode (à travers lui-même). Leur localisation entre les électrodes conditionne qu'elle doit être isolante électroniquement, supporter les efforts mécaniques qu'elle peut subir lors du serrage et imperméable pour l'hydrogène et l'oxygène, aussi elle doit supporter la température et être inerte chimiquement. Les matériaux des électrolytes actuels sont [16]:

- Le Nafion® et le Gore de Dupont™.
- Le DOW® de DOW Chemical™.
- L'Aciplex® d'Asahi Chemical Industry Company.

2. Les électrodes : Les électrodes sont généralement des électrodes poreuses à base d'un matériau carboné permettant la diffusion des gaz et 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.

Certains auteurs décomposent l'électrode en deux zones : la zone de diffusion et la zone active. Dans la zone de diffusion le gaz ne subit aucune réaction ou transformation et il suffit qu'il la dépasse pour arriver à la zone active, où se trouve le catalyseur, donc cette zone est le siège des deux demi-réactions d'oxydoréduction. Le catalyseur utilisé est du

platine car seul ce métal noble possède l'activité électro catalytique suffisante vis-à-vis de la réduction d'oxygène et de l'oxydation de l'hydrogène et peut, de plus résister durablement à la corrosion dans cet environnement chimique très acide. Parmi ses inconvénients, leur prix élevé et son contamination par le monoxyde de carbone.

3. Les plaques bipolaires

Les plaques bipolaires sont en contact avec la surface des électrodes et permettent sur toute la surface de l'électrode :

- La collecte des électrons.
- La distribution et la séparation des gaz à l'anode et à la cathode.
- L'évacuation des produits formés.

Les matériaux des plaques bipolaires doivent donc posséder :

- Un niveau de conductivité électrique suffisant.
- Une imperméabilité aux gaz.
- Une bonne inertie chimique vis-à-vis des fluides présents dans le cœur de la pile (eau, acide, oxygène, etc.).

Les plaques les plus courantes sont réalisées en graphite et les canaux de distribution des gaz sont obtenus par usinage. Le procédé d'usinage a participé essentiellement à l'élévation du coût de ces plaques. Pour cela, les constructeurs ont trouvés autres matériaux de substitution comme les plaques bipolaires métalliques et les plaques en matériaux composites [14].

I.5. 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.12)**. 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).

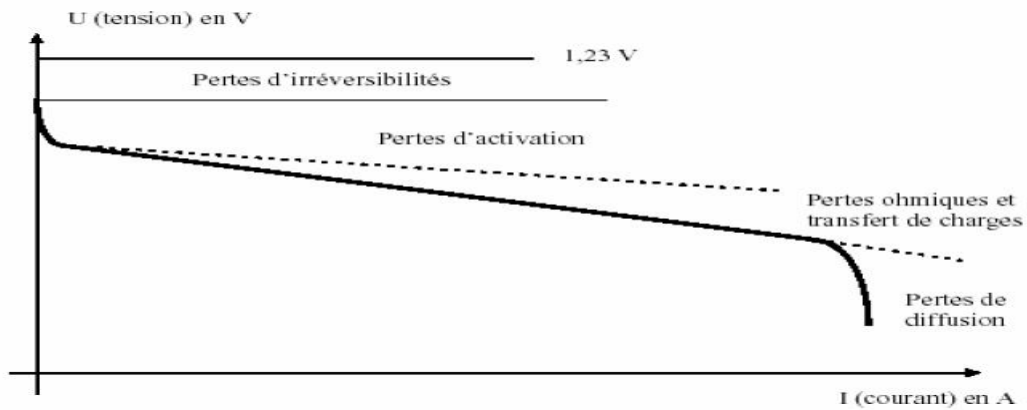


Fig. I.12 : Caractéristiques courant - tension d'une pile à combustible.

I.5.1 Tension électrique de la PEMFC

La tension de la PàC dépend fortement de la charge demandée et aussi de son état de fonctionnement prenant en compte la température, la pression, etc. Les caractéristiques de la PàC sont représentées sous la forme d'une courbe de polarisation. Cette relation est donnée par la tension de la pile en fonction de la densité du courant **Fig. I.14**

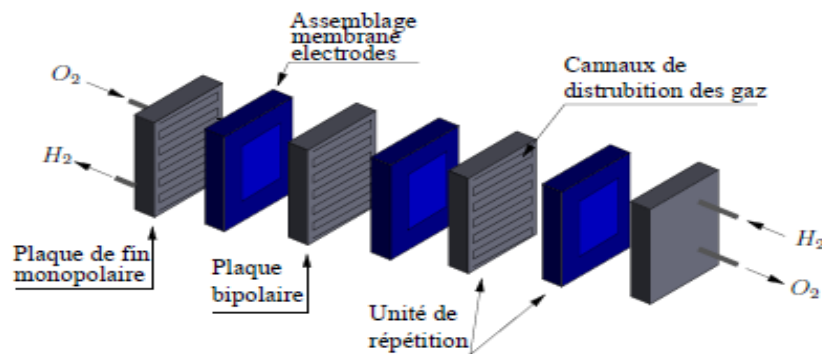


Fig. I.13: Placement des cellules élémentaires [17].

Cette dernière est tracée pour un état de fonctionnement précis, une température de 80°C et une pression de la cathode de 1 bar. La **Fig. I.14** montre que pour une densité de courant élevée les pertes augmentent alors que la tension diminue. Ces pertes sont dues à la résistance interne de la PàC, au transport des gaz non réactifs, et à la diminution de la vitesse de réaction. L'efficacité de la PàC est proportionnelle à la tension pour cela il est préférable que le fonctionnement soit à une faible charge afin d'augmenter son efficacité. La tension de la pile est définie en fonction de : la densité de courant, la pression d'eau. Dans la cathode, la pression partielle de l'oxygène et de l'hydrogène, la température de la pile et l'humidité [18].

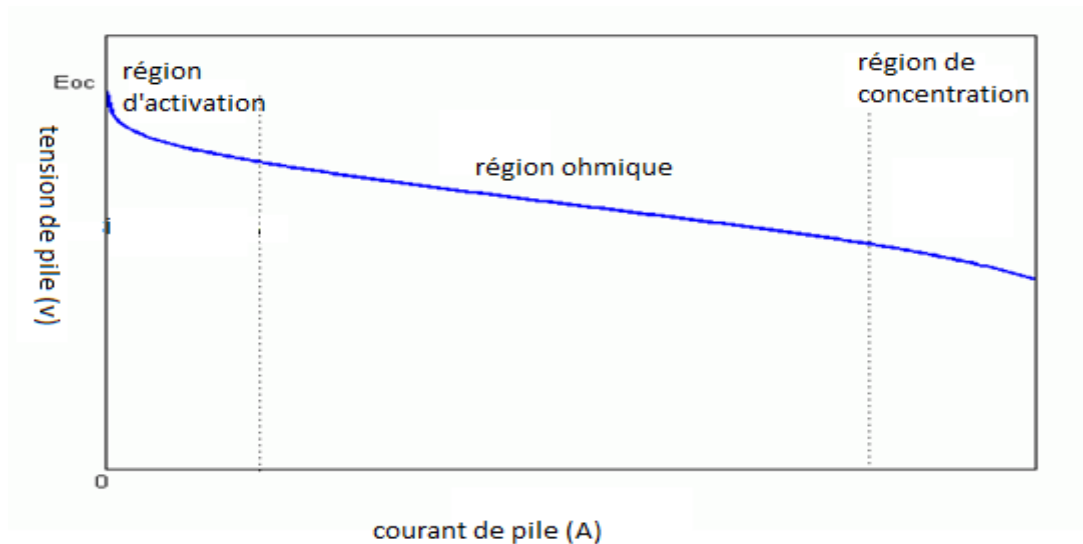


Fig. I.14 Courbe de polarisation[19].

Elle est donnée par :

$$V_{fc} = E - V_{act} - V_{ohm} - V_{conc}$$

Où E est la tension potentiel thermodynamique réversible ou la tension de Nernst. Cette tension peut être augmentée en installant des cellules en série. La tension globale de la PàC devient égale à la somme des tensions de chaque cellule, qui est donnée par :
 $V_{st} = nV_{fc}$ où n est le nombre de cellules.

Les trois types de pertes apparaissent dans l'équation (I.5) sont :

- 1) **les pertes d'activation** V_{act} qui sont dues à la réaction chimique et aux mouvements des électrons entre les électrodes. Au départ de la réaction chimique, la PàC a besoin d'énergie pour activer cette réaction, mais cela cause une chute de tension.
- 2) **les pertes ohmiques** V_{ohm} sont dues à la résistance de la membrane polymère lors du transfert des protons et à la résistance des électrodes et des connecteurs lors du transfert des électrons.
- 3) **les pertes de concentration** V_{conc} se produisent à la chute de la concentration des réactifs consommés dans la réaction. Cela provoque une diminution rapide de la tension pour une densité de courant élevée.

I.6. Système à pile à combustible

Le cœur de la PàC ne peut pas fonctionner seul. Il a besoin d'un certain nombre des systèmes auxiliaires qui garantissent la meilleur condition de fonctionnement [19]. Ces auxiliaires sont calibrés pour améliorer les performances et les conditions de fonctionnement de la pile. Les auxiliaires principaux sont : le système d'alimentation en air

de la partie cathode, le système d'alimentation en hydrogène de la partie anode, le convertisseur DC/DC à la sortie de la puissance, le refroidisseur, l'humidificateur et le système de contrôle. Le système à PàC est présenté sur la **Fig.I.15**

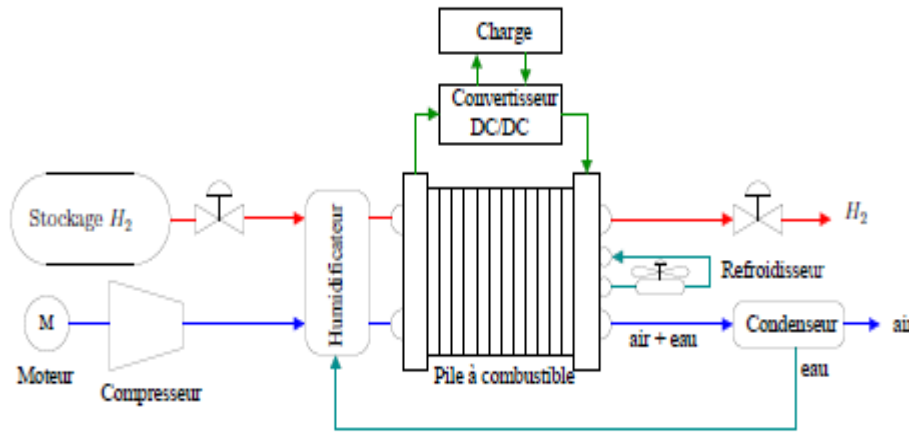


Fig. I.15 Système à pile à combustible.

I.6.1. Système d'alimentation en air

Rappelons que la PàC a besoin d'oxygène pour la partie cathode. L'injection de l'oxygène dépend du domaine d'utilisation et de la puissance de la PàC. Par exemple, pour une utilisation sous-marine, l'oxygène est stocké dans des réservoirs à haute pression. Les PàC de faible puissance sont alimentées directement par l'air atmosphérique, sachant que l'oxygène représente 21% de l'air. Par contre, pour les PàC à haute puissance utilisées dans les applications de transport, un système moto-compresseur est utile pour injecter l'air à haut débit. Pour assurer un bon fonctionnement d'une PàC, il faut atteindre un niveau de pression et de débit d'air suffisant. Ce fonctionnement à haute pression augmente le rendement et la puissance de la pile. Plusieurs types de compresseurs sont utilisables, on peut citer : le compresseur centrifuge, le compresseur à double vis, le compresseur à lobes, etc. [20].

I.6.2. Système d'alimentation en hydrogène

La partie anode de la PàC est alimentée en hydrogène pur. Ce dernier n'existe pas à l'état natif dans la nature car il est toujours associé à d'autres éléments. Dans les applications actuelles, deux types de sources en hydrogène sont utilisés, soit l'hydrogène pur stocké dans un réservoir à haute pression (300 à 700 bar) [19], soit un système de reformeur d'hydrogène intégré dans les véhicules à PàC [21]. Pour le premier cas, l'hydrogène est normalement produit à grande échelle de 4 manières différentes :

- 1) **La technologie thermochimique** : cette technique est la plus utilisée pour la production d'hydrogène. Cette procédure est appelée reformeur et consiste à produire de l'hydrogène à partir de gaz naturels comme : le méthanol, l'éthanol, etc [22]. Cette technologie n'est pas polluante et plusieurs types de véhicule l'utilisent déjà. L'avantage de cette méthode est d'utiliser les stations essences classiques.
- 2) **La technologie photo-biologique** : cette méthode est basée sur la photosynthèse des bactéries et des algues vertes pour produire de l'hydrogène [23]. L'inconvénient, de cette méthode, est que la production de l'hydrogène est relativement faible par rapport aux autres méthodes.
- 3) **La technologie photochimique** : cette méthode consiste à produire de l'hydrogène par le biais de panneaux solaires. La lumière du soleil décompose l'eau en hydrogène et en oxygène grâce à un semi-conducteur immergé dans l'eau. Ce procédé est en cours d'étude et de développement [24].
- 4) **La technologie par électrolyseur** : cette technique correspond à un système inverse de la PàC, qui dissocie l'eau en hydrogène et en oxygène grâce à l'énergie électrique. Dans ce cas, la production d'hydrogène consomme de l'électricité. Ce qui impose d'utiliser une source d'énergie renouvelable comme l'éolien, les panneaux solaires, etc.

I.6.3. Système de refroidissement

La réaction chimique entre l'oxygène et l'hydrogène produit également de la chaleur. De plus, l'air comprimé à la sortie du compresseur a aussi, une température élevée. Ces deux raisons contribuent à l'augmentation de la température à l'intérieur de la PàC. Afin d'avoir une réaction chimique rentable, la température nominale du système doit être comprises entre 65°C et 80°C [25]. Pour cela un système de refroidissement est recommandé pour gérer la température à l'intérieur de la pile. Ce refroidissement est effectué soit par un ventilateur soit par un circuit fluide [26].

I.6.4. Système d'humidification

L'hydrogène et l'air doivent être humidifiés pour hydrater la membrane. Par contre, il ne faut ni sécher ni noyer cette membrane, car autrement cela réduit la tension électrique générée et donc la durée de vie de la PàC. Un seuil minimal d'humidité est indispensable pour garantir la réaction chimique et le passage des électrons à travers la membrane [27].

L'augmentation brusque de la charge, le changement de température, et les variations des pressions des gaz peuvent modifier l'état de l'humidificateur.

I.6.5. Convertisseur

La tension délivrée par la PàC doit être adaptée au regard de la charge à fournir. Il faut donc faire appel à un convertisseur pour ajuster l'énergie fournie. Celui-ci permet d'établir l'interface entre la PàC et le bus d'électricité. Ce convertisseur est indispensable dans les véhicules à pile à combustible (ou hybrides). La pile à combustible n'est pas capable de répondre aux variations brusques de la charge. Pour cela des moyens de stockage rapide, comme le super-condensateur ou la batterie, doivent être reliés sur le bus continu pour faire face au régime transitoire [28] [29].

I.6.6. Système de contrôle commande

Comme présenté dans les paragraphes précédents, nous pouvons constater que les auxiliaires de la PàC sont très dépendants les uns des autres et que cela rend le système PàC difficile à contrôler. Il est ainsi indispensable de développer un système de commande pour garantir un bon niveau de performance. Ce système est composé des éléments suivants:

- 1) Le système de commande du compresseur d'air dont l'objectif est de fournir un débit précis en fonction de la charge.
- 2) Le système de commande de l'électrovanne du réservoir d'hydrogène, de manière à gérer la pression à l'entrée de l'anode.
- 3) Le système de commande de la pompe gérant le système de refroidissement à eau de la PàC, ou le système de commande d'un ventilateur en cas de refroidissement à air.
- 4) Le système de commande de la pompe alimentant le circuit d'humidification.
- 5) Le système de commande du convertisseur pour la gestion d'énergie [17].

I.7. Configuration électrique du FC hybride

La gestion de la répartition de la puissance entre la pile à combustible et la batterie dans un système hybride dépend de la connexion du FC avec la batterie. Nous appelons les différentes configurations de connexion entre la pile à combustible et la batterie des architectures électriques. Plusieurs configurations électriques ont été envisagées pour les systèmes hybrides (FC et batterie / ultra condensateur).

La figure I.16 (a) montre une configuration typique d'un véhicule à pile à combustible hybride à partage de charge ou de mise à niveau qui augmente la puissance FC à l'aide de la batterie haute tension. Le convertisseur DC / DC augmente la tension de la batterie FC à la tension de la batterie, tirant le courant de la batterie. Le courant de la batterie complète le courant FC pour répondre à la demande de puissance.

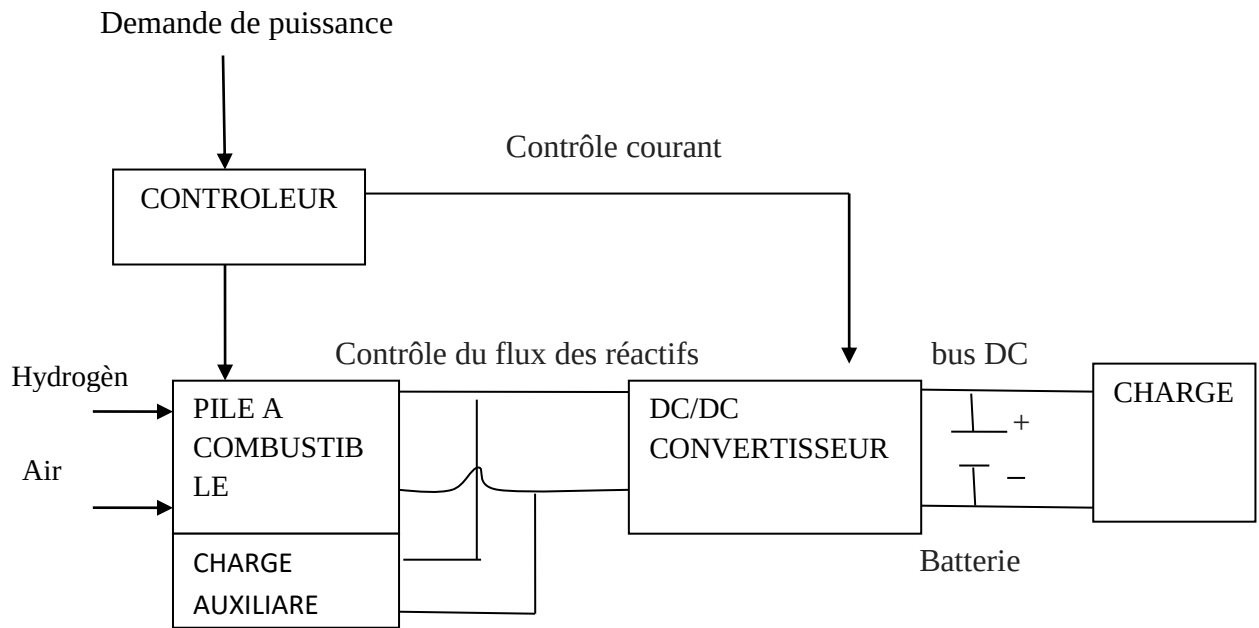
Dans les applications de propulsion automobile, le freinage régénératif est utilisé pour charger la batterie. Le problème de la commande du convertisseur DC / DC devient simplifié lorsqu'une batterie haute tension est connectée en parallèle entre le convertisseur DC / DC et la charge. La batterie prend en charge la tension principale du bus électrique et le rapport cyclique DC / DC. Le convertisseur surveille le courant tiré de la pile à combustible.

Le système de pile à combustible à hydrogène direct PEM peut être utilisé comme source d'alimentation de suivi de charge pour une variété d'applications. La surveillance de la charge FC sans batterie tampon haute puissance est déjà appliquée au véhicule de propulsion. Le but de l'architecture électrique du système d'alimentation hybride à pile à combustible **La figure I.16 (b)** vise à éviter les grosses batteries et à soutenir la charge électrique principalement avec la pile à combustible.

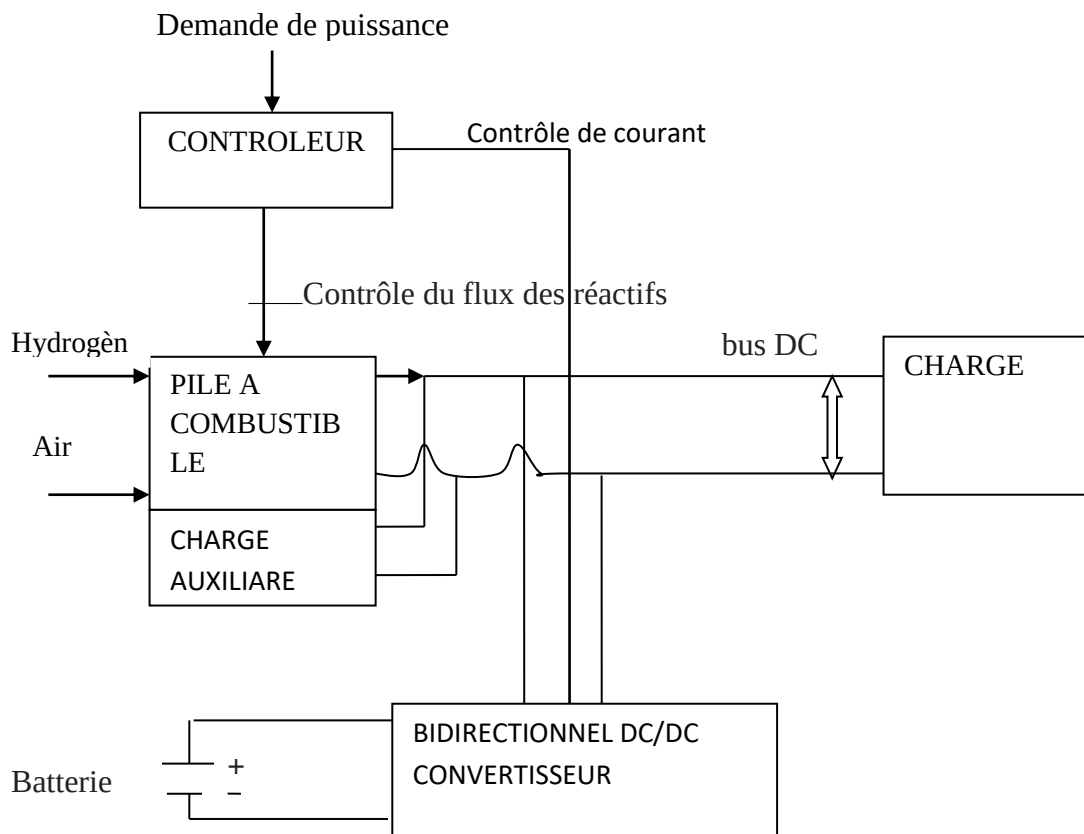
Dans la configuration **(b)**, la puissance principale circule directement du FC vers la charge sans convertisseur DC / DC.

Une petite quantité de courant de batterie traverse le convertisseur bidirectionnel DC / DC pendant la charge / décharge. Cette configuration peut être plus efficace que la configuration de **la figure I.16 (a)** car elle évite les pertes et le poids du convertisseur DC / DC. Cependant, cela dépend plus que de la configuration

- a) sur la capacité des FC à suivre les demandes d'accusation. Dans toute configuration FC électrique hybride, la dynamique couplée des courants et des tensions dans les piles à combustible et le convertisseur DC / DC affectera la dynamique globale et dictera finalement l'étalonnage final de la commande quel que soit l'état stationnaire efficacité [30].



(a) Convertisseur FC+DC/DC avec batterie haute tension



(b) FC directement connecté à la charge avec convertisseur bidirectionnel + batterie

Fig. I.16 Configurations électriques pour le système d'alimentation hybride à pile à combustible [30].

I.8. Applications des piles à combustible

Les piles à combustible peuvent être utilisées dans quasiment toutes les situations où de l'énergie électrique est demandée. On classe généralement les piles en trois catégories : les applications stationnaires, les applications transport et les applications mobiles.

I.8.1. Applications stationnaires

Dans ce domaine, les piles à combustible sont utilisées pour produire l'énergie électrique et la distribuée à travers un réseau. On distingue deux secteurs d'applications : la production collective où la puissance varie de 200kW à quelque MW et la production domestique, où la puissance varie de 2 à 7kW. Un grand nombre d'installations de démonstration avec une puissance entre 1 kW pour des maisons individuelles et quelques centaines de kW pour des résidences a été installé dans différents pays [31]. Les piles les plus utilisés sont qui ont une température de fonctionnement élevée (SOFC, MCFC), où l'utilisation de la chaleur dégagée pour le chauffage et la production de la vapeur d'eau permet d'accéder le maximum rendement énergétique.

I.8.2. Applications mobiles

Le transport est le domaine d'application à l'origine du développement de la pile à combustible vers le début des années 90 [3]. On distingue deux sous-familles assez différentes suivant qu'il s'agit d'équiper un véhicule léger ou un véhicule lourd. Ce domaine conditionne que la pile à utiliser soit prête à l'utilisation dans un temps le plus court possible, a une durée de vie importante et a une densité de puissance volumique et massique acceptable. Sa convient avec les piles qui ont une température de fonctionnement basse, et particulièrement les piles de type PEMFC.

I.8.3. Applications portables

Dans les applications portables, sa concerne le téléphone mobile et l'ordinateur portable. L'utilisateur recharge son portable comme on recharge un briquet ou un stylo à encre, en quelques secondes et chaque recharge donne 3 à 5 fois plus d'autonomie qu'une batterie actuelle, pour le même encombrement. Les piles les plus utilisées dans ce domaine sont de type DMFC [32].

I.9. Conclusion

Malgré leur maturité, et leurs champs d'application variés (transport, production et portable), les piles à combustible n'ont pas encore atteint le niveau de commercialisation recherché, c'est à cause du coût élevé de leur fabrication, par exemple, la construction d'une pile à combustible de type PEM met en œuvre des matériaux onéreux comme le platine, le graphite et la membrane ionique.

La classification des différents types des piles présentées dans ce chapitre est faite selon la température de fonctionnement, où on a distingué deux familles. L'une regroupe les piles à basse température et l'autre les piles à haute température. Dans la première famille, on a trouvé que la pile PEM est la plus utilisée et qu'elle peut recouvrir tous les domaines d'application. Dans la seconde famille, l'utilisation des piles SOFC dans la production d'énergie électrique est déjà appliquée dans plusieurs pays comme les USA et le Japon. Dans ce mémoire, notre intérêt sera penché aux piles à combustible de type PEM. Ces piles à combustible ont pour avantage de fonctionner à une température relativement faible par rapport aux autres. De plus ce type de pile a un volume moins important que les autres, Ce qui facilite leur utilisation dans les applications de transport.

Chapitre II

Modèle de Système de Pile à Combustible PEM

II.1.Introduction

Le but de toute modélisation de pile à combustible est de construire un modèle, c'est-à-dire une représentation mathématique ou comportementale de son fonctionnement. L'objectif poursuivi est la compréhension des phénomènes physiques mis en jeu, ou la conception d'un système automatique pour leur commande. Il existe différentes classifications de modèles en fonction de leur mode de conception ou de leur mode d'utilisation.

Dans un modèle dynamique pour la tension et le courant des piles à combustible, l'approvisionnement en réactifs a un rôle important dans les performances des piles à combustible car les caractéristiques des piles à combustible PEM sont dominées par la cinétique de l'hydrogène et de l'oxygène. Pour se concentrer sur la dynamique de l'air (oxygène) du système de pile à combustible, nous supposons que le système de pile à combustible est alimenté par de l'hydrogène sous haute pureté et que le contrôle de l'alimentation en hydrogène est parfait pour que la pression de l'anode poursuive celle de la cathode.

Dans la première partie, nous développons d'abord un modèle phénoménologique de la pile à combustible PEM, en nous concentrant principalement sur la dynamique de l'alimentation en air et la modélisation du compresseur.

Nous présenterons ensuite la simulation de modèle de pile à combustible avec une commande en boucle ouverte à l'aide du logiciel MATLAB/Simulink.

II.2. La tension du système pile à combustible

La pile à combustible convertit directement l'énergie chimique en énergie électrique. L'énergie chimique libérée par la pile à combustible peut être calculée à partir du changement d'énergie libre de Gibbs (LJ.gf) qui est la différence entre l'énergie libre de Gibbs du produit et l'énergie libre de Gibbs des réactifs. L'énergie libre de Gibbs est utilisée pour représenter l'énergie disponible pour effectuer un travail externe. Pour la pile à combustible hydrogène / oxygène, la réaction chimique de base est



Et le changement de l'énergie libre de Gibbs LJ.gf est

$$\Delta_{gf} = gf \text{ de produits} - gf \text{ de réactifs} = (gf)_{H_2O} - (gf)_{H_2} - (gf)_{O_2} \quad (II.2)$$

En utilisant les valeurs thermodynamiques du changement d'entropie à l'état standard, l'équation (II.2), est encore développée et donne [19]

$$E = 1.229 - 0.85 * 10^{-3}(T_{fc} - 298.15) + 4.3085 * 10^{-5}T_{fc} \left[\ln(p_{H_2}) + \frac{1}{2} \ln(p_{O_2}) \right] \quad (II.3)$$

Dans l'équation (II.3) T_{fc} est exprimée en Kelvin, et p_{H_2} et p_{O_2} sont exprimés en *atm*. Lorsque la pile à combustible fonctionne, la tension réelle de la pile est inférieure à la valeur calculée par l'équation (II.3), comme le montre un graphique typique des performances de pile à combustible de la figure II.1. Les différences résultent de pertes ou d'irrégularités. Sur la figure II.1, la tension de la pile est la tension réelle de la pile à combustible V_{fc} et la densité de courant i est définie comme le courant de la pile, qui est égal au courant de pile I_{ST} (A), par zone active de pile A_{fc} (cm^2).

$$i = \frac{I_{st}}{A_{fc}} \quad (II.4)$$

Le courant de cellule est égal au courant de pile I_{st} car l'empilement est formé en connectant les piles à combustible en série. Les pertes de pile à combustible sont attribuées à trois catégories: la perte d'activation, la perte ohmique et la perte de concentration. Les graphiques des chutes de tension causées par chacune des pertes sont illustrés à la figure II.2. Chacune de ces pertes est considérée et modélisée séparément dans les sections suivantes

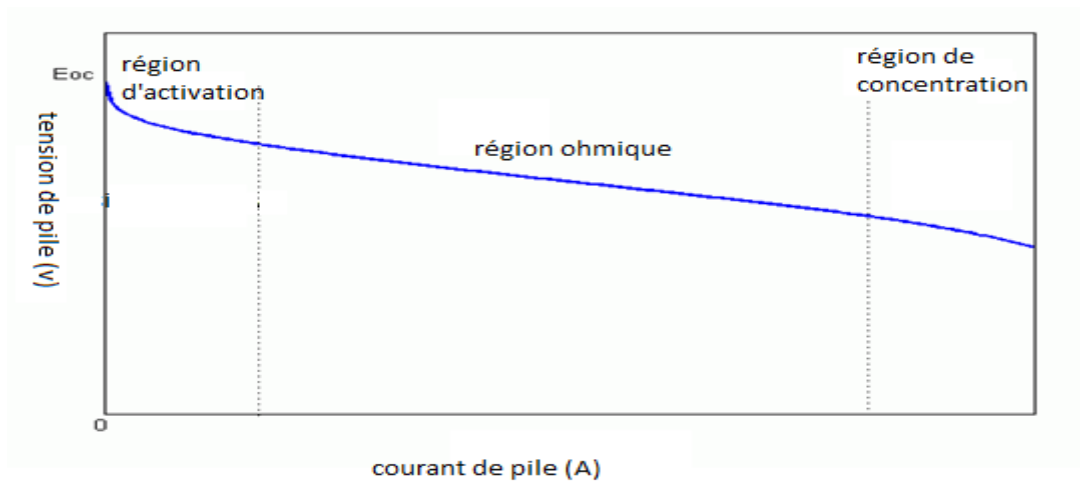


Figure II 1 Courbe de polarisation typique des piles à combustible [1].

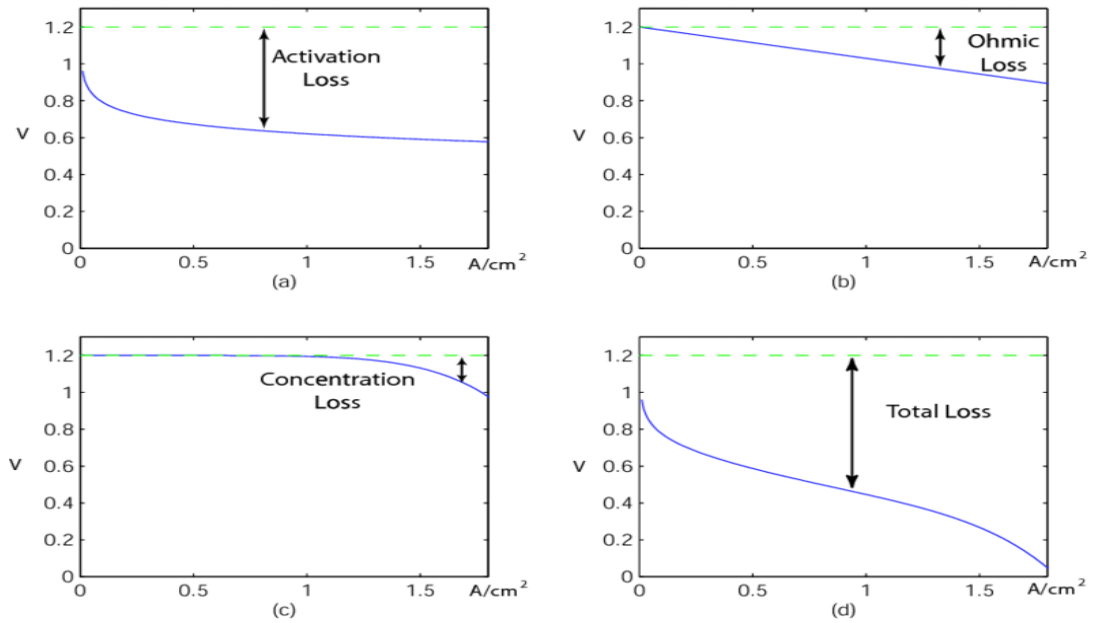


Figure II 2 Les différentes pertes et la tension totale correspondent à une cellule : (a) pertes d'activation, (b) pertes ohmiques, (c) pertes de concentration et (d) tension totale [19].

II.2.1 pertes d'activation

Les pertes d'activation sont dues aux déplacements des électrons, entre l'anode et la cathode. La réaction d'oxydation de l'hydrogène dans l'anode est plus rapide que la réaction de réduction de l'oxygène dans la cathode [33]. Donc les pertes d'activation dues à la réaction dans la cathode sont plus importantes que celle dans l'anode. Ces pertes peuvent être exprimées par l'équation de "Tafel" [34] :

$$v_{act} = a \ln\left(\frac{i}{i_0}\right) \quad (II.5)$$

Où a est constante et i_0 est la densité de courant d'échange

Une autre équation, pour calculer les pertes d'activation, est proposée par [19] car l'équation de "Tafel" est valable uniquement pour $i > i_0$. Ceci peut produire des problèmes lors de la simulation de la PàC. Cette relation est donnée par :

$$v_{act} = v_0 + v_a(1 - e^{-b_1 i}) \quad (II.6)$$

Où i est la densité de courant, v_0 est la chute de tension lorsque la densité de courant est nulle, v_a et b_1 sont des constantes. Cette tension électrique est représentée sur la Fig.II.2 (a).

II.2.2 pertes ohmiques

La membrane est équivalente à une résistance qui empêche le déplacement des protons et la décomposition d'hydrogène, ceci réduit la production des électrons. Ces pertes sont connues comme pertes ohmiques. L'expression de ces pertes est proportionnelle à la densité du courant :

$$v_{ohm} = iR_{ohm} \quad (II.7)$$

Où R_{ohm} est la résistance électrique interne. Cette dernière, est dépendante du degré d'humidité de la PàC, de la température et de l'épaisseur de la membrane [19]. L'expression de la résistance électrique interne est donnée comme suit :

$$R_{ohm} = \frac{t_m}{(b_2\lambda_m - b_3) \exp\left[b_4\left(\frac{1}{303} - \frac{1}{T_{fc}}\right)\right]} \quad (II.8)$$

Où b_2, b_3 et b_4 sont des constantes déterminées par des expérimentations dans [19]. T_m est l'épaisseur de la membrane et λ_m est sa teneur en eau. La tension électrique des pertes ohmiques est présentée sur la Fig.II.2(b).

II.2.3 pertes de concentration

Les pertes de concentration sont dues à la chute de concentration des réactifs. Ces pertes diminuent rapidement pour une densité de courant élevée. L'expression de ces pertes est donnée comme suit [34] :

$$v_{conc} = i \left(b_5 \frac{i}{i_{max}} \right)^{b_6} \quad (II.9)$$

Où b_5, b_6 et i_{max} sont des constantes. Le paramètre i_{max} correspond à la densité de courant.

Ces pertes provoquent une chute de tension électrique instantanée. La tension v_{conc} est présentée sur la Fig II.2(c). [23]

b_1	10	b_4	350
b_2	0.005139	b_5	$c2 [1]$
b_3	0.00326	b_6	2

Tableau II 1 paramètre de modèle statique de PàC

II.3. Dynamique interne de la pile

Nous considérons une pile à combustible avec une surface de cellule active de $A_{fc} = 280 \text{ cm}^2$ et $n = 381$ nombre de cellules avec une puissance de sortie brute de 75 kW qui est applicable pour une utilisation automobile et résidentielle. Les variables de

performance du système d'alimentation FC sont (i) la tension de pile v_{st} qui influence directement la puissance de pile générée, $p_{fc} = v_{st}I_{st}$, lorsque le courant de charge I_{st} est tiré de la pile, et (ii) le rapport d'excès d'oxygène λ_{o_2} dans la cathode qui assure indirectement une alimentation en oxygène adéquate à l'empilement.

La pression de l'anode est supposée bien contrôlée grâce à une électrovanne qui a une dynamique très rapide par rapport à celle du compresseur. Pour cela la pression de l'anode est considérée égale à la pression de la cathode lors du fonctionnement. Ceci permet de ne pas considérer la masse d'hydrogène (m_{H_2}), et de vapeur d'eau dans l'anode ($m_{v,an}$), du modèle.

La tension de pile est calculée comme le produit du nombre de cellules et de la tension de cellule $v_{st} = nv_{fc}$. L'effet combiné de la thermodynamique, de la cinétique et de la résistance ohmique détermine la tension de sortie de la cellule, telle que définie par

$$V_{fc} = E - V_{act} - V_{ohm} - V_{conc} \quad (II.1)$$

Où E est la tension en circuit ouvert, V_{act} est la perte d'activation, V_{ohm} est la perte ohmique et V_{conc} est la perte de concentration. La formulation détaillée de la tension FC, également connue sous le nom de caractéristique de polarisation, peut être trouvée dans [19].

En régime permanent, la tension FC est donnée en fonction statique de la densité de courant $I_{fc} = \frac{I_{st}}{A_{fc}}$ et plusieurs autres variables telles que les pressions partielles d'oxygène et d'hydrogène p_{o_2} , et p_{H_2} , la pression de cathode p_{ca} , la température T_{st} et l'humidité m . Bien que nous supposons une réaction électrochimique instantanée et une capacité de double couche d'électrode négligeable, la tension FC a un comportement dynamique riche en raison de sa dépendance de variables de pile variant dynamiquement ($p_{o_2}, p_{ca}, p_{H_2}, T_{st}, m$). La figure II.3 montre des exemples de polarisation de l'empilement avec différentes conditions de pression de cathode et de température d'empilement.

Nous supposons une alimentation en hydrogène comprimé comme le montre la figure II. 3, ce qui simplifie le contrôle du flux des réactifs anodiques. Nous supposons également que la température et l'humidité de la cheminée sont contrôlées avec précision et avec un décalage négligeable. Le refroidisseur et l'humidificateur sont négligés pour ce travail car leur puissance requise est inférieure à la puissance du compresseur. [30]

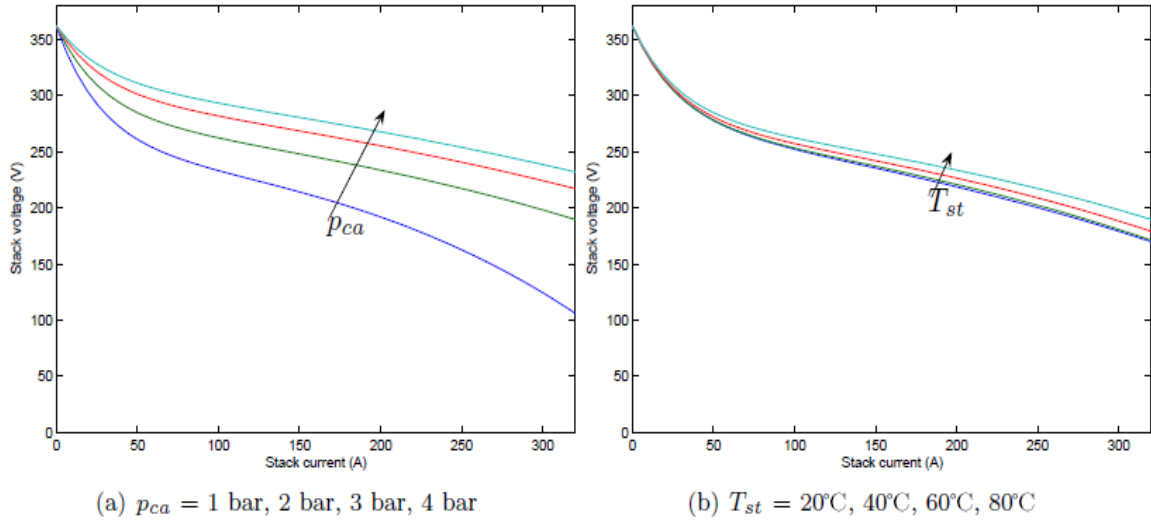


Figure II 3 Polarisation de la pile [30]

Dans cette étude, nous nous concentrons sur le comportement dynamique des variables associées au contrôle du débit d'air, à savoir la pression d'oxygène p_{o_2} , la pression totale de la cathode p_{ca} et le rapport d'excès d'oxygène dans la cathode O_2 , qui est un paramètre regroupé qui indique la quantité de l'oxygène fourni par rapport à l'oxygène consommé. Toutes les variables associées à l'alimentation en air et aux performances de la cheminée sont définies dans les sections suivantes. Les excursions de tension transitoire dans l'empilement sont minimisées avec un contrôle précis des réactifs. Cependant, la dynamique de l'écoulement des réactifs de l'oxygène et de l'hydrogène est régie par la dynamique de la pression à travers les canaux d'écoulement, les collecteurs et les orifices. De plus, les piles à combustible doivent avoir une quantité excessive d'oxygène et d'hydrogène dans la cheminée pour éviter la stagnation de films de vapeur et d'azote couvrant la zone électrochimique.

En fonction de la charge (courant) tirée de la pile à combustible et de l'alimentation en air de la pile à combustible, la tension de la cheminée varie entre 220 V et 350 V. L'air est fourni par un compresseur entraîné par un moteur d'une puissance maximale de 15 kW. À sa vitesse de rotation maximale de 100 kRPM, le compresseur fournit un débit d'air de 95 g / sec et génère une augmentation de pression de 3,5 atm. Le débit d'air maximal du compresseur est le double du débit d'air nécessaire pour reconstituer l'oxygène consommé de la cheminée lorsque le courant maximal est tiré $I_{st,max} = 320 \text{ A}$. Le courant FC maximal est défini comme le courant auquel la puissance FC maximale est atteinte. Le fait de tirer plus de courant de la pile à combustible entraîne une diminution rapide de la tension de la cheminée, et donc de la puissance due aux pertes de concentration [30].

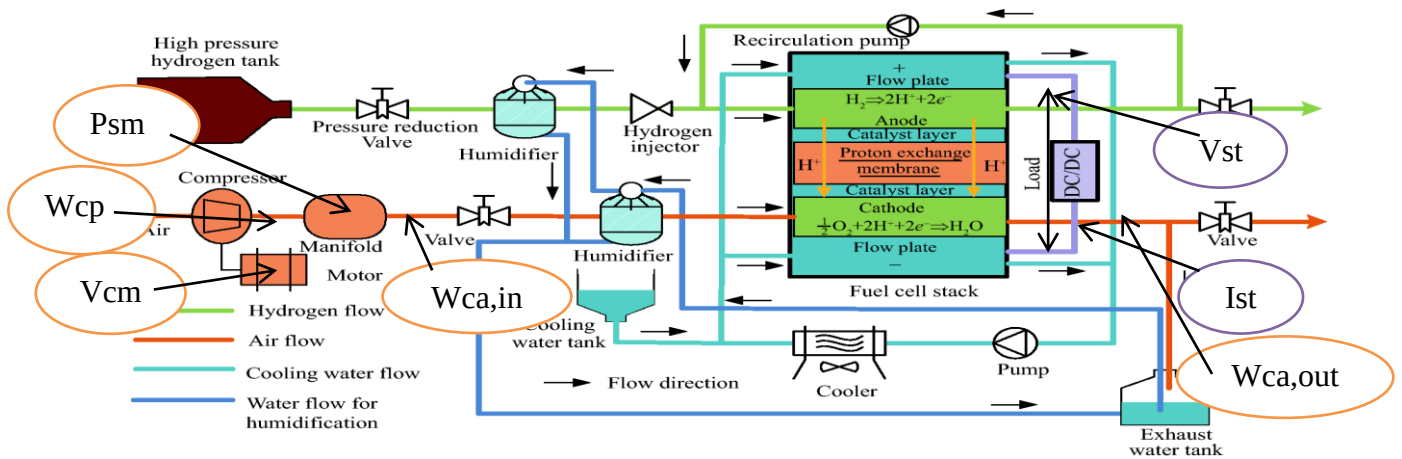


Figure II 4 Système d'alimentation en réactif à pile à combustible.

II.3.1. Etats dynamiques

Les détails du modèle utilisé dans cette étude peuvent être trouvés dans [32, 34]. Plusieurs simplifications et modifications ont été employées pour nous permettre de nous concentrer sur la dynamique rapide associée à l'intégration d'une pile à combustible avec un convertisseur DC / DC, en se concentrant principalement sur la dynamique de l'air. Plus précisément, les hypothèses suivantes sont formulées:

- (i) Tous les gaz obéissent à la loi des gaz parfaits;
- (ii) la température de l'air à l'intérieur de la cathode est égale à la température de la pile en vrac qui, à son tour, est égale à la température du liquide de refroidissement sortant de la pile;
- (iii) Les propriétés du flux sortant de la cathode telles que la température et la pression sont supposées être les mêmes que celles à l'intérieur de la cathode et sont celles qui dominent la réaction au niveau des couches de catalyseur dans la membrane;
- (iv) Les gaz dans l'anode et la cathode sont entièrement humidifiés et l'eau à l'intérieur de la cathode n'est qu'en phase vapeur en supposant que l'eau supplémentaire se transforme en liquide et est éliminée des canaux;
- (v) Nous négligeons l'inondation de la couche de diffusion de gaz;
- (vi) Enfin, le canal d'écoulement et la couche de diffusion de gaz sont regroupés en un seul volume, c'est-à-dire que les variations spatiales sont négligées. Notez ici que toutes ces hypothèses sont faites pour isoler les problèmes potentiels associés à la pile à combustible non hybride qui suit la charge qui prend en charge ses charges externes et auxiliaires via son bus. En supposant une régulation parfaite de

l'humidité et de la température, nous ne voulons pas sous-estimer leur importance ni les défis associés à la tâche de contrôle spécifique. Nous présentons d'abord les états dynamiques du modèle, puis dans la section II.3.2, nous décrivons les relations non linéaires qui connectent les entrées avec les états et les sorties (variables de performance et mesures pour le contrôle).

La continuité de masse de l'oxygène et de l'azote à l'intérieur du volume de la cathode et le rendement de la loi du gaz idéal

$$\frac{dp_{O_2}}{dt} = \frac{RT_{st}}{M_{O_2} V_{ca}} (W_{O_2,in} - W_{O_2,out} - W_{O_2,rcr}) \quad (II. 2)$$

$$\frac{dp_{N_2}}{dt} = \frac{RT_{st}}{M_{N_2} V_{ca}} (W_{N_2,in} - W_{N_2,out}) \quad (II. 3)$$

Où V_{ca} est le volume global de cathode, R est la constante de gaz universelle et M_{O_2} et M_{N_2} sont la masse molaire d'oxygène et d'azote, respectivement.

Le taux de variation de la pression d'air dans le collecteur d'alimentation qui relie le compresseur à la pile à combustible (illustré à la figure II.4) dépend du débit du compresseur dans le collecteur d'alimentation W_{cp} , du débit sortant du collecteur d'alimentation dans la cathode $W_{ca,in}$ et de la température de départ du compresseur T_{cp} .

$$\frac{dp_{sm}}{dt} = \frac{RT_{cp}}{M_{a,atm} V_{sm}} (W_{cp} - W_{ca,in}) \quad (II. 4)$$

Où V_{sm} , est le volume du collecteur d'alimentation et $M_{a,atm}$ est la masse molaire de l'air atmosphérique.

L'état du moteur du compresseur est associé à la dynamique de rotation du moteur par le biais d'équations thermodynamiques. Une inertie de rotation localisée est utilisée pour décrire le compresseur avec la vitesse de rotation du compresseur ω_{cp}

$$\frac{d\omega_{cp}}{dt} = \frac{1}{J_{cp}} (\tau_{cm} - \tau_{cp}) \quad (II. 5)$$

Où τ_{cm} est le moteur du compresseur et τ_{cp} est le couple de charge du compresseur.

II.3.2. Relation statiques non linéaires

Les relations non linéaires qui relient les états dynamiques (pression et vitesse de rotation) par le côté droit des équations (II.2) - (II.5) sont décrites dans cette section. [19]

Le débit massique d'entrée d'oxygène $W_{O_2, in}$ et d'azote $W_{N_2, in}$ peut être calculé à partir du débit de cathode d'entrée $W_{ca,in}$ comme suit

$$W_{O_2 \cdot in} = \frac{x_{O_2 \cdot atm}}{1 + \omega_{atm}} W_{ca \cdot in} \quad (II. 6)$$

$$W_{N_2 \cdot in} = \frac{x_{O_2 \cdot atm}}{1 + W_{atm}} W_{ca \cdot in} \quad (II. 7)$$

Où $x_{O_2 \cdot atm}$ est la fraction massique d'oxygène de l'air d'admission

$$x_{O_2 \cdot atm} = \frac{y_{O_2 \cdot atm} M_{O_2}}{y_{O_2 \cdot atm} M_{O_2} + (1 - y_{O_2 \cdot atm}) M_{N_2}} \quad (II. 8)$$

Avec le rapport molaire oxygène $y_{O_2 \cdot atm} = 0,21$ et le taux d'humidité de l'air d'admission

$$\omega_{atm} = \frac{M_v}{y_{O_2 \cdot atm} M_{O_2} + (1 - y_{O_2 \cdot atm}) M_{N_2}} \frac{\phi_{atm} p_{sat}}{p_{atm} - \phi_{atm} p_{sat}} \quad (II. 9)$$

Où $P_{sat} = P_{sat}(T_{st})$ est la pression de saturation de vapeur et ϕ_{atm} est l'humidité relative aux conditions ambiantes qui est prééglée à la valeur moyenne de 0,5.

$$P_{sat} = 0.61121 \exp\left(\left(18.678 - \frac{T}{234.5}\right)\left(\frac{T}{257.14 + T}\right)\right) 10^3$$

Le modèle du collecteur d'alimentation décrit le débit massique du compresseur au débit massique de sortie. Une condition linéaire débit-pression est supposée pour le calcul du débit en raison de la petite différence de pression entre le collecteur d'alimentation et la cathode.

$$W_{ca \cdot in} = K_{sm.out} (p_{sm} - p_{ca}) \quad (II. 10)$$

Où $k_{ca, in}$ est la constante d'écoulement de l'orifice du collecteur d'alimentation et la pression de cathode spatialement invariante p_{ca} est la somme des pressions partielles d'oxygène, d'azote et de vapeur

$$p_{ca} = p_{O_2} + p_{N_2} + p_{sat} \quad (II. 11)$$

Le taux de consommation d'oxygène $W_{O_2, rct}$ (2) du courant de pile I_{st} est donné par

$$W_{O_2 \cdot rct} = \frac{M_{O_2} n I_{st}}{4F} \quad (II. 12)$$

Où n est le nombre de cellules de la pile et F est le nombre de Faraday.

Le débit massique de sortie d'oxygène $W_{O_2, out}$ et d'azote $W_{N_2, out}$ utilisé dans (II.2) et (II.3) est calculé à partir de la fraction massique d'oxygène et d'azote dans la cheminée après la réaction

$$W_{O_2, out} = \frac{M_{O_2} p_{O_2}}{M_{O_2} p_{O_2} + M_{N_2} p_{N_2} + M_v p_{sat}} W_{ca, out} \quad (II. 13)$$

$$W_{N_2, out} = \frac{M_{N_2} p_{N_2}}{M_{O_2} p_{O_2} + M_{N_2} p_{N_2} + M_v p_{sat}} W_{ca, out} \quad (II. 14)$$

Grâce à ces six hypothèses, le modèle PaC à 9 états est réduit à 4 états. Les états sont respectivement la pression partielle d'oxygène (p_{O_2}), la pression partielle d'azote (p_{N_2}), la vitesse angulaire du compresseur (ω_{cp}) et la pression du collecteur d'admission d'air (p_{sm}). La pression du collecteur de retour n'est pas considérée, le débit à la sortie de la cathode est exprimé en fonction de la pression de la cathode (pression en amont) et de la pression atmosphérique (pression en aval). Le débit à la sortie de la cathode est donné par

$$W_{ca, out} = \begin{cases} \frac{C_D A_T P_{ca}}{\sqrt{RT_{st}}} \left(\frac{P_{atm}}{P_{ca}} \right)^{\frac{1}{\gamma}} \left\{ \frac{2\gamma}{\gamma-1} \left[1 - \left(\frac{P_{atm}}{P_{ca}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right] \right\}^{\frac{1}{2}} & \text{si } \frac{P_{atm}}{P_{ca}} > \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \\ \frac{C_D A_T P_{ca}}{\sqrt{RT_{st}}} \gamma^{\frac{1}{2}} \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma+1}{2(\gamma-1)}} & \text{si } \frac{P_{atm}}{P_{ca}} \leq \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \end{cases} \quad (II. 15)$$

Où γ est le rapport des capacités calorifiques spécifiques de l'air, C_D est le coefficient de décharge de la buse, A_T est la zone d'ouverture de la buse.

Le débit du compresseur W_{cp} est modélisé en appliquant la méthode d'ajustement non linéaire de Jensen et Kristens en [19] en fonction du rapport de pression $\frac{P_{atm}}{P_{ca}}$, de la température amont T_{atm} et de la vitesse de rotation du compresseur ω_{cp} . La température de l'air sortant du compresseur est modélisée sur la base de [23] avec une carte de l'efficacité du compresseur η_{cp} .

$$T_{cp} = T_{atm} + \frac{T_{atm}}{\eta_{cp}} \left[\left(\frac{P_{sm}}{P_{atm}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right] \quad (II. 18)$$

Le couple moteur du compresseur τ_{cm} est calculé en supposant un modèle de moteur à courant continu simplifié avec une relation électromécanique statique de la tension d'entrée du moteur appliquée v_{cm}

$$\tau_{cm} = \eta_{cm} \frac{k_t}{R_{cm}} (v_{cm} - k_v \omega_{cp}) \quad (\text{II. 19})$$

Où k_t , k_v et R_{cm} sont des constantes motrices et η_{cm} est le rendement mécanique du moteur. L'hypothèse d'un moteur à courant continu commandé en tension au lieu d'un moteur à courant alternatif contrôlé en fréquence / amplitude implique la génération instantanée de couple moteur (relation v_{cm} à τ_{cm}), en négligeant toute la dynamique haute fréquence associée à un entraînement de commutation plus réaliste et moderne. Notre hypothèse peut être justifiée car la fréquence de commutation du variateur et la dynamique du flux moteur sont plus rapides que la dynamique de l'inertie combinée moteur-compresseur dans l'équation (II.5). Même la mise en œuvre d'un filtre qui minimise les ondulations de commutation préserve la relation hautement dynamique (presque instantanée) entre la commande de commande du moteur (v_{cm} dans notre cas) et la génération de couple τ_{cm} .

Il faudra convertir la commande de contrôle de tension v_{cm} dérivée en commande de contrôle de courant ou de fréquence / amplitude lorsque la conception spécifique du moteur et du variateur est spécifiée. Le couple consommé par le compresseur est calculé à partir de l'équation thermodynamique

$$\tau_{cp} = \frac{C_p}{\omega_{cp}} \frac{T_{atm}}{\eta_{cp}} \left[\left(\frac{P_{sm}}{P_{atm}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right] W_{cp} \quad (\text{II. 20})$$

Où C_p et η_{cp} correspondent aux capacités calorifiques spécifiques de l'air.

Rapport d'excès d'oxygène

$$\lambda_{O_2} = \frac{W_{O_2,in}}{W_{O_2,rct}} \quad (\text{II. 21})$$

Correspond au rapport entre l'oxygène fourni et l'oxygène réagi dans la cathode. Le rapport d'excès d'oxygène est généralement régulé à $\lambda_{O_2}^{ref} = 2$ pour réduire la formation de films de vapeur et d'azote stagnants dans la zone électrochimique. Des valeurs de λ_{O_2} inférieures à 1

indiquent un manque d'oxygène et ont de graves conséquences sur la durée de vie de la pile.

II.3.3. Entrée et sortie dans la pile à combustible

Le modèle non linéaire basé sur les équations d'état (II.2) - (II.5) implique les quatre états

$$x = [p_{O_2} p_{N_2} \ p_{sm} \ \omega_{cp}]^T$$

Compte tenu des quatre états, nous pouvons formuler des équations d'état avec le signal de l'actionneur de commande v_{cm} et une entrée exogène de la charge électrique à l'extérieur.

Traditionnellement, le courant a été choisi comme entrée dans le modèle de pile à combustible. Ainsi l'équation (II.1) produit la tension de cellule v_{fc} et la tension de pile v_{st} étant donné le courant de pile I_{st} ou la densité de courant i_{fc} . L'entrée du modèle de pile à combustible est en fait la charge électrique contrôlée avec un dispositif externe et le choix de la charge électrique dépend des applications. Par exemple, la tension de la pile peut être une entrée des piles à combustible pour analyser la densité de courant répartie spatialement [30]. L'entrée de résistance peut être plus réaliste pour définir la charge électrique de l'empilement [30]. Dans le modèle causal décrit dans ce chapitre, le courant ou la tension de la pile peut être choisi comme entrée du système. Lorsque le courant de pile est utilisé comme entrée, la tension de pile présente un comportement dynamique par rapport à la densité de courant et aux conditions de pression. Si la tension de pile est utilisée comme entrée du système, le comportement dynamique du courant de pile représente les performances du système de pile à combustible. Le courant ou la tension d'entrée est mis en œuvre comme une condition aux limites, qui est représentée dans le modèle dynamique pour la cellule de batterie [34]. Lorsque l'entrée est le courant provenant de la pile à combustible, le calcul du courant de pile est directement à partir de l'équation (II.1) étant donné les conditions de pression. Si la tension de pile est choisie comme entrée, le courant de pile est calculé en résolvant l'équation (II.1) implicitement comme dans [35].

II.3.4. Différents Type des compresseurs

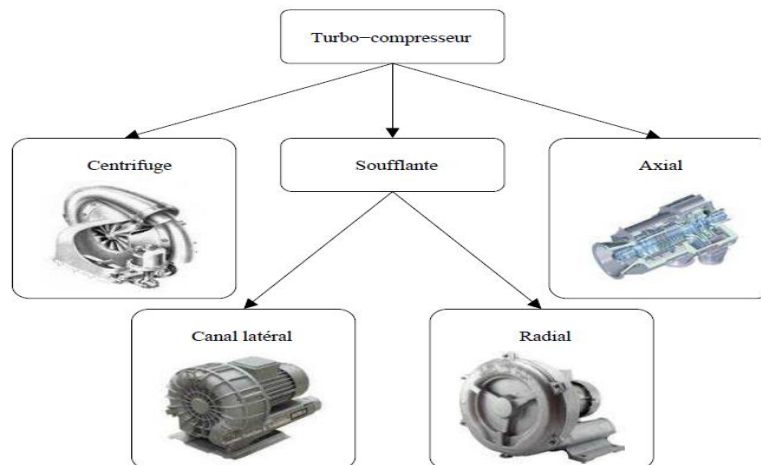


Figure II 5Turbomachine

Différents types de compresseurs peuvent être utilisés pour l'alimentation en air de la pile. Les compresseurs peuvent être présentés en deux grandes familles : les compresseurs de type turbomachines (Fig.II.5) et les compresseurs de type volumétriques (Fig.II.6) [19, 36, 37]. Les débits d'air émis par les turbomachines sont modélisés par une fonction non-linéaire du rapport de la pression (aval/amont) du compresseur et de la vitesse angulaire du compresseur.

Par contre, les débits d'air émis des compresseurs volumétriques sont modélisés par une fonction linéaire de la vitesse angulaire du compresseur.[17]

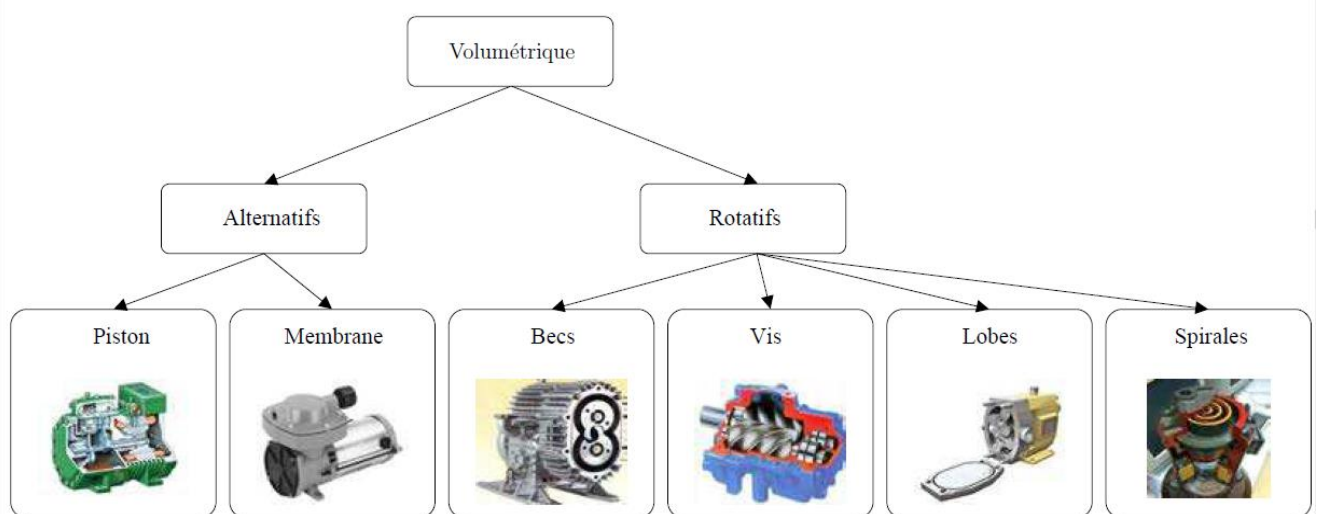


Figure II 6 Compresseur volumétriques.

II.3.5. Etude du compresseur d'air

Le compresseur est utilisé dans le circuit de conditionnement de l'air arrivant dans le compartiment cathodique d'une pile à combustible. Les contraintes sur ce compresseur sont

- Compacité et poids.
- Rendement.
- Qualité du gaz en sortie (exempt d'huile et de particules).
- Coût.

Les compresseurs utilisés dans ce type d'applications sont de type volumétrique car ils permettent de contrôler facilement le débit en sortie. Ces types de compresseurs sont classés en deux familles (Les compresseurs alternatifs, Les compresseurs rotatifs)

Les compresseurs alternatifs ne sont pas utilisés, car leur couple est irrégulier et le débit en sortie est pulsé, de plus, la lubrification est nécessaire et les compresseurs commerciaux ne sont pas de type sec.

Dans les applications à pile à combustible, ce sont les compresseurs rotatifs de type double vis qui sont utilisés, car ils n'ont pas besoin de lubrification. [17]

II.4. Modélisation de compresseur

Dans cette section, nous allons modéliser le système moto-compresseur à double vis, qui appartient à la famille des compresseurs volumétriques. Celui-ci est fabriqué par la société Opcon Autoroto, spécifiquement pour les systèmes à pile à combustible. Ce compresseur contient deux vis hélicoïdales. Une vis est liée directement au moteur. Cela indique que la vitesse angulaire du compresseur (w_{cp}) est égale à la vitesse angulaire du moteur (w_{cm}).

Le débit d'air à la sortie du compresseur est continu sur toute la plage de fonctionnement. Un système de lubrification est recommandé pour lubrifier la chambre de compression. Un mécanisme dédié au circuit de lubrification assure que l'huile ne se mélange pas à l'air comprimé dans la PàC.

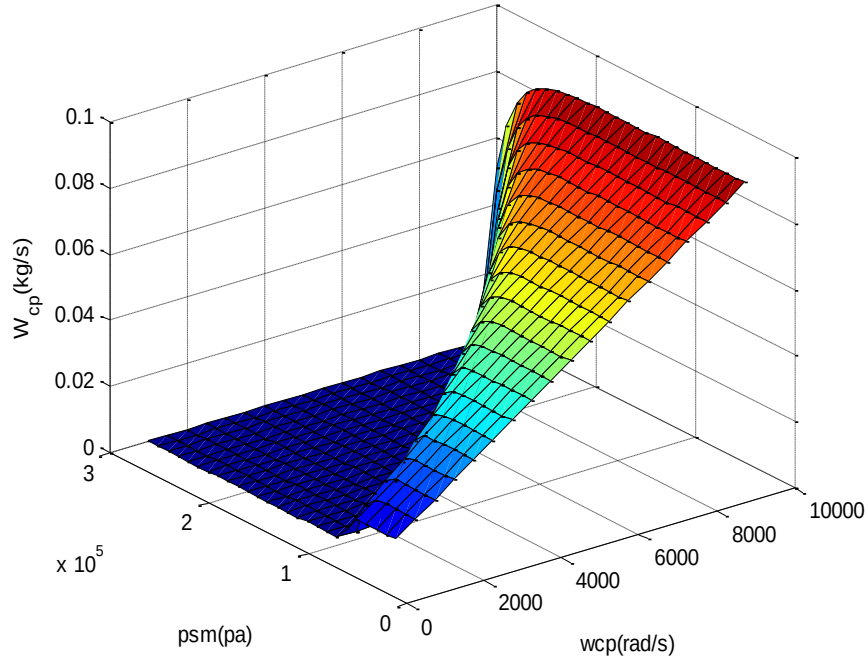


Figure II 7 Cartographie du débit de compresseur en fonction de la pression à la sortie du compresseur et la vitesse angulaire du compresseur

D'après [37], le débit d'un compresseur volumétrique est exprimé en fonction de la vitesse angulaire du compresseur et la pression de supply manifold. Le débit du compresseur est donc donné par :

$$W_{cp} = \frac{y_3^{max} w_{CP}}{y_4^{max}} \left(1 - \exp \left(\frac{-r \left(s + \frac{w_{cp}^2}{q} - p_{sm} \right)}{s + \frac{w_{cp}^2}{q} - y_2^{min}} \right) \right)$$

Où $r = 15$, $q = 462.25$; $y_4^{max} = 11500$; $y_2^{min} = 50000$; $s = 100000$; $y_3^{max} = 0.0975$;

II.5.Simulation

Dans notre travail, nous nous intéresserons à la commande du système d'alimentation en air de la PàC. Le modèle complet proposé par [19] est compliqué et fortement non linéaire, ce qui rend difficile la synthèse d'une commande, notamment la commande du système d'alimentation en air. Pour cela le modèle complet a été simplifié à 4 états par [30]. La figure (II.8) montre les trajectoires du modèle à 4 états simulés avec une commande en boucle ouverte. Cette commande est calculée de façon statique en fonction

du courant de stack, considéré comme perturbation connue. En effet, un courant de stack constant par morceau a été appliqué au système comme illustré dans la figure, la tension du compresseur est calculée en fonction du courant de stack par l'équation empirique $v_{cm} = 0.67 I_{st} + 33$. Le compresseur réagit donc en temps zéro à chaque changement brusque de I_{st} .

Les résultats de simulation montrent une bonne concordance entre les réponses du modèle et celles connues de la pile. Ils ont aussi montré clairement que le comportement dynamique de la cellule est principalement affecté par les variations du débit du compresseur, du rapport d'excès d'oxygène et de la température.

La faible influence des pressions des gaz sur les variables de sortie fait que, dans la pratique, elles sont en général maintenues constantes. Les paramètres de la pile utilisée dans simulation sont donnés dans le Tableau II.2.

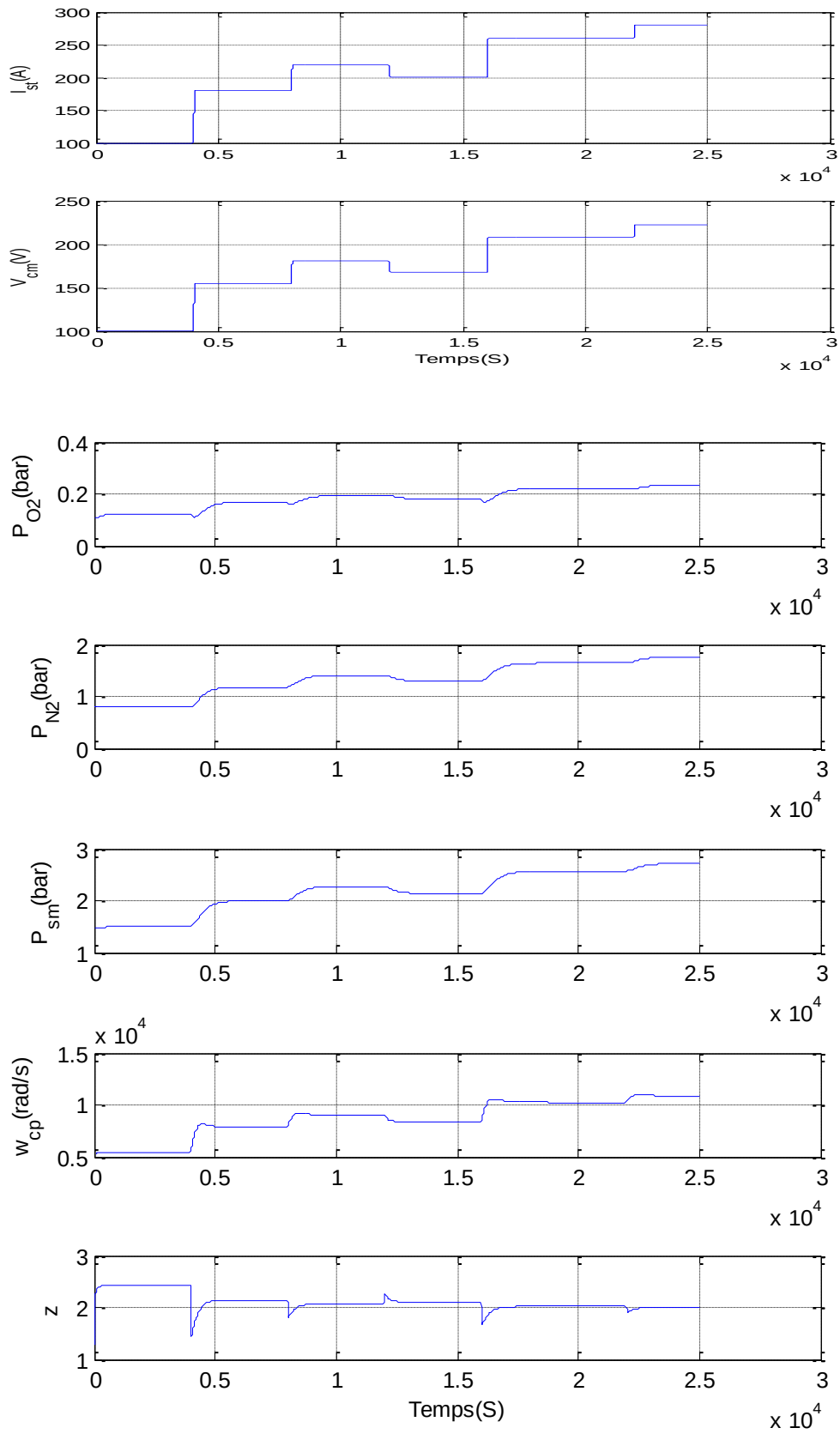


Figure II.8 Validation par simulation de modèles d'alimentation en réactifs de pile à combustible.

Tableau II 2 Paramètres du système de pile à combustible.

Symbole	Variable	Valeur
n	Nombre de cellule de la PàC	381
A_{fc}	zone active de la pile à combustible	280 Cm^2
M_{O2}	masse molaire d'oxygène	32 $e - 3 kg/mol$
M_{N2}	masse molaire d'azote	28 $e - 3 kg/mol$
M_v	masse molaire de vapeur	18.02 $e - 3 kg/mol$
R	constante universelle de gaz	8.3145 $J/(mol.k)$
T_{ST}	température de la PàC	353.15 K
T_{atm}	température ambiante	298.15 K
P_{atm}	pression atmosphérique	101325 $e - 5 Pa$
A_t	section du collecteur	0.00175 m^2
J_{cp}	inertie du moto-compresseur	5 $e - 5 kg.m^2$
C_D	coefficient de décharge du collecteur	0.0124
K_{sm,out}	constante d'orifice à la sortie de supply manifold	0.362 $e - 5 kg/(s.pa)$
K_{ca,out}	constante d'orifice à la sortie de la cathode	0.217 $e - 5 kg/(s.pa)$
V_{ca}	Volume de cathode	0.01 m^3
V_{sm}	Volume de supply manifold	0.02 m^3
F	constante de Faraday	96485
n_{cp}	rendement du compresseur	80%
n_{cm}	rendement du moteur	98%

II.6.Conclusion

Dans ce chapitre, le modèle dynamique de la pile à combustible a été présenté. Ainsi modélisations dynamiques successives d'un système à pile à combustible ont été abordées.

Le modèle complet du système est basé sur les travaux de J. Pukrushpan, [19]. En se basant sur plusieurs hypothèses, le modèle a été simplifié par K. Won Suh. [30]. Ensuite, quelques types de compresseurs ont été discutés pour le système d'alimentation en air, le compresseur à double vis est finalement retenu. Les modèles ont été validés d'une manière satisfaisante sur MATLAB/Simulink. Dans le chapitre suivant, nous présenterons une introduction à la commande par mode glissant. Le modèle à 4 états sera utilisé pour la synthèse du contrôle.

Chapitre III

Commande par mode glissant

III.1. Introduction :

La commande par mode glissant (MG) est l'une des techniques robustes appliquées pour vaincre l'incertitude du système électrique. L'avantage du MG est qu'il peut être utilisé en présence d'incertitudes de fonction et de paramètres non linéaires inconnues, y compris les perturbations et les conditions de fonctionnement. Nous nous intéressons à l'application de ces commandes au système d'alimentation en air des PàC. L'électricité fournie par la PàC alimente les auxiliaires connectés, comme le compresseur, les électrovannes, le ventilateur, etc. Notons que le compresseur consomme environ 20% de la puissance fournie par la PàC [17].

Le but de ce chapitre est la synthèse des contrôleurs robustes basés sur la commande par mode glissant d'ordre deux. Ce chapitre est divisé en deux parties. La première partie, présente l'algorithme par mode glissant d'ordre 2 (Twisting) .on a appliqué dans deuxième partie l'algorithme de MGO2 sur le système de PàC dont l'objectif est de contrôler l'excès d'oxygène et d'approximation à sa valeur optimale. La validation de ces lois de commande est effectuée sur MATLAB simulink.

III.2. Introduction à la commande par mode glissant

Le principe de la commande par MG est de forcer les trajectoires d'état d'un système à atteindre une surface de glissement en temps fini, ensuite, y rester, grâce à une commande discontinue. Ainsi, après la convergence, la réponse dynamique du système dépend des paramètres et des équations qui définissent cette surface de glissement [38]. Celle-ci est déterminée en fonction des objectifs de la commande, des propriétés statiques et dynamiques du système en boucle fermée. Il est possible de synthétiser la surface de glissement en fonction d'objectifs de contrôle classique comme : la stabilité globale, l'optimisation, la régulation, etc.

III.3.Commande par mode glissant d'ordre supérieur

Dans le but d'éviter le chattering existant dans le MG classique, la commande par mode glissant d'ordre supérieur est proposée. Dans cette approche, la commande discontinue agit sur les dérivées d'ordre supérieur de la variable de glissement. La (Fig.III.1) montre que, en appliquant la commande par mode glissant d'ordre supérieur à un système, la surface de glissement est atteinte de manière plus lisse que la commande par MG classique. Cela réduit le chattering, tout en conservant les propriétés de la robustesse et de la convergence en temps fini de la commande par mode glissant classique [17].

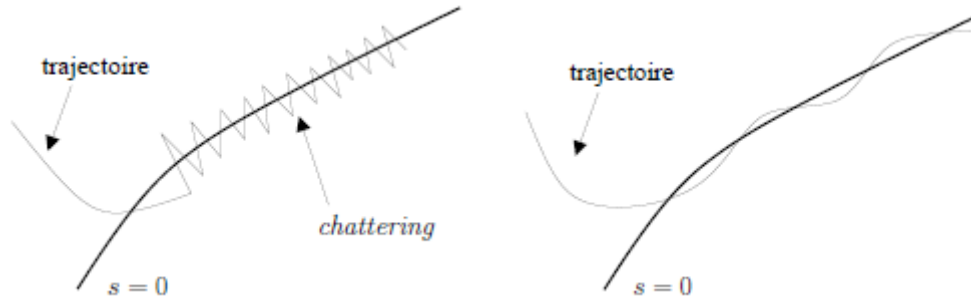


Figure III.1. Allure du régime glissant : MG classique (gauche) et MGOS (droite) [17]

Par la suite, nous présenterons les principes de commande par mode glissant d'ordre supérieur pour les systèmes non-linéaire. En particulier, la théorie des commandes par mode glissant d'ordre 2 (MGO2) est présentée.

III.3.1. Synthèse de la commande

Considérons le système non-linéaire incertain suivant :

$$\dot{x} = f(x, t) + g(x, t)u$$

$$s = s(x, t)$$

$$u = u(x, t)$$

Avec $x \in \mathbb{R}^n$ le vecteur d'états, $u \in \mathbb{R}$ l'entrée du contrôle. $f(x, t)$ et $g(x, t)$ sont des fonctions incertaines, suffisamment différentiables et $s(x, t) \in \mathbb{R}$ est la sortie, aussi suffisamment différentiable.

L'objectif de la commande par MGO2 est de forcer la variable de glissement et sa première dérivée à zéro. Dans le cas où le degré relatif du système par rapport à la variable de glissement est 1 ou 2, s et $\dot{s}$ convergent vers zéro en temps fini. La convergence à l'origine est présentée sur la (Fig.III.2) [17].

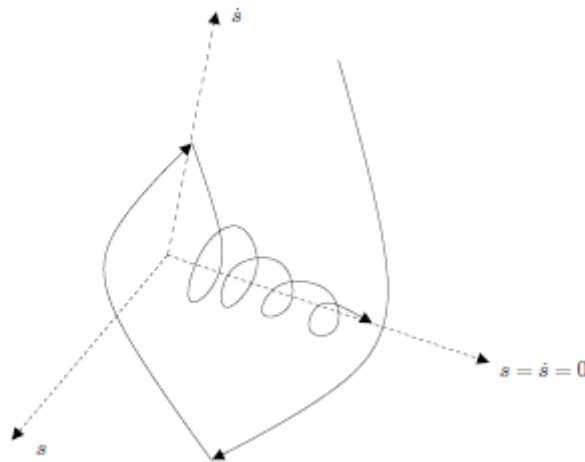


Fig. III.2 : Ensemble de glissement d'ordre 2 [17]

La synthèse des lois de commande par MGO2 dépend des bornes de fonctions incertaines, qui apparaissent dans la deuxième dérivée de la variable de glissement. Deux cas sont possibles, en fonction du degré relatif du système par rapport à s . Les degrés relatifs sont d'ordre 1 ou 2.

III.4 L'algorithme du Twisting

Cette section traite l'application de l'algorithme du Twisting pour le contrôle du rapport d'excès d'oxygène dans une PàC. Le Twisting est basé sur une commutation de l'amplitude de la commande entre quatre valeurs, de telle manière que, cette commutation crée des trajectoires circulaires jusqu'à la convergence en temps fini à l'origine (**Fig.III.3**). La loi de commande de l'algorithme est définie comme suit :

$$u(t) = -r_1 \text{sign}(s) - r_2 \text{sign}(\dot{s}) \quad (3.19)$$

r_1 et r_2 sont des constantes positives réglables, que satisfont les conditions suivantes :

$$\begin{cases} r_1 > r_2 > 0 \\ (r_1 + r_2)B_m - \Theta > (r_1 - r_2)B_M + \Theta \\ (r_1 - r_2)B_m > \Theta \end{cases}$$

Plus de détails sur la preuve et la synthèse de la loi de commande peuvent être trouvés dans [38]. De même que l'algorithme sous-optimal, l'algorithme du Twisting peut être appliqué sur les systèmes de degré relatif 1 par rapport à s .

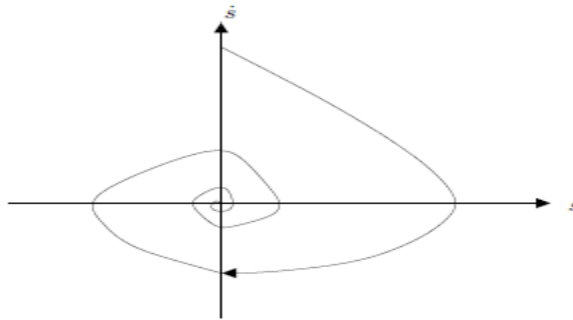


Fig. III.3 : Algorithme du Twisting : plan de phase ($s, \dot{s}$) [17].

III.5.Application du twisting

L'un des objectifs de contrôle des piles à combustible est la régulation du taux d'excès d'oxygène qui est défini comme suit:

$$\lambda_{O_2} = \frac{W_{O_2,in}}{W_{O_2,rct}} \quad (\text{III. 1})$$

$$W_{O_2,in} = \frac{x_{O_2,atm}}{1 + \omega_{atm}} W_{ca,in} \quad (\text{III. 2})$$

$$W_{O_2,rct} = \frac{M_{O_2} n I_{st}}{4F} \quad (\text{III. 3})$$

Avec $W_{O_2,in}$ désignant l'oxygène fourni à l'empilement par le flux d'air et $W_{O_2,rct}$ représente l'oxygène consommé par la réaction chimique. Une valeur de $\lambda_{O_2} < 1$ peut endommager physiquement la pile à combustible en raison de la famine. Un autre objectif de contrôle des piles à combustible est d'obtenir une puissance nette élevée. Les deux objectifs peuvent être atteints en régulant l'alimentation en air de la cathode. Dans le modèle utilisé, la seule entrée de contrôle est la tension qui permet la manipulation du flux d'air à travers le compresseur et, par conséquent, l'alimentation en oxygène de la cathode. Le courant stack, en fonction des consommateurs externes, a une grande influence sur le taux d'excès d'oxygène et représente une perturbation mesurable.

$$\dot{\lambda}_{O_2} = \frac{W_{O_2,in} \dot{W}_{O_2,rct} - W_{O_2,rct} \dot{W}_{O_2,in}}{W_{O_2,rct}^2} \quad (\text{III. 4})$$

$$\dot{W}_{O_2,rct} = \frac{M_{O_2} n}{4F} \dot{I}_{st}$$

Nous supposons que $I_{st} = cte$ alors, $\dot{W}_{O_2,rct} = 0$

$$\begin{aligned} \dot{\lambda}_{O_2} &= \frac{\dot{W}_{O_2,in}}{W_{O_2,rct}} \\ &= \frac{\frac{x_{O_2,atm}}{1+\omega_{atm}} K_{sm.out} \left(\frac{RT_{cp}}{M_{a,atm} V_{sm}} (W_{cp} - W_{ca,in}) - \frac{RT_{st}}{M_{O_2} V_{ca}} (W_{O_2,in} - W_{O_2,out} - W_{O_2,rct}) - \frac{RT_{st}}{M_{N_2} V_{ca}} (W_{N_2,in} - W_{N_2,out}) \right)}{W_{O_2,rct}} \\ \ddot{\lambda}_{O_2} &= \frac{\ddot{W}_{O_2,in}}{W_{O_2,rct}} = \end{aligned} \quad (\text{III.5})$$

$$\frac{\frac{x_{O_2,atm}}{1+\omega_{atm}} K_{sm.out} \left(\frac{RT_{cp}}{M_{a,atm} V_{sm}} (\dot{W}_{cp} - \dot{W}_{ca,in}) - \frac{RT_{st}}{M_{O_2} V_{ca}} (\dot{W}_{O_2,in} - \dot{W}_{O_2,out} - \dot{W}_{O_2,rct}) - \frac{RT_{st}}{M_{N_2} V_{ca}} (\dot{W}_{N_2,in} - \dot{W}_{N_2,out}) \right)}{W_{O_2,rct}}$$

$$\ddot{\lambda}_{O_2} = \frac{\frac{x_{O_2,atm}}{1+\omega_{atm}} K_{sm.out} \left(\frac{RT_{cp}}{M_{a,atm} V_{sm}} (\dot{W}_{cp} - \dot{W}_{ca,in}) - \frac{RT_{st}}{M_{O_2} V_{ca}} (\dot{W}_{O_2,in} - \dot{W}_{O_2,out} - \dot{W}_{O_2,rct}) - \frac{RT_{st}}{M_{N_2} V_{ca}} (\dot{W}_{N_2,in} - \dot{W}_{N_2,out}) \right)}{W_{O_2,rct}}$$

$$\dot{W}_{cp} = \frac{y_3^{max}}{y_4^{max}} \left(\frac{\mu_{cm} k_t}{J_{cp} R_{cm}} u - \frac{\mu_{cm} k_t k_v}{J_{cp} R_{cm}} \omega_{cp} - \frac{C_p T_{atm}}{\omega_{cp} \eta_{cp}} \left[\left(\frac{P_{sm}}{P_{atm}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right] W_{cp} \right) \left(1 - \exp \left(\frac{-r \left(s + \frac{\omega_{cp}^2}{q} - p_{sm} \right)}{s + \frac{\omega_{cp}^2}{q} - y_2^{min}} \right) \right)$$

$$u = v_{cm}$$

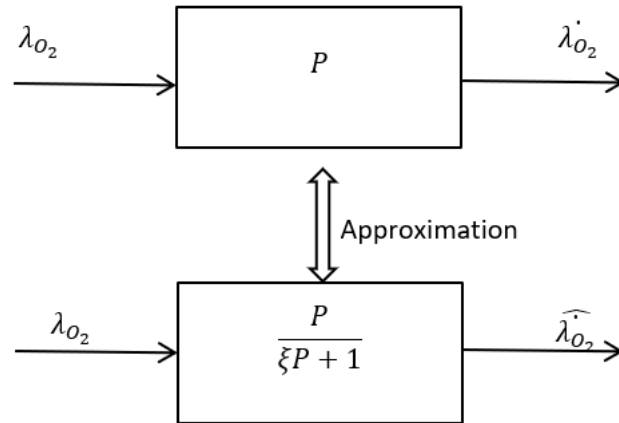
Une substitution des Eqs. (III.2) et (III.3) dans l'Eq. (III.1) donne immédiatement λ_{O_2} . D'après le calcul de λ_{O_2} , on voit que λ_{O_2} est lié aux états non mesurables $W_{O_2,in}$ et $W_{O_2,out}$.

Dans ce mémoire, nous considérons que λ_{O_2} est parfaitement mesurée, mais en raison de la complexité de l'expression de sa dérivée $\dot{\lambda}_{O_2}$, celle-ci est estimée d'une manière robuste par un filtre de type passe-haut. L'estimateur est robuste dans le sens que le bruit haute fréquence du signal n'est pas amplifié. Un paramètre de réglage est choisi en fonction fréquence significative maximale du signal.

III.5.1. Estimation par filtre passe-haut

L'estimateur à filtre passe-haut peut être interprété dans le domaine de Laplace comme une approximation de la fonction de dérivation p à $1/(1 + \xi p)$ pour la rendre causale, ou ξ est un petit paramètre pour sélectionner la fréquence significative du signal. Un choix de ξ très petit assure une bonne approximation de la dérivée mais rend l'estimateur très vulnérable aux bruits haute fréquence. En même temps une valeur abusée de ξ permet de robustifier l'estimateur contre les bruits haute fréquence mais affecte en même temps sa précision à estimer la dériver du signal (atténuation et déphasage du signal significatif). Le choix de ξ doit être donc un compromis entre les deux.

Les étapes de synthèse de l'estimateur sont données comme suit :



Telle que $\xi > 0$

$$\lambda_{O_2}(p)P = \widehat{\lambda_{O_2}}(p)\xi P + \widehat{\lambda_{O_2}}(p)$$

$$\lambda_{O_2}(p) = \widehat{\lambda_{O_2}}(p)\xi + \frac{1}{P}\widehat{\lambda_{O_2}}(p)$$

$$\widehat{\lambda_{O_2}}(t) = \frac{\lambda_{O_2}(t)}{\xi} - \frac{1}{\xi} \int \widehat{\lambda_{O_2}}$$

Où λ_{O_2} est le rapport d'excès d'oxygène et $\widehat{\lambda_{O_2}}$ le rapport d'excès d'oxygène estimé.

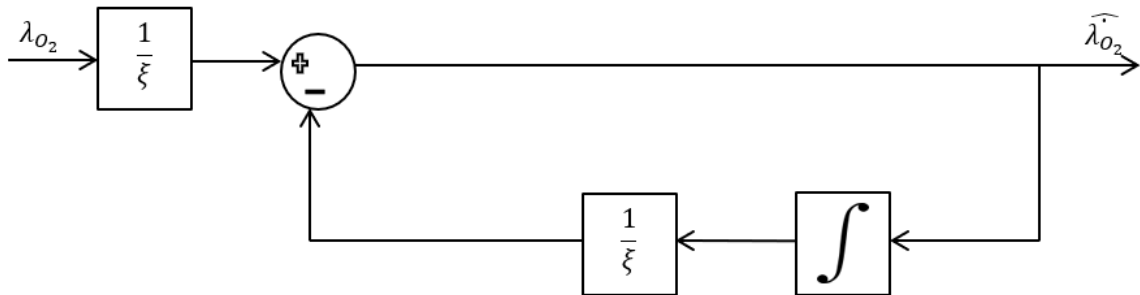


Fig. III.4 estimation par filtre passe haut de l'excès d'oxygène λ_{O_2} .

Définir la variable d'erreur de régulation correspondante et sa dérivée comme

$$\sigma(x) = \lambda_{O_2}(t) - \lambda_{O_2ref}(t)$$

Et

$$\dot{\sigma}(x) = \widehat{\lambda_{O_2}}(t)$$

La dérivée de l'erreur de régulation coïncide avec la dérivée du rapport d'excès d'oxygène du fait que la référence est constante. Après avoir mesurée le rapport d'excès d'oxygène et estimé sa dérivée, celui-ci sera maintenu autour de sa référence par la suite par un dispositif de contrôle de twisting approprié, dont la conception est illustrée ci-dessous.

III.5.2. Contrôle par Twisting

On considère $x_1 = p_{O_2}, x_2 = p_{N_2}, x_3 = \omega_{cp}, x_4 = p_{sm}$

Collecter (1) dans une représentation unique d'espace d'état, donne la forme

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= f(x(t)) + gu(t) + \varphi\omega(t) \\ &= \begin{bmatrix} f1(x_1, x_2, x_4) \\ f2(x_1, x_2, x_4) \\ f3(x_3, x_4) \\ f4(x_1, x_2, x_3, x_4) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ c_{13} \\ 0 \end{bmatrix} u(t) - \begin{bmatrix} -c_7 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \omega(t) \end{aligned}$$

Où $f_i: \mathbb{R}^4 \rightarrow \mathbb{R}^4, i = \{1, \dots, 4\}$, sont des cartes d'état lissé. En considérant la variable d'erreur de régulation (10) comme variable glissante, le problème de commande du sous-système d'alimentation en air PEMFC peut être formulé mathématiquement comme suit

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = f(x(t)) + gu(t) + \varphi\omega(t) \\ \hat{\sigma}(t) \in \mathbb{R} \end{cases} \quad (\text{III.6})$$

Avec une action de commande bornée $u(t) \in \mathbb{R}$, la perturbation mesurable $\omega(t) \in \mathbb{R}$ est une fonction constante par morceaux, et $\hat{\sigma}(t)$ est une fonction lisse.

À partir des équations III.4 et III.5 qui montrent la première et la deuxième dérivée de l'excès d'oxygène, nous constatons que

$$\lambda_{O_2}'' = \Psi + \Phi u(t)$$

Les fonctions Ψ et Φ peuvent être bornées comme suit :

$$|\Psi| \leq \Theta \quad (\text{III.7a})$$

$$0 < B_m \leq \Phi \leq B_M \quad (\text{III.7b})$$

Les valeurs limitent Θ, B_m et B_M ont été calculées au moyen d'une étude numérique des fonctions Ψ et Φ . Après le calcul, les valeurs limites suivantes peuvent être obtenues :

$$\Theta = 3e5, B_m = 450, B_M = 475 \quad (\text{III. 8})$$

Une fois que les limites de (III.8) ont été déterminées, le problème de stabilisation du système (III.4) à dynamique variable glissante (III.6) peut être résolu par la stabilisation de l'inclusion différentielle équivalente suivante en appliquant l'algorithme du Twisting:

$$\lambda_{o_2}'' \in [-\Theta, \Theta] + [B_m, B_M]u(t) \quad (\text{III. 9})$$

La structure de l'algorithme et les paramètres choisis pour le contrôleur de sous-système d'alimentation en air PEMFC sont rappelés ci-dessous. La loi de commande résultante liée à l'algorithme du twisting est définie par [38]

$$u(t) = -(r_1 \sin(\hat{\sigma}(t)) + r_2 \sin(\widehat{\sigma H}(t))) \quad (\text{III.10})$$

Où r_1 et r_2 sont des paramètres de conception dérivés des conditions suffisantes correspondantes pour la convergence en temps fini de l'algorithme [39].

Théorème 1. (Tiré de [38]) Soit r_1 et r_2 satisfaire les conditions

$$\begin{cases} r_1 > r_2 > 0 \\ (r_1 + r_2)B_m - \Theta > (r_1 + r_2)B_M + \Theta \\ (r_1 - r_2)B_m > \Theta \end{cases}$$

Le contrôleur dans (III.10) garantit l'apparition du second mode glissant $\hat{\sigma}(t) = \widehat{\sigma H}(t) = 0$ attirant la trajectoire de la variable glissante dynamique (III.5) en temps fini

Preuve : la preuve découle de [38].

Grace à l'ensemble des paramètres qui satisfont (Ψ), les paramètres de contrôle sont choisis comme :

$$r_1 = 700, \quad r_2 = 0.1$$

D'après les paramètres de la commande par mode glissant d'ordre 2 de [39] nous remarquons que nous pouvons le transformer à un mode glissant d'ordre 1 en prenant une valeur de $r_2 = 0$, la commande sera donc donnée comme suit :

$$u(t) = -r \sin(\sigma(t)) \quad (\text{III.11})$$

Ou $r = 700$

Bien que ce contrôle est un mode glissant d'ordre 1, la trajectoire de λ_{o2} obtenue aura un chattering d'ordre 2 (continument dérivable), ceci est expliqué par le fait que la commande discontinue agit sur la dérivée seconde de λ_{o2} . Le seul avantage au profit du mode glissant d'ordre 2 est la convergence en temps fini.

III.6.Résultats de Simulation

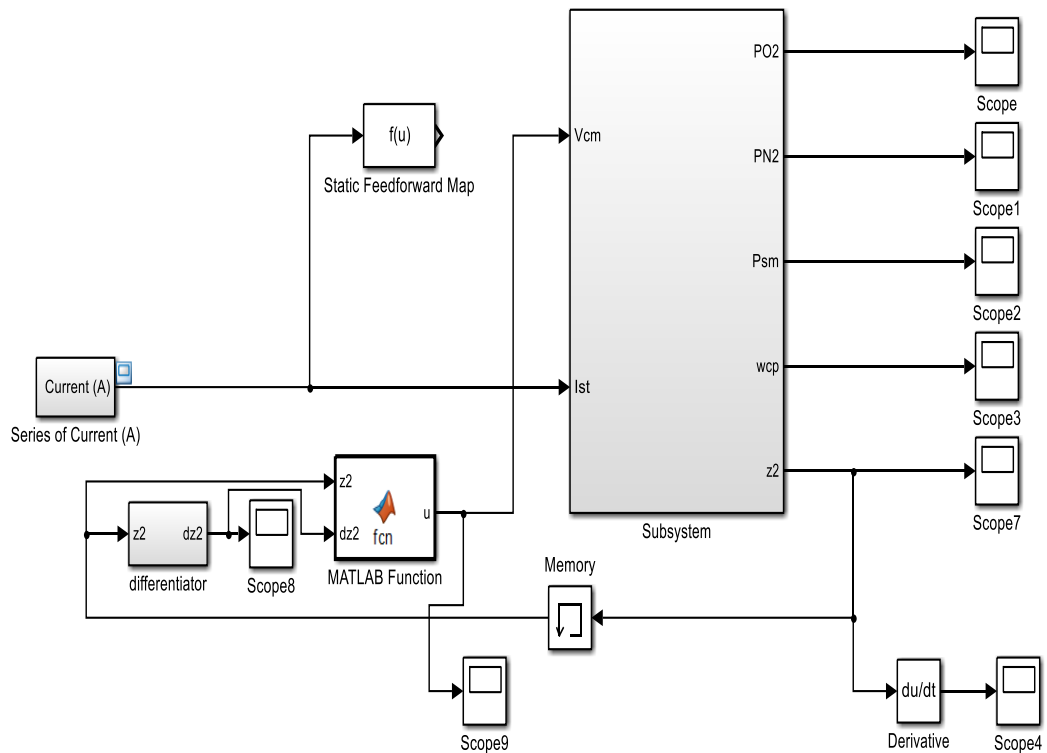


Figure.III.5 Bloc Simulink

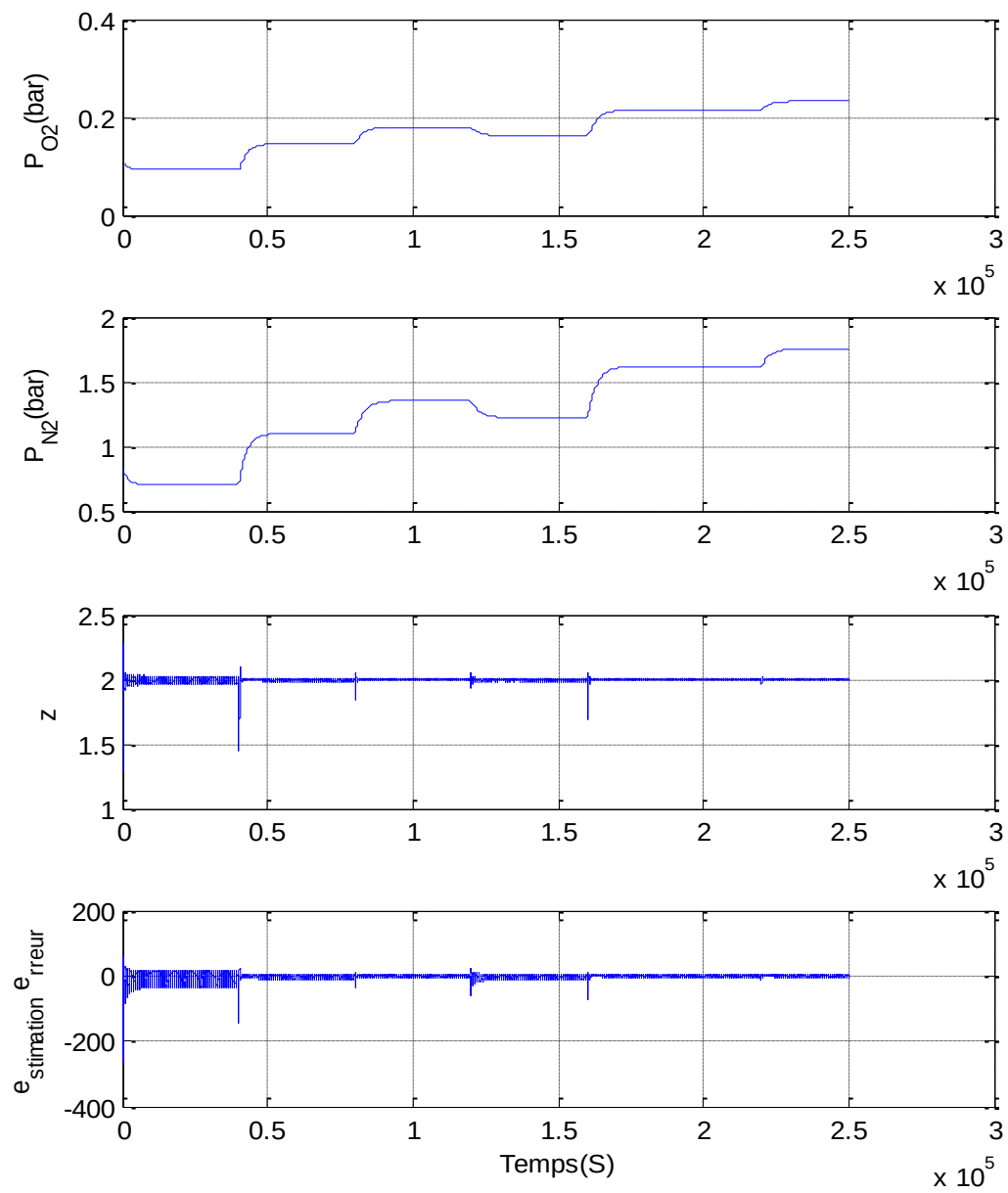


Figure.III.6 Résultats de performance d'ordre 2

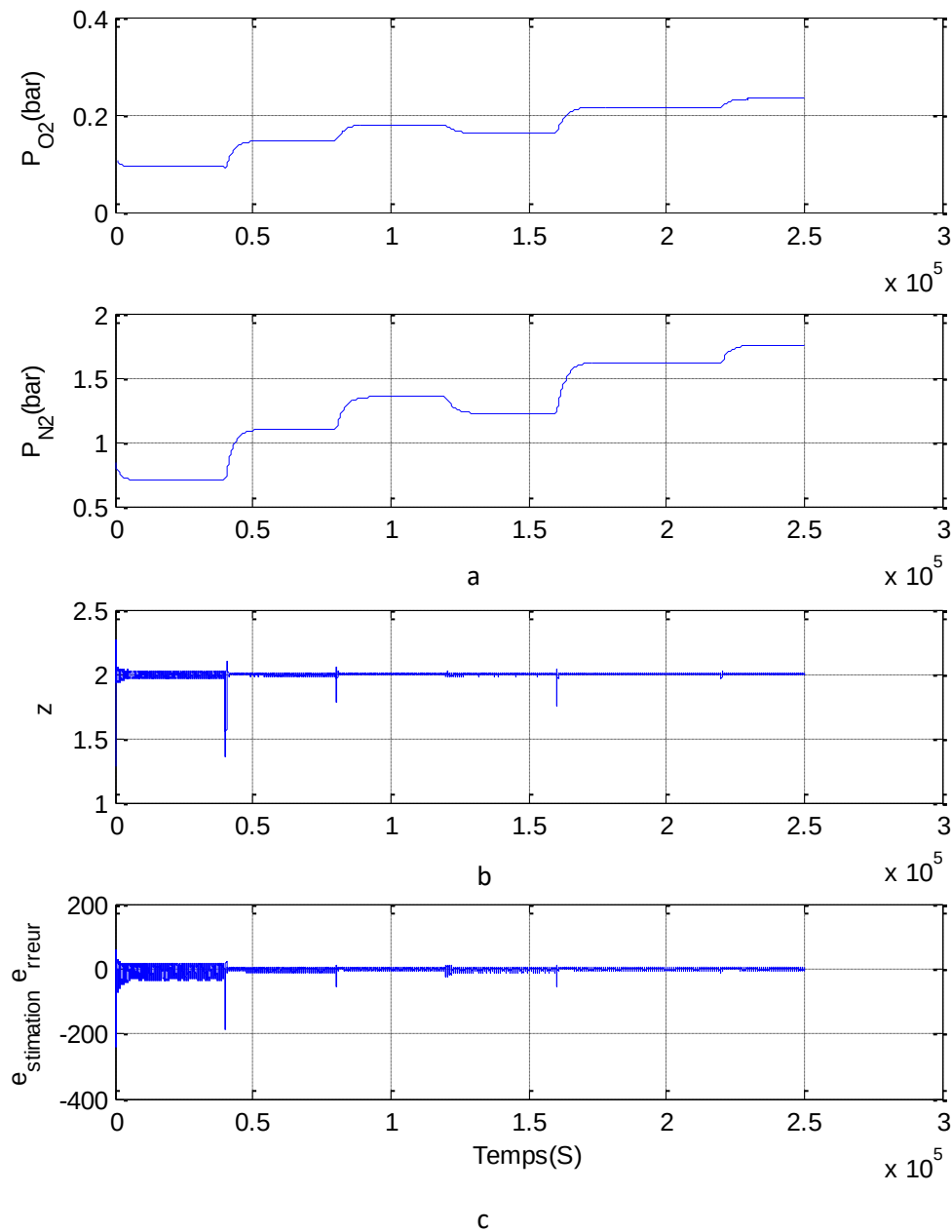


Figure.III.7 Résultats de performance d'ordre 1

Interprétation :

La simulation du mode glissant d'ordre 1 a montré une bonne allure de suivi des trajectoires de références avec des performances très bonne de précision et de rejet de perturbation. En effet, les changement dans le courant du stack n'a pas déstabilisé la commande et les performances ont été conservés.

III.7. Conclusion

Dans ce chapitre, nous nous sommes intéressés à la commande du système d'alimentation en air des piles à combustible de type PEM. La problématique abordée est la maximisation de la puissance nette fournie par la PàC. Cette dernière est atteinte en contrôlant le rapport d'excès d'oxygène à sa valeur optimale. Le modèle PàC est basé sur 4 équations d'état représentant le système d'alimentation en air et la partie cathode. Les paramètres du système à PàC sont en général incertains. Pour cela, les incertitudes ont été formées et intégrées dans le modèle dynamique. On a appliqué la commande robuste par mode glissant d'ordre 2 (twisting) sur la commande à degré relatif 2, et à degré relatif 2 approximé à 1.

Les contrôleurs proposés ont été validés sur MATLAB simulink, ceci est constitué d'un compresseur à double vis et d'un émulateur de PàC en temps réel.

Les résultats obtenus montrent que les contrôleurs proposés ont de bonnes performances malgré les variations paramétriques et la variation de la charge mais les résultats de l'éqs (III.11) plus précis, plus Simplifié que l'éqs (III.10), et moins cher, car la tension changée entre deux valeurs, contrairement à [39] change entre 4 valeurs et on remarque que ces 4 valeurs la différence entre elles est très petite qu'elle ne fait pas une grande différence au travail.

Conclusion général

CONCLUSION GENERALE

Ce travail a fait l'objet d'étude d'une commande par mode glissant appliquée au sous-système d'alimentation en air d'une pile à combustible de type PEM. L'objectif global de la commande était la poursuite du point de fonctionnement optimal de la pile caractérisé par une valeur optimale du rapport d'excès d'oxygène.

La pile à combustible, réduite à sa cathode dans ce travail, est définie par un modèle phénoménologique d'ordre 4, décrivant l'évolution des états internes de la pile avec une précision suffisante pour la commander. La sortie qui nous intéresse est le rapport d'excès d'oxygène donné par le rapport entre le débit d'oxygène entrant et celui ayant subi une réaction.

Notre travail consistait à synthétiser une loi de commande par mode glissant pour la stabilisation de la sortie concernée autour de sa valeur optimale en dépit des perturbations externes, résumées au courant de sortie, et les imperfections du modèle. Nous avons montré que malgré le degré relatif égal à 2 de la sortie à commander, la commande par mode glissant d'ordre 1 avec une surface triviale serait nécessaire pour sa stabilisation.

Nous avons aussi montré qu'une commande par mode glissant d'ordre supérieur, un twisting en particulier qui requiert une estimation de la dérivée de la sortie, ne serait pas nécessaire, elle serait même sans signification pratique. Ceci est expliqué par le fait que l'effet du degré relatif supérieur est négligeable, ce qui s'interprète pratiquement par la dynamique rapide du moteur-compresseur par rapport à la dynamique des pressions en aval.

Un autre avantage très pratique de choisir la commande par mode glissant d'ordre 1 est qu'elle bascule entre deux valeurs de contrôle seulement, ce qui est compatible avec une commande directe des interrupteurs d'un pont complet alimentant un moteur à courant continu.

Référence

- [1].B.WAHDAME (2006): Analyse et optimisation du fonctionnement de piles à Combustible par la méthode des plans d'expériences, thèse de doctorat, Université de technologie de Belfort Montbéliard et de l'Université de France -Comte.
- [2].S.BELKACEM BOUZIDA (2011): Etude des phénomènes des écoulements des gaz dans les canaux dans une pile a combustible de type PEMFC, thèse de magistère, Université El Hadj Lakhdar, Batna.
- [3].Amel LACHICHI: Modélisation et stabilité d'un régulateur hybride de courant – Application aux convertisseurs pour pile à combustible, thèse doctorat, l'Université de Franche-Comté, novembre 2005.
- [4].M.RADULESCU(2006): Systèmes de cogénération d'électricité et de chaleur avec piles à combustible de type PEMFC ou SOFC et vapores formage externe, thèse de doctorat, l'Université Henri Poincaré, Nancy 1.
- [5].E. AGLZIM (2009): Caractérisation Par Spectroscopie d'impédance De l'impédance Complexe d'une Pile A Combustible En Charge – Evaluation De l'influence De l'humidité, thèse de doctorat, Université Henri Poincaré – Nancy1.
- [6].MajidZandi: Contribution au pilotage des sources hybrides d'énergie électrique, PhD thesis, Vandœuvre-les-Nancy, INPL, 2010. (page23).
- [7]. 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.
- [8].ToufikAzib: Contribution à l'étude d'électro-générateurs à pile à combustible: Conceptions d'architectures et de leurs commandes. PhD thesis, Paris 11, 2010. (Page 24).
- [9]. Jérôme Lachaize: Etude des stratégies et des structures de commande pour le pilotage des systèmes énergétiques à Pile à Combustible (PAC) destinés à la traction. PhD thesis, 2004.(Pages 24, 25, 32, 40).
- [10].CHOUIDIRAMohammedAssil, BAKRI Akram(2019) : MODELISATION FLOU DE LA PILE A COMBUSTIBLE DE TYPE SOFC, Mémoire de master, université MOHAMED BOUDIAF de M'sila.
- [11].P.THOUNTHONG(2005): conception d'une source hybride utilisant une pile à combustible et des super condensateurs, thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine.

- [12].G. K. Andersen, C. Klumpner, S. B. Kjaer, F. Blaabjerg : A new green power inverter for fuel cell . Power Electronics Specialists Conference, PESC'02, 2002, vol. 2, pp. 727-733
- [13].K. W. E. Cheng, D. Sutanto, Y. L. Ho, K. K. Law Exploring : the power system for fuel cell. Power Electronics SpecialistsConference, PESC'01, 2001, vol. 4, pp. 2197- 2202.
- [14].Jérôme LACHAIZE : Etude des stratégies et des structures de commande pur le pilotage des systèmes énergétiques à Pile à Combustible (PAC) destinés à la traction, thèse de doctorat INPT, septembre 2004.
- [15].Messaoud Mohammadi : Gestion de l'énergie pour une chaîne multi-sources,Thèse de Doctorat , Juillet 2016
- [16]. Guillaume FONTES : Modélisation et caractérisation de la pile PEM pour l'étude des interactions avec les convertisseurs statiques, thèse doctorat INPT, septembre 2005.
- [17] Imad Matraji. Contribution à la commande non linéaire robuste des systèmes d'alimentation en air des piles à combustible de type PEM. Autre. Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, 2013.
- [18]. C.J. Hatziadoniu, A.A. Lobo, F. Pourboghrat, and M. Daneshdoost : A simplified dynamic model of grid-connected fuel-cell generators. IEEE Transactions on Power Delivery, 17(2) :467 – 473, 2002.
- [19]. J. Pukrushpan, A. Stefanopoulou, and H. Peng Control of Fuel Cell Power Systems : Principles, Modeling and Analysis and Feedback Design.Springer, 2004.
- [20]. B. Blunier : Modélisation de moto-compresseurs en vue de la gestion de l'air dans les systèmes pile à combustible : simulation et validation expérimentale. PhD thesis, University of Technology Belfort Montbéliard, 2007.
- [21]. 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. PhD thesis, Ecole Doctorale, Sciences et Technologies de l'Information des Télécommunications et des Systèmes, 2007.
- [22]. A. Haryanto, S. Fernando, N. Murali, and S. Adhikari : Current status of hydrogen production techniques by steam reforming of ethanol : a review. Energy & Fuels, 19(5) :2098–2106, 2005.
- [23]. D. Das and T.N. Veziroglu : Hydrogen production by biological processes : a survey of literature. International Journal of Hydrogen Energy, 26(1) :13 – 28, 2001.

- [24]. S. MeherKotay and D. Das. Biohydrogen as a renewable energy resource Uprospects and potentials. *International Journal of Hydrogen Energy*, 33(1) :258 – 263, 2008.
- [25]. FBarbir. *PEM Fuel Cells : Theory and Practice*. Elsevier, 2005.
- [26]. R. Atan and W.A. NajmiW.M : Temperature profiles of an air-cooled PEM fuel cell stack under active and passive cooling operation. *Procedia Engineering*, 41(0) :1735–1742, 2012.
- [27]. D. Chen, W. Li, and H. Peng : An experimental study and model validation of a membrane humidifier for PEM fuel cell humidification control. *Journal of PowerSources*, 180(1) :461 – 467, 2008.
- [28]. K. Rajashekara : Propulsion system strategies for fuel cell vehicles. *SAE Internationalpaper* 2000-01-0369, 2000.
- [29]. W. Yang, B. Bates, N. Fletcher, and R. Pow : Control challenges and methodologies in fuel cell vehicle development. *SAE International paper* 98C054, 1998.
- [30] K. Won Suh. *Modeling, Analysis and control of Fuel Cell Hybrid Power Systems*. PhD thesis, Department of mechanical engineering, The university ofMichigan, 2006.
- [31].Wolfgang FRIEDE : *Modélisation et caractérisation d’une pile à combustible du type PEM*, thèse doctorat INPL, aout 2003.
- [32].Fahed MEKHALFIA, Laid LAMRI (2008) : *modélisation des piles à combustible application à l’entraînement du moteur asynchrone*, mémoire de master, université MOHAMED BOUDIAF de M’sila.
- [33], *Control of Fuel Cell Power Systems: Principles, Modeling, Anylysis and Feedback Design*, ser. *Advances in Industrial Control*. London: Springer-Verlag Telos, 2004.
- [34] W. B. Gu, C. Y. Wang, and B. Y. Liaw, “Numerical modeling of coupled electrochemical and transport precesses in lead-acid batteries,” *Journal of The Electrochemical Society*, vol. 144, no. 6, pp. 2053–2061, 1997.
- [35] S. Um, C.-Y. Wang, and K. S. Chen, “Computational fluid dynamics modeling of proton exchange membrane fuel cells,” *Journal of The Electrochemical Society*, vol. 147, no. 12, pp. 4485–4493, 2000.
- [36] A. Wiartalla, S. Pischinger, W. Bornscheuer, K. Fieweger, and J. Ogrzewalla. *Compressor/ expander units for fuel cell systems*. *SAE Paper, Fuel Cell Power for Transportation*, pages 149–153, 2000.

Référence

- [37] Jorn K. Gruber and Carlos Bordons and Fernando Dorado “Nonlinear control of the air feed of a fuel cell” 2008 American Control Conference Westin Seattle Hotel, Seattle, Washington, USA June 11-13, 2008
- [38]. A. Levant. Sliding order and sliding accuracy in sliding mode control. International Journal of Control, 58(6) :1247–1263, 1993.
- [39]zakaria baroud « Algebraic Observer-Based Output-Feedback Controller Design for a PEM Fuel Cell Air-Supply Subsystem»,Article in IET Renewable Power Generation · August 2018