

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA  
RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ AMAR TELIDJI DE LAGHOUAT



Faculté des Sciences et Technologies

Département: Électrotechnique

Mémoire

Pour l'obtention du diplôme de Master

Option: Automatique

Présenté par **Zerarka Abdelhamid**

Thème

## **Diagnostic des Défaits du Collecteur d'Air dans un Système Pile à Combustible**

Membres du Jury :

President	Abou Bakar Hadjaissa	MCA	Université de Laghouat
Examineur	Bachir Bendjedia	MCA	Université de Laghouat
Encadrant	Mohamed Djamel Bougrine	MCB	Université de Laghouat
Co-Encadrante	Asma Rahmani	Doctorante	Université de Laghouat

*Septembre 2023*

## ملخص

هذا البحث يركز على خلايا الوقود بغشاء مبادل البروتونات (PEMFC) ونظام إمدادها بالهواء. تسلط المقدمة الضوء على أهمية حاسمة لإمداد الهواء في عملية خلايا الوقود والتحديات المرتبطة بمراقبتها و صيانتها.

الدراسة تستكشف استخدام مراقبين متقدمين، وبالأخص مراقب ذو النمط الانزلاقي من الرتبة العليا مع حقن PI، لتقدير ضغط الأكسجين الجزئي بدقة في نظام إمداد الهواء لخلايا الوقود بمفص. هؤلاء المراقبون يراقبون سلوك النظام في الوقت الفعلي ويحددون السلوك غير العادي، بما في ذلك الأخطاء مثل تسربات الهواء في مجمع الهواء.

الهدف الرئيسي لهذا البحث هو تحسين موثوقية ومتانة وكفاءة خلايا الوقود PEMFC من خلال تحسين نظام إمدادها بالهواء، وهو أمر حاسم لتحقيق أداء مثلى.

**كلمات مفتاحية :** خلايا الوقود PEMFC ، مراقب ذو نمط انزلاقي، صيانة الأنظمة

## Resumé

Ce mémoire se concentre sur les piles à combustible à membrane échangeuse de protons (PEMFC) et leur système d'alimentation en air. L'introduction met en lumière l'importance critique de l'alimentation en air dans le fonctionnement des PEMFC et les défis liés à son contrôle.

L'étude explore l'utilisation d'observateurs avancés, en particulier l'observateur à mode glissant d'ordre supérieur avec injection PI, pour estimer avec précision la pression partielle d'oxygène dans le système d'alimentation en air des PEMFC. Ces observateurs surveillent en temps réel le comportement du système et identifient les comportements anormaux, y compris les défauts tels que les fuites dans le collecteur d'air.

L'objectif central de la thèse est d'améliorer la fiabilité, la durabilité et l'efficacité des PEMFC en optimisant leur système d'alimentation en air, crucial pour une performance optimale.

**Mots clés :** Pile à combustible PEMFC, Observateur par Mode glissant, Diagnostic de défauts

## Abstract

This thesis focuses on proton exchange membrane fuel cells (PEMFC) and their air supply system. The introduction highlights the critical importance of air supply in the operation of EBSMs and the challenges associated with its control.

The study explores the use of advanced observers, in particular the higher order sliding mode observer with PI injection, to accurately estimate the partial oxygen pressure in the PEMFC air supply system. These observers monitor the behavior of the system in real time and identify abnormal behavior, including defects such as leaks in the air collector.

The central objective of the thesis is to improve the reliability, durability and efficiency of PEMFC by optimizing their air supply system, crucial for optimal performance.

**Keywords:** PEMFC fuel cell, Sliding Mode Observer, Fault diagnosis

# Remerciements

Tout d'abord, je tiens à remercier dieu de m'avoir donné le courage, la patience et la force de mener à bien ce travail.

Mes plus sincères remerciements à mes parents et ma famille pour m'avoir soutenu et aidé tout au long du chemin.

Je tiens à remercier mon encadrant Mr. BOUGRINE Mohamed Djamel Eddine pour son orientation, ses conseils et son aide le long de cette période, ainsi que tous les enseignants qui ont contribué à ma formation et qui m'ont aidé à enrichir mon savoir.

Je remercie également mes collègues et camarades étudiants à l'université de Laghouat qui ont été d'une grande aide et une belle compagnie le long de notre formation .

Et finalement, je tiens à remercier le jury pour l'intention qu'ils veulent porter à ce travail.



# *Dédicace*

*Je dédie ce modeste travail*

*À ma famille qui n'a cessé d'être mon étoile guide tout au long de  
ma vie et qui m'a encouragé durant mes études.*

*À mes très chers frères et sœurs.*

*À mes amis avec qui je partage les meilleurs souvenirs À mes  
camarades que j'ai rencontrés à différentes étapes de mon cursus.*

*À tous ceux qui aiment partager le savoir À tous ceux qui ont  
contribué à la réalisation de ce travail*

*Zerarka Abdelhamid*

# Contents

List of Figures

List of Tables

List of Abbreviations

<b>Introduction Générale</b>	<b>1</b>
<b>1 Généralités sur la pile à combustible</b>	<b>3</b>
1.1 Introduction . . . . .	3
1.2 Historique des piles à combustible . . . . .	3
1.3 Description et Principes de fonctionnement de PAC . . . . .	8
1.4 Le Système de Pile à Combustible . . . . .	10
1.5 Avantages et Inconvénients des Piles à Combustible PEMFC . . . . .	11
1.5.1 Avantages des PEMFC . . . . .	11
1.5.2 Inconvénients des PEMFC . . . . .	12
1.6 Conclusion . . . . .	13
<b>2 Modélisation du système d'alimentation en air</b>	<b>14</b>
2.1 Introduction . . . . .	14
2.1.1 Tension de pile PEMFC . . . . .	15
2.1.2 Modèle de système d'alimentation en air PEMFC . . . . .	18

2.2	Validation du Modèle . . . . .	30
2.2.1	Conclusion . . . . .	32
<b>3</b>	<b>Diagnostic des défauts du collecteur d'air basée sur l'observation par mode glissant</b>	<b>34</b>
3.1	Introduction . . . . .	34
3.2	Super Twisting modifié pour la détection et l'isolation des défauts . . . . .	35
3.3	Reconstruction du défauts . . . . .	39
3.4	Application à la pile PEMFC . . . . .	40
3.5	Résultats de Simulation . . . . .	42
3.5.1	L'observateur sans défaut . . . . .	42
3.5.2	Scénario de Défaillance . . . . .	46
3.6	CONCLUSIONS . . . . .	49
	<b>Bibliography</b>	<b>56</b>

# List of Figures

1.1	Pile inventée par Grove [1]	4
1.2	Francis Thomas Bacon et la pile à combustible [1]	6
1.3	Pile à combustible du type PEM utilisée dans le programme Gemini [2]	7
1.4	Principe de fonctionnement de la pile à combustible [3]	9
2.1	Réaction de la pile à combustible	15
2.2	Tension typique de pile à combustible.	17
2.3	Chutes de tension dues à différents types	19
2.4	Schéma du système de la pile à combustible	20
2.5	Compresseur à double vis	22
2.6	Validation par simulation du modèle à 4 états	31
3.1	Schéma Simulink de la pile avec l'observateur	44
3.2	Le courant $I_{st}$	45
3.3	La tension du compresseur $v_{cm}$	46
3.4	Le rapport d'excès d'oxygène	46
3.5	La pression d'oxygène avec celle estimée	47
3.6	La pression d'azote avec celle estimée	47
3.7	La pression du collecteur d'air avec celle estimée	48
3.8	Le courant $I_{st}$	49
3.9	La tension du compresseur $v_{cm}$	49

3.10 Le rapport d'excès d'oxygène $\lambda_{O_2}$ . . . . .	50
3.11 La pression d'oxygène avec celle estimée . . . . .	50
3.12 La pression d'azote avec celle estimée . . . . .	51
3.13 La pression du collecteur d'air avec celle estimée . . . . .	51
3.14 Valeur du débit de fuite . . . . .	52

# List of Tables

2.1	Résumé des caractéristiques typiques des piles à combustible[4] . . . . .	16
2.2	Paramètres utilisés dans le modèle de compresseur . . . . .	23
2.3	Paramètres physiques de la pile utilisée dans la simulation . . . . .	29
3.1	Paramètres physiques de la pile utilisée . . . . .	43

# List of Abbreviations

<b>PEM:</b>	Proton Exchange Membrane
<b>FC:</b>	Fuel Cell
<b>FCS:</b>	Fuel Cell System
<b>SMC:</b>	Sliding Mode Control
<b>HOSMC:</b>	Higher Order Sliding Mode Control
<b>IHOSMC:</b>	Integral Higher Order Sliding Mode Control

# Introduction Générale

Les piles à combustible produisent de l'électricité par réaction d'hydrogène et d'oxygène. Dans les PEMFC, les côtés anode et cathode sont alimentés respectivement en hydrogène et en oxygène. Dans les automobiles à pile à combustible, l'hydrogène est stocké dans des bouteilles sous pression tandis que l'air est utilisé comme source d'oxygène, pompé dans la cathode par un compresseur. Le système d'alimentation en air introduit un défi intéressant dans les performances globales du système PEMFC. Comme le système PEMFC fonctionne comme une centrale électrique autonome dans les automobiles, le moteur du compresseur est également alimenté par la PEMFC. La puissance nette du système est donc la différence entre la puissance produite par la pile à combustible et celle consommée par le système d'alimentation en air (la consommation des autres systèmes auxiliaires étant négligeable). Des études expérimentales ont montré que le système d'alimentation en air peut consommer jusqu'à 30% de la puissance de la pile à combustible dans des conditions de charge élevée. [5] Par conséquent, il doit fonctionner à son point optimal, auquel il fournit juste assez d'oxygène nécessaire à la réaction de l'hydrogène et de l'oxygène.

Malheureusement, ce type de contrôle n'est pas possible sans la connaissance exacte de la pression partielle d'oxygène. Les capteurs conventionnels ne peuvent donner que la pression totale de l'air à l'intérieur de la cathode, qui contient les pressions partielles d'autres mélanges gazeux tels que l'azote, le dioxyde de carbone, etc. Une connaissance imprécise de la quantité d'oxygène dans la cathode peut entraîner de graves problèmes, tels qu'un manque d'oxygène pendant les transitions de charge rapides.[6] Les observateurs peuvent jouer deux

rôles importants dans le système d'alimentation en air. Premièrement, ils peuvent fournir une estimation précise de la pression partielle d'oxygène. Deuxièmement, ils peuvent détecter et identifier un comportement anormal en s'aidant des capteurs disponibles et une connaissance mathématique du modèle, détectant et identifiant ainsi les défauts et les pannes.

Ce mémoire est organisé comme suit :

Chapitre 1 présente des généralités sur les piles à combustible, en mettant particulièrement l'accent sur les piles de type PEM (membrane échangeuse de protons). Les piles à combustible PEM sont une technologie d'électrochimie avancée qui a suscité un intérêt considérable en raison de leur efficacité, de leur propreté et de leur large gamme d'applications potentielles. Nous examinerons les principes fondamentaux de fonctionnement de ces piles, leurs avantages et leurs applications clés, jetant ainsi les bases pour une compréhension approfondie de cette technologie innovante.

chapitre 2 décrit le modèle du système PEMFC qui comprend le modèle de tension de pile et le modèle de système d'alimentation en air. Un modèle simplifié à 4 états est considéré, qui prend en compte la dynamique de la pression partielle d'oxygène, de la pression partielle d'azote, de la vitesse du compresseur et de la pression du collecteur d'alimentation. Ensuite. Un modèle de système d'alimentation en air d'une pile de 75W est validé par simulation et comparé avec un modèle plus complet comprenant 9 états.

Le chapitre 3 contient les principales contributions liées à l'observation par mode glissant d'ordre supérieur avec injection PI et à l'approche de détection et de reconstruction de défauts basée sur cet observateur pour le système d'alimentation en air PEMFC. Le défaut considéré dans notre étude est le défaut de fuite dans le collecteur d'air d'alimentation.

Le mémoire est achevé par une conclusion qui récapitule les principaux points abordés dans ce travail.

# Chapter 1

## Généralités sur la pile à combustible

### 1.1 Introduction

Il est impossible d'aborder l'ère de l'écologie sans évoquer la pile à combustible et son potentiel technologique. Pour commencer, cette technologie a une longue histoire, avec Sir William Grove considéré comme l'inventeur en 1839 [1]. Cependant, il est intéressant de noter que le moteur à explosion a été industrialisé en premier en raison des défis majeurs posés par la pile à combustible. De plus, la pile à combustible est un convertisseur d'énergie propre et efficace, ce qui en fait une excellente alternative aux énergies fossiles, particulièrement dans le contexte actuel de préoccupation pour le réchauffement climatique. Elle offre une conversion énergétique trois fois plus efficace que l'essence, réduisant ainsi considérablement les pertes liées à la conversion. Après un brève historique, nous examinerons brièvement le fonctionnement de la pile à combustible ainsi que ses avantages et inconvénients.

### 1.2 Historique des piles à combustible

C'est en 1802 que Sir Humphry Davy découvre l'électrochimie grâce à la construction d'une cellule en carbone fonctionnant à haute température avec de l'acide nitrique comme électrolyte [7]. Mais le premier à avoir observé le phénomène des piles à combustible fut Chris-

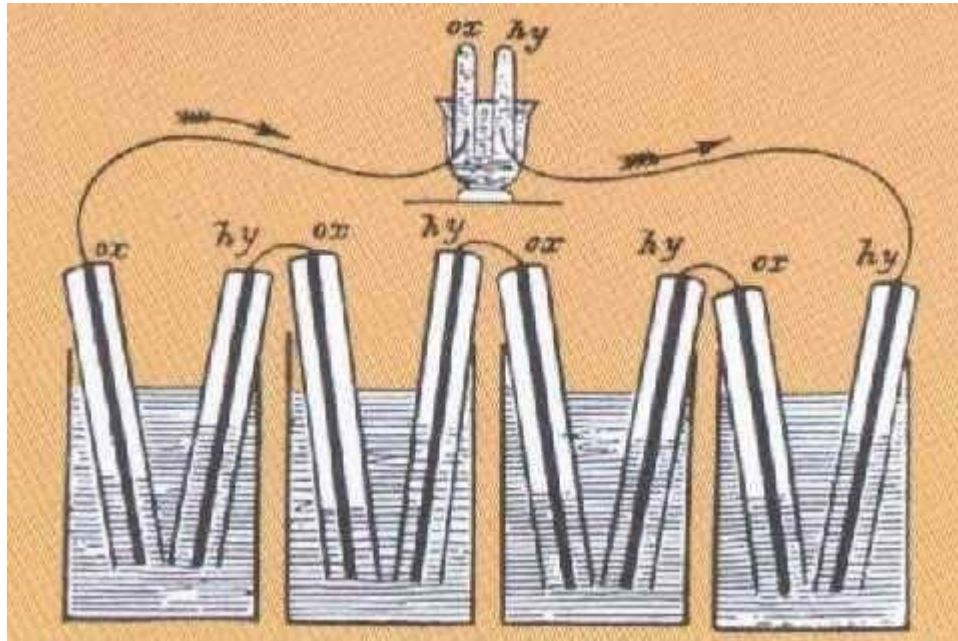


Figure 1.1: Pile inventée par Grove [1]

tian Friedrich Schoenbein en 1838, Grâce à une expérience où il a utilisé un tube en U avec deux électrodes de platine, et en utilisant un courant électrique, il est parvenu à obtenir de l'hydrogène et de l'oxygène. En déconnectant le courant électrique, il constate que les gaz produisent à leur tour du courant électrique le principe de pile à combustible est née. Les deux scientifiques on finit par cette rencontre dans une conférence à Birmingham en 1839. Dans cette expérience désormais célèbre de William Robert Grove réalise l'inverse de l'expérience de l'électrolyse de l'eau en utilisant dans son expérience un tube en U avec deux électrodes de platine poreux (Figure 1.1) et de l'acide sulfurique comme électrolyte [8]. Un courant constant circule entre deux électrodes en platine, une extrémité plongée dans de l'acide sulfurique et l'autre dans des réceptacles scellés permettant de recueillir l'oxygène et l'hydrogène. Il a fini par noter que le niveau d'eau dans les réceptacles scellés était monté dans les deux tubes tant que le courant circulait. Cette technique fut mise en hibernation devant l'explosion du développement des générateurs thermiques et des accumulateurs et piles électriques aux environs des années 1860 (révolution industrielle).

On devra attendre 1889 pour voir un développement dans la pile à combustible, Ludwig

Mond et Carl Langer [9] ont créé ce qu'ils ont appelé une " pile de gaz ", ils améliorent les piles précédentes en introduisant des catalyseurs en noir de platine et des électrolytes à base de matrices poreuses en plâtre ou en amiante. À la fin du 19ème plus précisément en 1893 Friedrich Wilhelm Ostwald, le physico-chimiste qui en étudiant la relation entre la propriété physique et les réactions chimiques apporte un apport extraordinaire dans la compréhension théorique des piles à combustible. Grâce à ces études, il réussit à améliorer la pile de Grove, il détermine grâce à ses nombreuses expérimentations les différents rôles interactifs entre les différents composants de la pile (des électrodes, des électrolytes, oxydants et ions, etc.). Ses travaux en chimie ont fondé les bases de recherche dans le monde de la pile à combustible. Plus tard, il a également démontré que les piles étaient plus efficaces que le moteur à combustion interne. [10] Vers la fin des années 30 au 20ème siècle Francis Thomas. Bacon invente la première pile hydrogène-oxygène (Figure 1.2), la poursuite de ses recherches après cette invention se couronna en 1953 avec la fabrication du premier générateur de 1KW [11]. La découverte de ce générateur a mis en évidence les différents progrès et avantages apportés par cette pile :

- Fonctionnement silencieux.
- Rendement très élevé par rapport aux autres générateurs thermiques.
- Possibilité d'utilisation en stationnaire ou en traction

Plus tard vers 1959, Bacon et son équipe de recherche ont parachevé la réalisation d'une pile à combustible hydrogène-oxygène d'une puissance de 5 KW. Cette pile avait la capacité d'alimenter différentes machines, sa température de fonctionnement oscille entre 40 et 200 degrés Celsius. Plus tard, la pile de Bacon fut modifiée par la NASA pour le projet spatial de Gemini dans le but d'obtenir de l'eau et de l'électricité pour les futurs voyageurs de l'espace [12].

Pour les recherches survenues dans les années 50, la pile de Bacon est devenue la référence. Et dans le but d'améliorer les autres piles par rapport à la pile de Bacon les chercheurs ont fini



Figure 1.2: Francis Thomas Bacon et la pile à combustible [1]

par découvrir que l'électrolyte doit être tel que les ions le traversent aussi facilement qu'un flux d'électrons. On finit par découvrir que plusieurs cellules empilées permettent d'obtenir de meilleur résultat. Dans les années 1950-1965 les recherches sur les piles à combustible sont pris en charge par nombreux laboratoires et industriels se lancent dans l'aventure. Les premières applications ont concerné les domaines spatiaux et océanographiques. Dans les domaines océanographiques l'U.S. Navy a réalisé un essai d'une pile de 20 kW capables de résister à une pression due à une profondeur de 6 Km. Et dans le domaine spatial, le précurseur fut d'abord la NASA qui utilisa les piles pour ses engins spatiaux dans les années 60 :

La principale fonction des piles à combustible pour la NASA était de les utiliser comme générateurs électriques pour les véhicules spatiaux habités Gemini en 1963 (piles du type PEMFC du General Electric) représentée sur la Figure 1.3 et Apollo en 1968 (piles AFC de Pratt et Whitney). Grâce au travail de Thomas Grubb et Leonard Niedrach [13]. Les piles sont toujours employées dans les navettes américaines.

Dans l'industrie plusieurs applications industrielles ont vu le jour dont les plus connus

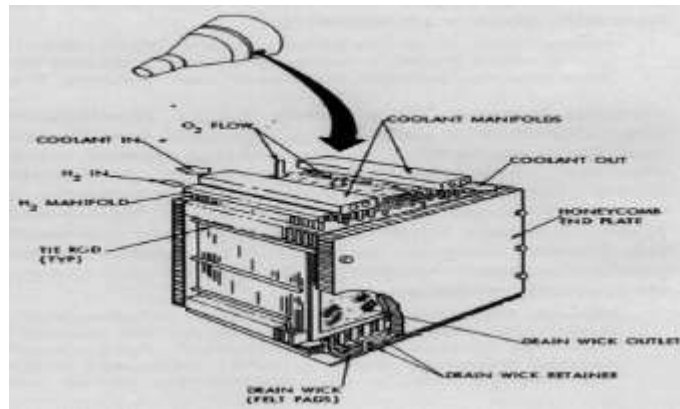


Figure 1.3: Pile à combustible du type PEM utilisée dans le programme Gemini [2]

sont :

- Aux États-Unis, Allis- Chalmers Manufacturing Company fabrique une pile alcaline de 15KW pour un tracteur électrique.
- Karl Kordesch, chez Union Carbide, crée une pile alcaline (AFC) de 6 Kw qui, associée à des batteries plomb/acide, dans le but d'alimenter un Austin A40 à propulsion électrique. Cette voiture, a une autonomie de 300 Km pour 2Kg d'hydrogène embarqué l'expérimentation à durer 3 ans en effectuant plus de 16 000 Km.

Après le choc pétrolier en 1972 la recherche sur les piles à combustible explosées et plus d'une trentaine de projets de recherche voit le jour aux Etats-Unis. La principale ligne de recherche porte sur le stockage ou la fabrication embarquée de l'hydrogène. Les recherches menées durant ces années seront essentielles et fondamentales et viseront à développer et améliorer les différents composants de la pile. En 1970, Du Pont met au point la membrane Nafion, qui sert d'électrolyte aux piles du type PEMFC. Malgré des avances considérables, la pile est onéreuse et peu fiable (durée de vie très faible) et trop volumineuse et lourde pour être insérée dans un véhicule. Pour ses différentes raisons, les travaux se ralentissent en France, seuls les travaux universitaires sont maintenus avec quelque vieille technologie. Heureusement, les Etats-Unis, le Japon et l'Allemagne poursuivent l'aventure de la pile à combustible, on assiste alors à une rupture entre les états unis et le Japon ou les activités de recherche dans le domaine de la pile explose encouragé par les différents gouvernements et l'Europe (sauf en Allemagne). Mais globalement cette activité est restée assez faible mondialement pendant les années 80. Seul point positif remarqué dans cette période la pile à commencer à être testée par les services

publics et les constructeurs automobiles. Quelques avancées techniques ont été quand même constatées avec le développement du premier véhicule muni d'une pile à combustible en 1993 par la société canadienne Ballard [14]. De nos jours, tous les constructeurs automobiles se sont lancés dans l'aventure de la pile à combustible, Mercedes-Benz a équipé 30 bus (ci taro) d'une pile à combustible (fabriquée par Ballard) d'une puissance de 205 KW les 30 bus sont répartis dans différentes villes européennes, Mercedes-Benz a aussi livré une cinquantaine de voiture NECAR en 2004. Tous les autres grands constructeurs se lancent dans l'aventure General Motors, BMW... Les premières stations à hydrogène gazeux ou liquide viennent également de voir le jour, en particulier en Allemagne en Islande et au Japon [14].

### **1.3 Description et Principes de fonctionnement de PAC**

Une pile à combustible est un dispositif électrochimique de conversion d'énergie qui permet de produire de l'électricité à partir d'une énergie chimique sans la présence d'aucun processus thermique ou mécanique (Figure 1.4). C'est un système qui ne produit pratiquement pas de bruits sonores, puisqu'il ne comporte pas de composantes mécaniques en mouvement, comme les turbines et les moteurs. L'électricité est produite grâce à une réaction chimique de combustible (hydrocarbures, alcools, biomasse, gaz naturel, hydrogène) avec comburant (oxygène de l'air). La réaction est du type électrochimique et génère de l'électricité et de la chaleur. L'électricité peut être utilisée pour alimenter différents dispositifs ou stocker et la chaleur peut être récupérée sans être gaspillée (chauffage...).

Une spécificité fondamentale des piles à combustible est que l'activité électrique de la pile détermine la consommation du combustible (hydrogène et d'oxygène). Les deux combustibles (gaz) sont fournis à l'anode (hydrogène) et la cathode (oxygène). La structure d'une pile à combustible comporte des arrivées de combustible des deux pôles de l'électrolyte. Les électrolytes peuvent se présenter sous formes liquides ou solides, fonctionnent à haute ou basse température. Un fonctionnement à basse température exige des catalyseurs en métal

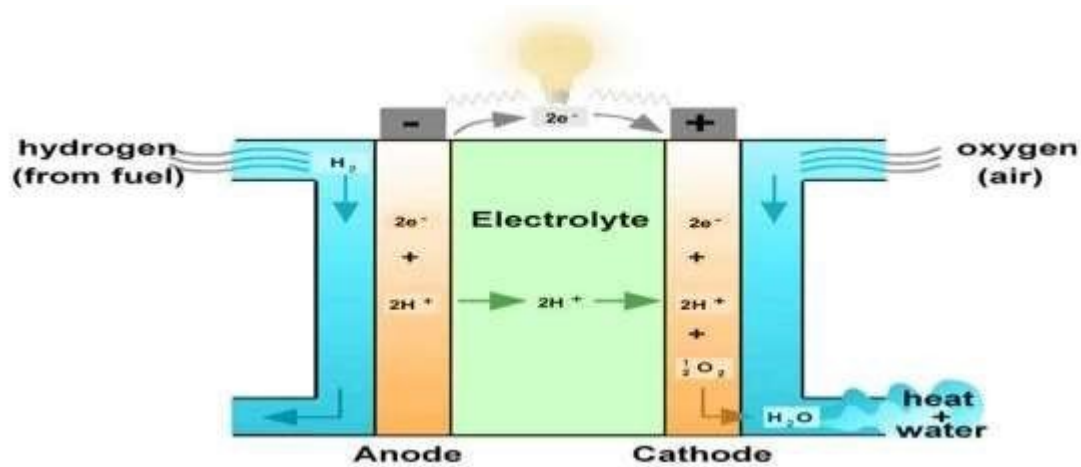
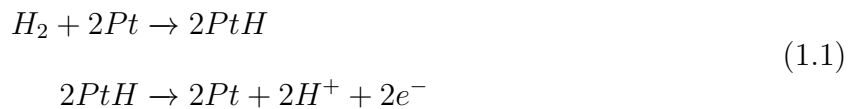


Figure 1.4: Principe de fonctionnement de la pile à combustible [3]

noble principalement du platine (le platine améliore les réactions aux électrodes). La plupart des piles à combustibles destinées aux applications automobiles emploient un électrolyte solide à basse température qui conduit des ions d'hydrogène.

L'oxydant et le réducteur sont progressivement consommés. La PAC, quant à elle, fonctionne continuellement tant qu'elle est alimentée. L'avantage de la pile à combustible est que comburant ainsi que le combustible sont stockés à l'extérieur de la pile. Le combustible le plus adéquat pour la pile est l'hydrogène (H<sub>2</sub>) et l'oxydant est l'oxygène (O<sub>2</sub>). Du côté de l'anode (pôle négatif), les molécules de l'hydrogène injectées (H<sub>2</sub>) réagissent avec le catalyseur en platine pour donner des protons (H<sup>+</sup>) et des électrons (e<sup>-</sup>) selon le système d'équations suivant [15] :



Les protons ainsi produits traversent la membrane échangeuse de protons (MEP), qui est un électrolyte solide, et migrent vers la cathode (pôle positif). Pendant ce temps, les électrons produits dans la réaction d'oxydation de l'hydrogène circulent à travers un circuit externe, créant ainsi un courant électrique. À la cathode, les protons et les électrons réagissent avec

l'oxygène (O<sub>2</sub>) pour former de l'eau (H<sub>2</sub>O) selon l'équation suivante :



Cette réaction produit de l'eau, qui est l'un des produits de décharge de la pile à combustible, et de la chaleur. La chaleur générée peut être récupérée pour des applications de chauffage ou d'autres besoins thermiques.

Ainsi, la pile à combustible convertit efficacement l'hydrogène en électricité, avec de l'eau comme produit résiduel, ce qui en fait une technologie propre et attrayante pour une variété d'applications, y compris les véhicules automobiles et les systèmes de production d'énergie.

Une cellule de pile à combustible, l'unité de base de cette technologie, génère une tension électrique relativement faible en réaction à la combinaison d'hydrogène et d'oxygène pour produire de l'eau et de l'électricité. Cette tension individuelle est insuffisante pour alimenter la plupart des applications pratiques, notamment les véhicules électriques et les systèmes de production d'énergie. Par conséquent, pour répondre aux besoins de puissance nécessaires dans ces applications, de multiples cellules de pile à combustible sont assemblées en série pour former ce que l'on appelle un *stack*.

## 1.4 Le Système de Pile à Combustible

Le système de pile à combustible est une configuration complexe qui inclut plusieurs composants essentiels. Le coeur du système est le stack de cellules de pile à combustible. Ces cellules sont généralement empilées en série, chaque cellule ajoutant sa tension à la précédente, pour augmenter la tension globale à un niveau pratique. Cependant, le stack seul ne suffit pas pour fournir une alimentation électrique stable et continue. Le système de pile à combustible comprend également des composants tels que des plaques bipolaires pour collecter le courant électrique et les fluides, des systèmes de contrôle de la température et d'humidification pour maintenir des conditions optimales de fonctionnement, des systèmes

d'alimentation en combustible (hydrogène) et en oxygène (ou air ambiant), des électroniques de puissance pour gérer la tension de sortie, des systèmes de gestion et de contrôle pour surveiller et réguler les paramètres clés, et des dispositifs d'évacuation de l'eau générée pendant la réaction électrochimique.

Ensemble, ces composants forment un système de pile à combustible complet capable de fournir une alimentation électrique fiable et propre pour une variété d'applications, allant des véhicules à hydrogène aux groupes électrogènes stationnaires. Le choix et la conception de ces composants dépendent des exigences spécifiques de chaque application, garantissant une intégration harmonieuse pour répondre aux besoins en énergie de manière efficace et durable.

## 1.5 Avantages et Inconvénients des Piles à Combustible PEMFC

Les piles à combustible de membrane échangeuse de protons (PEMFC) présentent un certain nombre d'avantages et d'inconvénients qui influencent leur utilisation dans diverses applications.

### 1.5.1 Avantages des PEMFC

- **Efficacité Énergétique** : Les PEMFC offrent une efficacité énergétique élevée, convertissant efficacement l'hydrogène en électricité sans émissions nocives.
- **Zéro Émission** : En utilisant l'hydrogène comme combustible, les PEMFC produisent de l'eau comme seul sous-produit, ce qui en fait une technologie propre et respectueuse de l'environnement.
- **Réduction des Gaz à Effet de Serre** : L'utilisation de l'hydrogène dans les PEMFC peut contribuer à la réduction des émissions de gaz à effet de serre, en particulier lorsqu'il est produit à partir de sources d'énergie renouvelable.

- **Répond aux Besoins de Mobilité :** Les PEMFC sont utilisées dans les véhicules à hydrogène en raison de leur densité énergétique élevée et de leur capacité à fournir une alimentation continue, ce qui les rend adaptées à la mobilité.
- **Démarrage Rapide :** Les PEMFC ont la capacité de démarrer rapidement, ce qui les rend appropriées pour les applications nécessitant une alimentation électrique instantanée.

### 1.5.2 Inconvénients des PEMFC

- **Coût Élevé :** Les PEMFC nécessitent des matériaux coûteux tels que le platine comme catalyseur, ce qui augmente le coût de production.
- **Stockage d'Hydrogène :** Le stockage et la distribution d'hydrogène, le combustible des PEMFC, posent des défis logistiques et de sécurité.
- **Durée de Vie Limitée :** Les PEMFC ont une durée de vie limitée, en particulier dans des conditions de fonctionnement exigeantes, ce qui nécessite un remplacement périodique.
- **Sensibilité à la Contamination :** Les PEMFC sont sensibles à la contamination par des impuretés, ce qui peut réduire leur efficacité.
- **Infrastructure de Ravitaillement :** L'absence d'une infrastructure de ravitaillement en hydrogène limite la disponibilité des PEMFC pour les applications de mobilité.

En conclusion, les PEMFC offrent des avantages significatifs en termes d'efficacité énergétique, de réduction des émissions et de mobilité, mais ils sont confrontés à des défis tels que leur coût élevé, la nécessité de développer une infrastructure d'hydrogène et des problèmes de durabilité. Leur adoption et leur déploiement à grande échelle dépendront de la résolution de ces défis.

## **1.6 Conclusion**

En résumé, ce chapitre nous a permis de retracer l’historique fascinant de la pile à combustible, depuis sa découverte initiale jusqu’à son développement actuel en tant que source d’énergie propre et prometteuse. Nous avons exploré les principes de base de son fonctionnement, mettant en lumière la réaction chimique à l’œuvre et les avantages écologiques qu’elle offre en produisant de l’électricité sans émissions nocives.

Cependant, comme toute technologie, les piles à combustible présentent également des inconvénients, notamment leur coût élevé, leur sensibilité à la contamination et la nécessité de développer une infrastructure d’hydrogène pour les rendre largement accessibles.

Ainsi, alors que nous clôturons ce chapitre en comprenant l’essentiel de l’histoire et du fonctionnement des piles à combustible, nous nous tournons désormais vers le chapitre suivant. Celui-ci nous plongera dans le monde complexe de la modélisation de la pile à combustible, notamment sa partie la plus saillante qui est son sous-système d’alimentation en air, où nous explorerons les équations mathématiques qui régissent son fonctionnement, avec des simulations qui nous permettront de mieux comprendre cette technologie innovante.

# Chapter 2

## Modélisation du système d'alimentation en air

### 2.1 Introduction

Ce chapitre plonge au coeur de la technologie des piles à combustible (PAC) en se penchant sur un aspect essentiel : la modélisation du système de pile à combustible, en mettant particulièrement l'accent sur le sous-système d'alimentation en air. La modélisation joue un rôle crucial dans la compréhension, l'optimisation et le contrôle des performances de ces systèmes énergétiques innovants. Le modèle proposé dans ce chapitre vise à simplifier la complexité du système tout en conservant les principaux éléments influents.

Le modèle simplifié présenté se compose de seulement 4 états, capturant les interactions essentielles au sein du système d'alimentation en air de la pile à combustible [16]. Ces états incluent la dynamique du moteur compresseur, la variation de pression dans le collecteur d'air, et les phénomènes au sein de la cathode. Cette simplification permet une compréhension plus claire et une analyse plus efficace du comportement du système. Cependant, pour une précision maximale, nous soulignons que des modèles plus complets comportant jusqu'à 9 états sont disponibles dans la littérature scientifique [17].

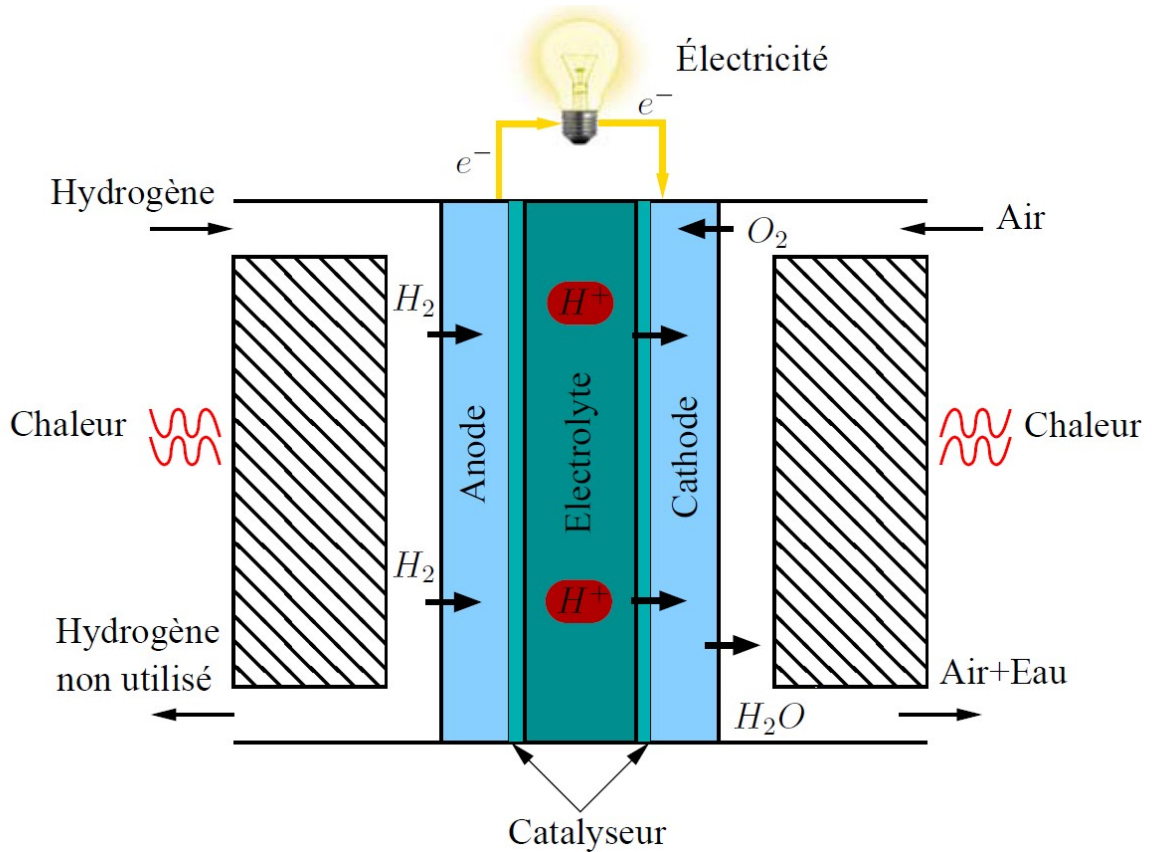


Figure 2.1: Réaction de la pile à combustible

Enfin, nous concluons ce chapitre par une comparaison finale par simulation avec un modèle plus complet à 9 états, plus connu dans la communauté scientifique. Cette comparaison nous permettra d'évaluer la précision du modèle simplifié utilisé par rapport à une représentation plus détaillée du système. En somme, ce chapitre jette les bases pour une compréhension approfondie de la modélisation des piles à combustible et de leur système d'alimentation en air, préparant ainsi le terrain pour la synthèse d'observateur pour l'observation et le diagnostic dans chapitre à venir.

### 2.1.1 Tension de pile PEMFC

La figure 2.1 illustre le fonctionnement d'une cellule de pile à combustible de type PEM, et le tableau 2.1 présente une comparaison des différentes technologies de pile à combustible. Afin de comprendre l'importance du système d'alimentation en air, regardons le mécanisme

Table 2.1: Résumé des caractéristiques typiques des piles à combustible[4]

Matériau de l'électrolyte	Température de fonctionnement	Utilisations prévues	Commentaires
PEMFC	80 °C	Stationnaire et automobile	Contamination minimale et problème matériel
AFC	Approx 100 °C	Programme spatial	Susceptible à la contamination, très coûteux
PAFC	Approx 100 °C	Stationnaire	Température plus élevée et échauffement plus long le temps rend impropre aux véhicules
SOFC	1000 °C	Stationnaire	Matériau de création à très haute température problèmes, vapeurgénération pourrait augmenter l'efficacité par la cogénération
MCFC	600 °C	Stationnaire	Identique à la SOFC

de génération de puissance de la PEMFC. Une courbe de polarisation PEMFC typique est montrée dans tension de la cellule est modélisée à partir de sa caractéristique statique, qui est une fonction du courant de cheminée, de la pression cathodique, des pressions partielles des réactifs, de la température de la pile à combustible et humidité de la membrane [6] :

$$V_{fc} = E - V_{act} - V_{ohm} - V_{conc} \quad (2.1)$$

La tension à vide  $E$  peut être calculée comme suit:

$$E = 1.229 - 0.85 \times 10^{-3} (T_{fc} - 298.15) + 4.3085 \times 10^{-5} T_{fc} \left[ \ln(p_{H_2}) + \frac{1}{2} \ln(p_{O_2}) \right] \quad \text{volts} \quad (2.2)$$

où  $T_{fc}$  est la température de la pile (en Kelvin),  $p_{H_2}$  et  $p_{O_2}$  sont les pressions partielles respectivement d'hydrogène et d'oxygène (en bar). On peut voir que le système d'alimentation en air contrôle indirectement la tension de sortie et donc la puissance, car il contrôle la pression d'oxygène dans la cathode.

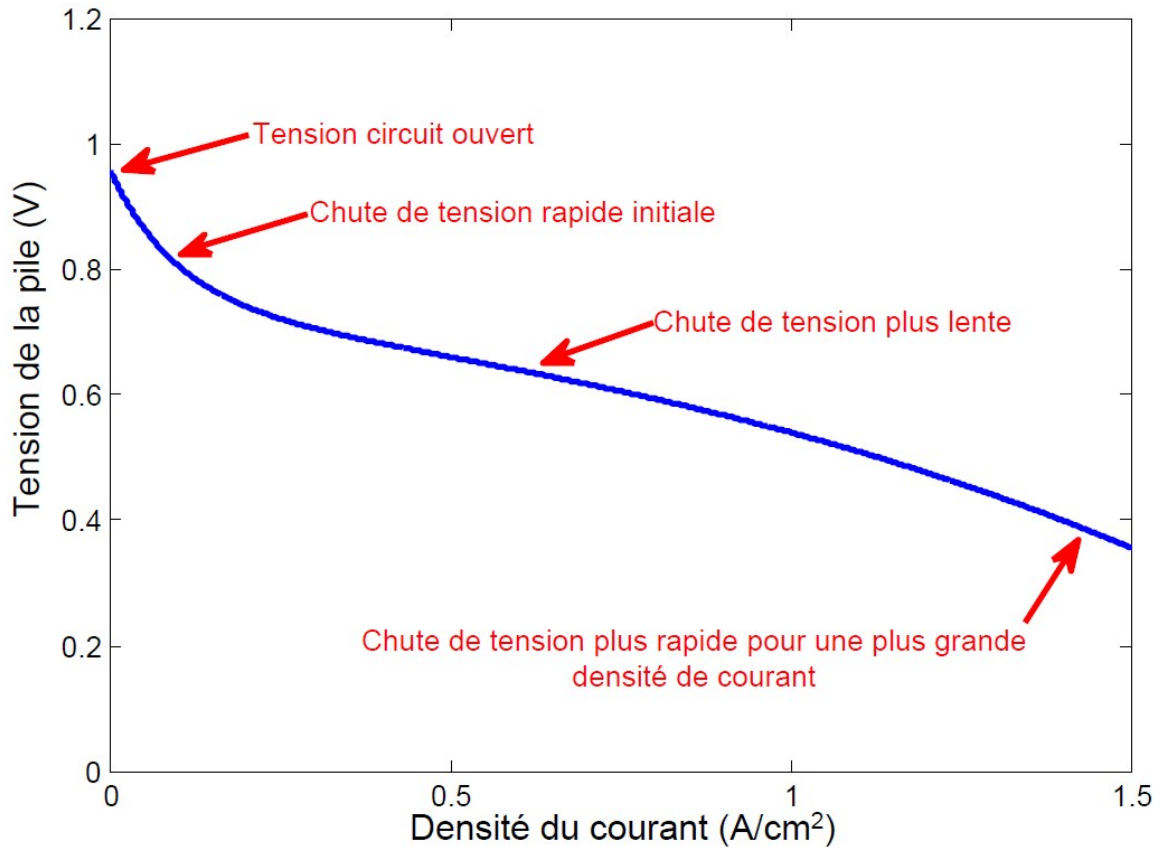


Figure 2.2: Tension typique de pile à combustible.

La densité de courant  $i$  est définie comme

$$i = I_{st}/A_{fc} \quad (2.3)$$

où  $I_{st}(A)$  est le courant de pile et  $A_{fc} (cm^2)$  est la surface active.

Lorsque la pile délivre un courant, trois chutes de tension ont lieu, dites aussi pertes, on parle généralement des pertes d'activation  $v_{act}$ , des pertes ohmiques  $v_{ohm}$  et les pertes de concentration  $v_{conc}$ , ils sont exprimées sous la forme suivante :

1.  $V_{act} = a \ln(\frac{i}{i_0})$  est due à la différence entre la vitesse des réactions dans l'anode et le cathode [18],  $a$  et  $i_0$  sont des constantes qui peuvent être déterminées empiriquement. Il est à noter que cette équation n'est valable que pour  $i > i_0$ . Par conséquent, un semblable fonction qui est valable pour toute la plage de  $i$  est préférée :  $V_{act} = V_0 +$

$V_a(1 - e^{-b_1 i})$ ,  $V_0$  (volt) est la chute de tension à densité de courant nulle, et  $V_a$  (volts) et  $b_1$  sont des constantes qui dépendent de la température et de la pression partielle d'oxygène [19, 20]. Les valeurs de  $V_0$ ,  $V_a$  et  $b_1$  peuvent être déterminés à partir d'une régression non linéaire des données expérimentales. La perte d'activation est illustrée à la Figure. 2.3(a).

2.  $V_{ohm} = iR_{ohm}$  est dû à la résistance électrique des électrodes et à la résistance au flux d'ions à travers l'électrolyte [18].  $R_{ohm}$  ( $\Omega.cm^2$ ) représente le carburant résistance électrique interne de la cellule. La perte ohmique est indiquée sur la Figure 2.3(b).
3.  $V_{conc} = i \left( b_3 \frac{i}{i_{max}} \right)^{b_4}$  résulte de la baisse de concentration des réactifs due à la consommation dans la réaction.  $b_3$ ,  $b_4$  et  $i_{max}$  sont des constantes qui dépendent de la température et les pressions partielles des réactifs.  $i_{max}$  est la densité de courant qui génère la chute de tension brutale. La perte de concentration est illustrée à la figure 2.3(c).

La tension du stack de la pile  $V_{st}$  est calculée comme la somme des tensions des cellules individuelles connectées en série.

$$V_{st} = nV_{fc} \quad (2.4)$$

où  $n$  est le nombre de cellules. Ainsi, la puissance de la pile à combustible est calculée comme :

$$P_{st} = I_{st}V_{st} \quad (2.5)$$

### 2.1.2 Modèle de système d'alimentation en air PEMFC

Il ressort clairement de la discussion ci-dessus que la production d'électricité à l'intérieur du noyau PEMFC dépend de plusieurs variables et facteurs, tels que les pressions d'oxygène et d'hydrogène, la température et divers paramètres physiques de la pile à combustible. Tout cela doit être contrôlé rigoureusement pour un fonctionnement correct et sûr de la pile à combustible. D'où un système PEMFC opérationnelle contient le cœur de la pile à

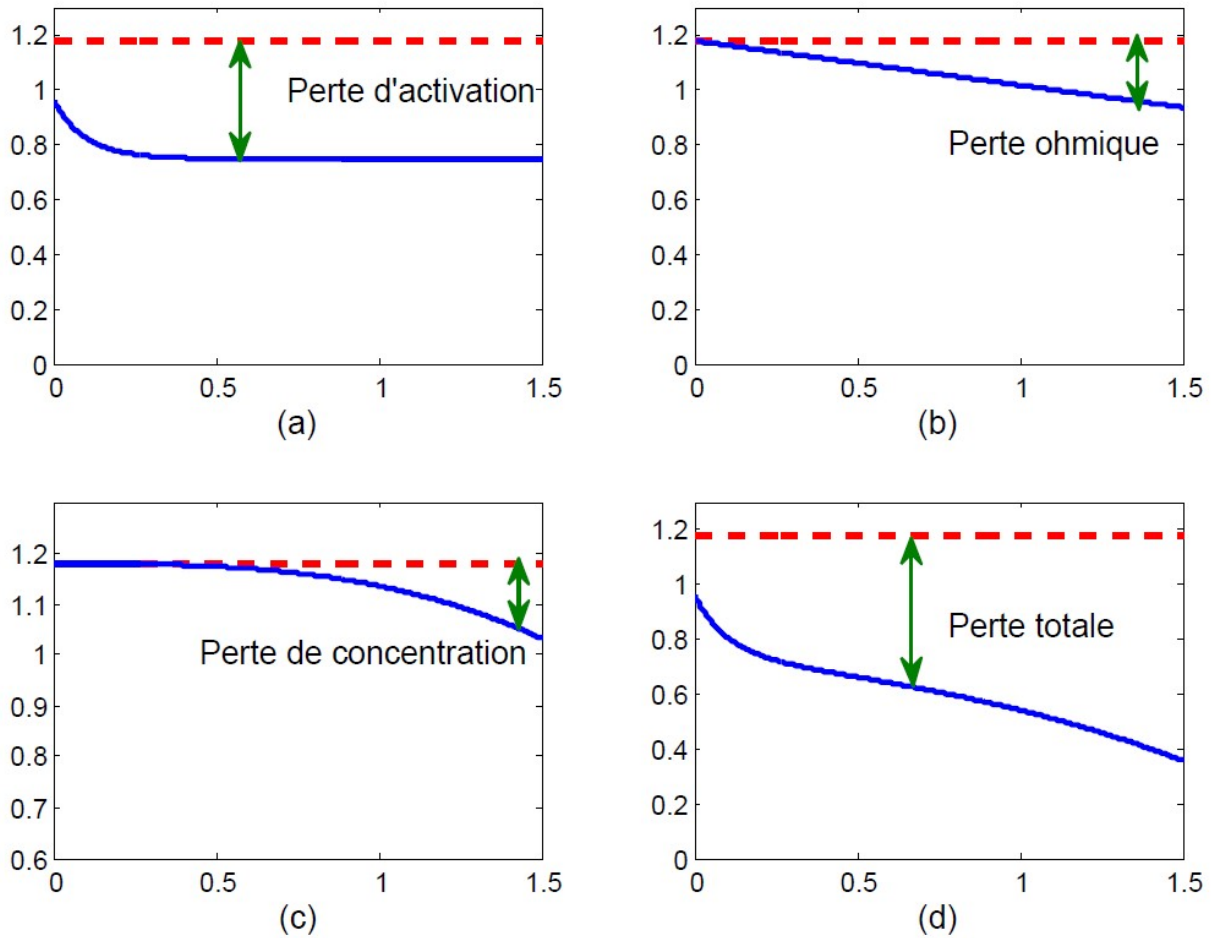


Figure 2.3: Chutes de tension dues à différents types

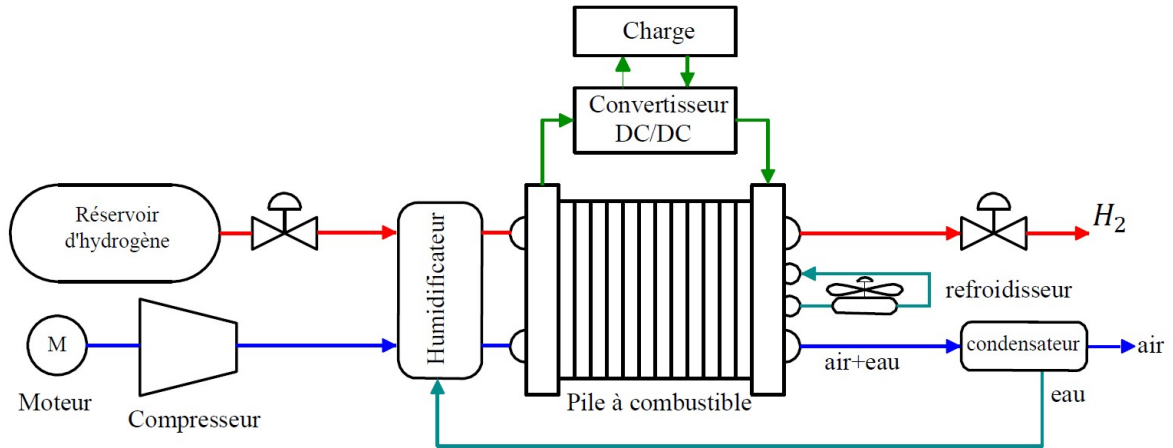


Figure 2.4: Schéma du système de la pile à combustible

combustible et un certain nombre de systèmes auxiliaires de contrôle. L'objectif du système d'alimentation en air est de réguler la quantité d'oxygène dans la cathode. Il se compose généralement d'un compresseur d'air électromécanique qui maintient la pression d'oxygène requise et le débit massique dans la cathode du PEMFC. Ce système peut consommer jusqu'à 30% de la puissance de la pile à combustible et nécessite un contrôle précis pour optimiser la puissance nette du système PEMFC. Ce système a été modélisé sous les hypothèses suivantes [16] :

- Tous les gaz obéissent à la loi des gaz parfaits ;
- La température de l'air à l'intérieur de la cathode est égale à la température de la pile, et aussi égale à la température du fluide caloporteur sortant de la pile. La température de la pile est bien contrôlée;
- Le réactif d'entrée est humidifié de manière homogène et rapide, et l'hydrogène comprimé à haute pression est disponible ;
- L'eau à l'intérieur de la cathode est uniquement à l'état de vapeur, et toute eau supplémentaire à l'état liquide est retirée des canaux ;
- L'inondation de la couche de diffusion du gaz est négligée ;

- Les variations spatiales sont négligées, on suppose que le canal d'écoulement et la couche de diffusion du gaz sont regroupés en un seul volume ;
- La pression de l'anode est bien contrôlée pour suivre la pression de la cathode.

### 2.1.2.1 Modèle du collecteur d'air

Pour le collecteur d'alimentation en air, celui-ci joue le rôle d'un petit réservoir d'air à court terme afin d'assurer une alimentation contrôlable en air de la pile. Les débits massiques d'entrée et de sortie sont le débit du compresseur  $W_{cp}$  et le débit du collecteur d'alimentation  $W_{sm,out}$  respectivement.

Le modèle de collecteur d'alimentation en air (dit en anglais Supply Manifold) est décrit par les équations suivantes :

$$\frac{dP_{sm}}{dt} = \frac{R_a T_{cp,out}}{V_{sm}} (W_{cp} - W_{sm,out}) \quad (2.6)$$

où  $V_{sm}$  est le volume du collecteur d'alimentation et  $T_{cp,out}$  est la température de l'air sortant du compresseur qui se calcule comme suit :

$$T_{cp,out} = T_{atm} + \frac{T_{atm}}{\eta_{cp}} \left[ \left( \frac{P_{sm}}{P_{atm}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right] \quad (2.7)$$

où  $\eta_{cp}$  est le rendement du compresseur (sa valeur maximale est de 80 %). La relation entre le débit et la perte de charge peut être simplifiée comme une buse linéaire équation puisque la différence de pression entre le collecteur d'alimentation  $P_{sm}$  et la cathode  $P_{ca}$  est petit

Le débit d'air sortant du collecteur est sujet à une exp non-linéaire faisant intervenir les pressions d'entrée et de sortie et la géométrie de l'orifice. Cependant, si la différence entre les deux pression est légère, le débit peut être approximé approximée comme suit:

$$W_{sm,out} = k_{sm,out} (P_{sm} - P_{ca}), \quad (2.8)$$

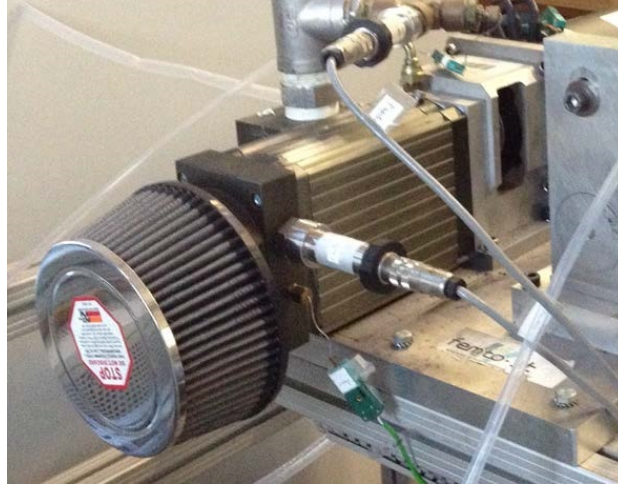


Figure 2.5: Compresseur à double vis

où  $k_{sm,out}$  est la constante de débit de sortie du collecteur d'alimentation.

### 2.1.2.2 Modèle de compresseur

Le système d'alimentation en air se compose d'un compresseur à double vis (Fig. 2.5) et d'un aimant permanent moteur synchrone (PMSM). Dans cette partie, le modèle du compresseur d'air est discuté, il est utilisé pour fournir de l'oxygène au côté cathode du système de pile à combustible. Les entrées du le modèle se compose de la pression d'air d'admission  $P_{cp,in}$ , de la température d'air d'admission  $T_{cp,in}$ , la pression en aval qui est la pression du collecteur d'alimentation  $P_{sm}$ . L'air d'admission est typiquement atmosphérique et sa pression et sa température sont supposé être  $P_{atm} = 1 \text{ atm}$  et  $T_{atm} = 25^\circ\text{C}$ , respectivement.

L'état dynamique dans le modèle, c'est-à-dire la vitesse du compresseur  $\omega_{cp}$ , est donné par la formule suivante équation

$$\frac{d\omega_{cp}}{dt} = \frac{1}{J_{cp}}(\tau_{cm} - \tau_{cp} - f\omega_{cp}), \quad (2.9)$$

où  $J_{cp}$  est l'inertie du moteur et du compresseur  $(kg.m)^2$ ,  $\tau_{cm}$  est le couple moteur  $(N.m)$ ,  $\tau_{cp}$

Table 2.2: Paramètres utilisés dans le modèle de compresseur

Symbole	Paramètre	Valeur
$\rho_a$	Densité de l'air	1.23 kg/m <sup>3</sup>
$K_t$	Constante du moteur	0.31 N m/A
$F$	Frottement du moteur	0.00136 V/(rad/s)
$J_{cp}$	Inertie du compresseur	671.9 × 10 <sup>-5</sup> kg m <sup>2</sup>
$H_{cp}$	Efficacité du compresseur	80%
$H_{cm}$	Rendement mécanique du moteur	98%
$V_{cpr} / t r$	Volume du compresseur par tour	5 × 10 <sup>-4</sup> m <sup>3</sup> /tr
$C_p$	Chaleur spécifique de l'air à pression constante	1004 J/(kg K)

est le couple de charge imposée par le compresseur ( $N.m$ ) et  $f$  est le coefficient de frottement.

$$\begin{aligned} \tau_{cm} &= \eta_{cm} k_t I_q \\ \tau_{cp} &= \frac{C_p}{\omega_{cp}} \frac{T_{atm}}{\eta_{cp}} \left[ \left( \frac{p_{sm}}{p_{atm}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right] W_{cp} \end{aligned} \quad (2.10)$$

où  $\eta_{cm}$  est le rendement mécanique du moteur,  $k_t$  est la constante du moteur,  $I_q$  est le courant quadratique du moteur,  $C_p$  est la capacité thermique massique de l'air (1004.J.Kg-1.K-1),  $\gamma$  est le rapport des chaleurs spécifiques de l'air (égale à 1.4) et  $W_{cp}$  est le débit massique du compresseur.

Le débit massique du compresseur double vis  $W_{cp}$  dépend de sa vitesse angulaire  $\omega_{cp}$  [21]. Sa relation est donné comme

$$W_{cp} = \frac{1}{2\pi} \eta_{v-c} V_{cpr/tr} \rho_a \omega_{cp} \quad (2.11)$$

Où  $\eta_{v-c}$  est le rendement volumétrique  $V_{cpr/tr}$  est le volume comprimé par tour et  $\rho_a$  est la densité de l'air. Les paramètres utilisés dans le modèle de compresseur sont donnés dans le tableau 2.2. La puissance du moteur du compresseur  $P_{cp}$  est calculée comme suit:

$$P_{cp} = \tau_{cm} \omega_{cp} \quad (2.12)$$

### 2.1.2.3 Modèle d'écoulement cathodique

Les propriétés thermodynamiques et la conservation de la masse sont utilisées pour modéliser le comportement de l'air à l'intérieur de la cathode [6]. Compte tenu de la continuité de masse de l'oxygène et de l'azote à l'intérieur du volume cathodique et rendement de la loi des gaz parfaits

$$\begin{aligned}\dot{p}_{O_2} &= \frac{RT_{fc}}{M_{O_2}V_{ca}}(W_{O_2,in} - W_{O_2,out} - W_{O_2,react}), \\ \dot{p}_{N_2} &= \frac{RT_{fc}}{M_{N_2}V_{ca}}(W_{N_2,in} - W_{N_2,out}),\end{aligned}\tag{2.13}$$

Où:

$W_{O_2,in}$  est le débit massique d'oxygène entrant dans la cathode;

$W_{O_2,out}$  est le débit massique d'oxygène sortant de la cathode ;

$W_{O_2,react}$  est le taux d'oxygène ayant réagi;

$W_{N_2,in}$  est le débit massique d'azote entrant dans la cathode ;

$W_{N_2,out}$  est le débit massique d'azote sortant de la cathode ;

$M_{O_2}$  est la masse molaire de l'oxygène ;

$M_{N_2}$  est la masse molaire de l'azote ;

$V_{ca}$  est le volume cathodique.

Les débits massiques d'entrée d'oxygène  $W_{O_2,in}$  et d'azote  $W_{N_2,in}$  sont calculés à partir du débit cathodique d'entrée  $W_{ca,in}$

$$\begin{aligned}W_{O_2,in} &= \frac{x_{O_2,atm}}{1 + W_{atm}}W_{ca,in} \\ W_{N_2,in} &= \frac{1 - x_{O_2,atm}}{1 + W_{atm}}W_{ca,in}\end{aligned}\tag{2.14}$$

où  $x_{O_2,atm}$  est la fraction massique d'oxygène de l'air d'admission.

$$x_{O_2,atm} = \frac{M_v}{y_{O_2,atm}M_{O_2} + (1 - y_{O_2,atm})M_{N_2}}\tag{2.15}$$

avec le rapport molaire d'oxygène  $y_{O_2,atm} = 0,21$  pour l'air d'admission et le rapport d'humidité

de l'air d'admission  $\omega_{atm}$  est défini comme

$$\omega_{atm} = \frac{M_v}{y_{O_2,atm}M_{O_2} + (1 - y_{O_2,atm})M_{N_2}} \frac{p_v}{p_{atm} - p_v} \quad (2.16)$$

où  $M_v$  est la masse molaire de vapeur et  $p_v$  est la pression de vapeur.

La pression partielle de la vapeur  $p_v$  est déterminée par l'expression:

$$p_v = \phi_{atm} p_{sat}(T_{fc}), \quad (2.17)$$

où  $\phi_{atm}$  est l'humidité relative aux conditions ambiantes (sa valeur est fixée à 0,5), qui peut être utilisé pour décrire la relation entre la pression partielle de vapeur et pression de saturation.

$p_{sat}(T_{fc})$  est la pression de saturation de la vapeur.  $p_{sat}$  dépend de la température et est calculée à partir de l'équation donnée dans [22]

$$\log_{10}(P_{sat}) = -1.69 \times 10^{-10}T_{fc}^4 + 3.85 \times 10^{-17}T_{fc}^3 - 3.39 \times 10^{-4}T_{fc}^2 + 0.143T_{fc} - 20.92 \quad (2.18)$$

Où la pression de saturation  $p_{sat}$  est en kPa et la température  $T_{fc}$  est en Kelvin.

Le débit d'entrée de cathode  $W_{ca,in}$  est supposé être le même que la sortie du collecteur d'alimentation  $W_{sm,out}$  donnée à l'équation (2,8)

$$W_{ca,in} = k_{ca,in}(p_{sm} - p_{ca}), \quad (2.19)$$

où la pression cathodique  $p_{ca}$  est supposée invariante spatialement, elle équivaut à la somme de la pressions partielles d'oxygène plus celle d'azote et de la vapeur

$$p_{ca} = p_{O_2} + p_{N_2} + p_{sat}(T_{fc}) \quad (2.20)$$

Les équations suivantes sont utilisées pour calculer le débit massique d'oxygène et d'azote

quittant la cathode  $W_{O_2,out}$  et l'azote  $W_{N_2,out}$  dans (2.13)

$$\begin{aligned} W_{O_2,out} &= \frac{x_{O_2,ca}}{1 + W_{ca,out}} W_{ca,out} \\ W_{N_2,out} &= \frac{1 - x_{O_2,ca}}{1 + W_{ca,out}} W_{ca,out} \end{aligned} \quad (2.21)$$

où  $x_{O_2,ca}$ ,  $\omega_{ca,out}$  sont respectivement la fraction massique d'oxygène et le taux d'humidité à l'intérieur de la cathode.

$$\begin{aligned} x_{O_2,ca} &= \frac{y_{O_2,ca} M_{O_2}}{y_{O_2,ca} M_{O_2} + (1 - y_{O_2,ca}) M_{N_2}} \\ \omega_{ca,out} &= \frac{M_v}{y_{O_2,ca} M_{O_2} + (1 - y_{O_2,ca}) M_{N_2}} \frac{p_{sat}}{p_{O_2} + p_{N_2}} \end{aligned} \quad (2.22)$$

Contrairement au débit d'entrée, la fraction molaire d'oxygène du débit de sortie cathodique  $y_{O_2,ca}$  n'est pas constante puisque l'oxygène réagit. Elle est calculé par

$$y_{O_2,ca} = \frac{p_{O_2}}{p_{O_2} + p_{N_2}} \quad (2.23)$$

En utilisant (2.22, 2.23), l'éq. (2.21) peut être réécrit comme

$$\begin{aligned} W_{O_2,out} &= \frac{M_{O_2} p_{O_2}}{M_{O_2} p_{O_2} + M_{N_2} p_{N_2} + M_v p_{sat}} W_{ca,out} \\ W_{N_2,out} &= \frac{M_{N_2} p_{N_2}}{M_{O_2} p_{O_2} + M_{N_2} p_{N_2} + M_v p_{sat}} W_{ca,out} \end{aligned} \quad (2.24)$$

Le débit total de sortie de cathode  $W_{ca,out}$  est calculé par l'équation d'écoulement donnée dans [17]. Le taux de consommation d'oxygène  $W_{O_2,react}$  est fonction du courant de charge  $I_{st}$ , qui est calculé en utilisant les principes électrochimiques

$$W_{O_2,react} = M_{O_2} \frac{n I_{st}}{4F} \quad (2.25)$$

où  $F$  est le nombre de Faraday

### 2.1.2.4 Modèle dynamique à quatre états

Au vu des Éqs. (2.6, 2.9, 2.13), la dynamique de la partie cathodique de la pile à combustible est régit par les quatre états suivants [16]

$$x = [p_{O_2} \quad p_{N_2} \quad p_{sm} \quad \omega_{cp}]^T \quad (2.26)$$

Le modèle dynamique à quatre états se résume comme suit

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= c_1 (x_3 - x_1 - x_2 - c_2) - \frac{c_3 x_1 W_{ca, out}}{c_4 x_1 + c_5 x_2 + c_6} - c_7 I_{st}, \\ \dot{x}_2 &= c_8 (x_3 - x_1 - x_2 - c_2) - \frac{c_3 x_2 W_{ca, out}}{c_4 x_1 + c_5 x_2 + c_6}, \\ \dot{x}_3 &= c_{14} \left[ 1 + c_{15} \left[ \left( \frac{x_3}{c_{11}} \right)^{c_{12}} - 1 \right] \right] \times [W_{cp} - c_{16} (x_3 - x_1 - x_2 - c_2)] \\ \dot{x}_4 &= -c_9 x_4 - \frac{c_{10}}{x_4} \left[ \left( \frac{x_3}{c_{11}} \right)^{c_{12}} - 1 \right] W_{cp} + c_{13} u, \end{aligned} \quad (2.27)$$

Le courant de pile  $I_{st}$  est traditionnellement considéré comme une perturbation et l'entrée de commande  $u$  est le courant quadratique du moteur. Les sorties mesurées du système sont

$$y = [W_{cp} \quad T_{cp} \quad psm \quad W_{ca, out} \quad I_{st} \quad V_{st}]^T \quad (2.28)$$

Nous définissons aussi les variables de performance du système comme

$$z = [z1 \quad z2]^T = [P_{net} \quad \lambda_{O_2}]^T \quad (2.29)$$

où  $P_{net}$  est la puissance nette de la pile à combustible et  $\lambda_{O_2}$  est le rapport d'excès d'oxygène. La puissance nette de la pile à combustible  $P_{net}$  est la différence entre la puissance brute  $P_{st}$  produite par le stack et la puissance consommée par le compresseur. Ainsi, la puissance nette peut être exprimée par :

$$P_{net} = P_{st} - P_{cp} \quad (2.30)$$

où la puissance de la pile  $P_{st}$  et la puissance du compresseur  $P_{cp}$  sont données dans les équations. (2.5, 2.12) Le taux d'excès d'oxygène  $\lambda_{O_2}$  est défini comme le rapport entre l'oxygène entrant dans la cathode  $W_{O_2,in}$  et l'oxygène réagissant dans la pile à combustible  $W_{O_2,react}$

$$\lambda_{O_2} = \frac{W_{O_2,in}}{W_{O_2,react}} = \frac{c_{18}(p_{sm} - p_{ca})}{c_{19}I_{st}} \quad (2.31)$$

Pour des raisons de sécurité et d'optimisation du rendement, il est typique de faire fonctionner la pile avec une valeur de  $\lambda_{O_2}$  autour de 2 quelque soit le point du fonctionnement défini par la demande de courant [6] Il faut noter qu'une valeur de  $\lambda_{O_2}$  au-dessus de 2 implique une efficacité inférieure, car l'excès d'oxygène fourni dans la cathode provoquera un gaspillage d'énergie du compresseur, et une valeur inférieur à 2 conduit au phénomène d'appauvrissement en oxygène (connu par le terme anglophone "starvation").

La définition des paramètres du système  $c_1, \dots, c_{18}$  en fonction des paramètres physiques ainsi que les valeurs utilisées pour ceux-ci sont illustrés à l'équation (2.32) et le tableau 2.3.

CONSTANTES DU MODÈLE DE PILE À COMBUSTIBLE ;

$$\begin{aligned} c_1 &= \frac{RT_{fc}k_{ca,in}}{M_{O_2}V_{ca}} \left( \frac{x_{O_2,atm}}{1+\omega_{ca,in}} \right); & c_2 &= p_{sat}; \\ c_3 &= \frac{RT_{fc}}{V_{ca}} & c_4 &= M_{O_2} \\ c_5 &= M_{N_2} & c_6 &= M_v p_{sat} \\ c_7 &= \frac{nRT_{fc}}{4FV_{ca}} & c_8 &= \frac{RT_{fc}k_{ca,in}}{M_{N_2}V_{ca}} \left( \frac{1-x_{O_2,atm}}{1+\omega_{atm}} \right); \\ c_9 &= \frac{f}{J_{cp}} & c_{10} &= \frac{C_p T_{atm}}{J_{cp} \eta_{cp}} \\ c_{11} &= p_{atm}; & c_{12} &= \frac{\gamma-1}{\gamma} \\ c_{13} &= \frac{\eta_{cm} k_t}{J_{cp}}; & c_{14} &= \frac{RT_{atm}}{M_a V_{sm}}; \\ c_{15} &= \frac{1}{\eta_{cp}} & c_{16} &= k_{ca,in}; \\ c_{17} &= \frac{1}{2\pi} \eta_{v-c} V_{cpr/tr} \rho_a; & c_{18} &= k_{ca, in} \frac{x_{O_2,atm}}{1+\omega_{ca, in}} \\ c_{19} &= \frac{nM_{O_2}}{4F}. \end{aligned} \quad (2.32)$$

Table 2.3: Paramètres physiques de la pile utilisée dans la simulation

Symbole	Paramètre	Valeur
$n$	Nombre de cellules dans la pile à combustible	90
$R$	Constante universelle des gaz	8.314 J/(molK)
$R_a$	Constante des gaz de l'air	286.9 J/(kgK)
$p_{atm}$	Pression atmosphérique	$1.01325 \times 10^5$ Pa
$T_{atm}$	Température atmosphérique	298.15 K
$A_{fc}$	Surface active	800 cm <sup>2</sup>
$F$	Constante de Faraday	96485C/mol
$M_a$	Masse molaire de l'air	$28.9644 \times 10^{-3}$ kg/mol
$M_{O_2}$	Masse molaire de l'oxygène	$32 \times 10^{-3}$ kg/mol
$M_{N_2}$	Masse molaire de l'azote	$28 \times 10^{-3}$ kg/mol
$M_{H_2}$	Masse molaire de l'hydrogène	$2 \times 10^{-3}$ kg/mol
$M_v$	Masse molaire de la vapeur	$18.02 \times 10^{-3}$ kg/mol
$C_D$	Débit de la buse	0.0038
$A_T$	Surface de fonctionnement de la buse	0.00138 m <sup>2</sup>
$\gamma$	Rapport des chaleurs spécifiques de l'air	1.4
$J_{cp}$	Inertie du compresseur	6719mg · m <sup>2</sup>
$f$	Frottement du moteur	1.36mV/(rad/s)
$k_t$	Constante du moteur	0.31 N m/A
$C_p$	Chaleur spécifique de l'air	1004 J/(Kg · K)
$\eta_{cm}$	Efficacité mécanique du moteur	98%
$V_{ca}$	Volume de la cathode	0.0015 m <sup>3</sup>
$V_{sm}$	Volume du collecteur d'admission	0.003 m <sup>3</sup>
$V_{an}$	Volume de l'anode	0.0005 m
$V_{cpr}/tr$	Volume du compresseur par tour	$5 \cdot 10^{-4}$ m <sup>3</sup> /tr
$k_{ca,in}$	Constante de l'orifice d'entrée de la cathode	$0.3629 \times 10^{-5}$ kg/(Pas)
$k_{an,in}$	Constante de l'orifice d'entrée de l'anode	$0.21 \times 10^{-5}$ kg/(Pas)
$\rho_a$	Densité de l'air	1.23 kg/m <sup>3</sup>
$x_{O_2,ca,in}$	Fraction molaire d'oxygène	0.23

### 2.1.2.5 Comparaison du modèle 4e ordre par avec le modèle de Pukrushpan de 9e ordre

## 2.2 Validation du Modèle

La validation du modèle s'effectue par le biais de comparaisons de simulation entre le modèle à 4 états développé dans ce chapitre, et le modèle à 9 états initialement développé [17]. Les paramètres utilisés dans le modèle à quatre états sont résumés dans le Tableau ???. La réponse dynamique des variables de performance, qui sont la tension de la pile  $v_{st}$ , la puissance de la pile et la puissance nette,  $P_{st}$  et  $P_{net}$ , ainsi que le rapport d'excès d'oxygène  $\lambda_{O_2}$ , est comparée.

Pour démontrer les caractéristiques du modèle de pile à combustible, une série de changements dans la charge de la pile (courant de stack) et la tension d'entrée du moteur du compresseur sont appliqués à la pile, comme le montre la Figure 2.6. Au cours des quatre premières étapes, la tension du compresseur est contrôlée de manière à maintenir le rapport d'excès d'oxygène à 2 en utilisant un régulateur statique à action anticipatrice simple. Les étapes restantes sont ensuite appliquées de manière indépendante, ce qui donne lieu à différents niveaux de rapports d'excès d'oxygène. Les mêmes courants et entrées d'actionneurs sont également appliqués au modèle à neuf états.

Lors d'une étape de charge positive, le rapport d'excès d'oxygène diminue en raison de l'épuisement de l'oxygène, ce qui est en corrélation avec la baisse de la tension de la pile. L'étape à  $t = 18$  secondes montre la réponse due à une augmentation de la tension d'entrée du compresseur tout en maintenant le courant de la pile constant. Le scénario inverse est montré à  $t = 22$  secondes. La réponse entre la 18e et la 22e seconde montre que même si la tension de la pile  $v_{st}$  et la puissance  $P_{st}$  augmentent, la puissance nette  $P_{net} = P_{st} - P_{cm}$  diminue en réalité en raison de l'augmentation des pertes parasites ( $P_{cm}$ ).

La comparaison montre que les équations développées dans ce chapitre capturent la dynamique de la tension et des caractéristiques de lorsque l'humidité et la température sont

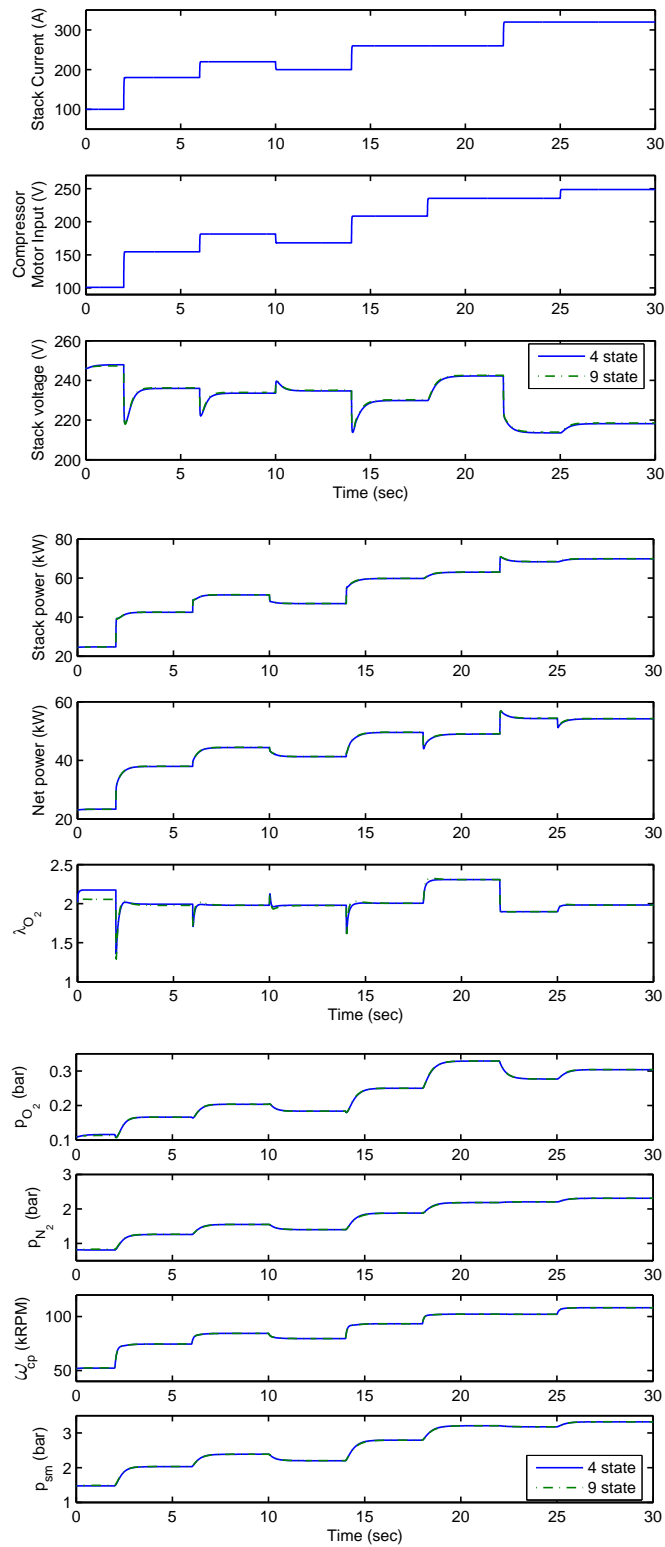


Figure 2.6: Validation par simulation du modèle à 4 états

bien contrôlées. Les hypothèses de ce travail éliminent les états du modèle de référence [17], qui sont le collecteur de retour ( $P_{rm}$ ), les pressions (ou masses) d'hydrogène et de vapeur ( $m_{H_2}$ ,  $m_{w,an}$  et  $m_{w,ca}$ ), ainsi que la masse du collecteur d'alimentation ( $m_{sm}$ ). Cependant, toutes les variables de performance et les états restants dans (2.26) correspondent bien au modèle à neuf états d'origine.

Plusieurs autres dérivés du modèle de pile à combustible orienté vers la commande peuvent être trouvés dans la littérature. Le plus simple est un modèle à deux états [23, 24], où un état dynamique est la pression cathodique utilisée pour le calcul de la tension de la pile, et l'autre est la dynamique du compresseur. Ce modèle à deux états est adéquat pour modéliser la puissance de la pile et les pertes parasites, et est donc utilisé pour les systèmes de gestion de puissance des véhicules. Cependant, l'inconvénient du modèle à deux états est que les dynamiques à l'intérieur du système de pile à combustible, par exemple, le rapport d'excès d'oxygène, ne peuvent pas être capturées. L'absence d'un modèle de compresseur dans un autre modèle simplifié [25] le rend incapable de décrire les pertes de puissance auxiliaires. Enfin, un autre modèle à quatre états dans [26] ne fait pas de distinction entre les espèces d'oxygène et d'azote ; ainsi, la dynamique du rapport d'excès d'oxygène ne peut pas être capturée.

### 2.2.1 Conclusion

Ce chapitre a plongé au coeur de la modélisation du système de pile à combustible (PEMFC) en mettant particulièrement l'accent sur son sous-système d'alimentation en air. Nous avons simplifié la complexité des phénomènes en présentant un modèle à 4 états tout en soulignant l'existence de modèles plus complets à 9 états disponibles dans la littérature scientifique.

La modélisation est un outil essentiel pour comprendre, optimiser et contrôler les performances des PAC. Le modèle simplifié présenté permet de capturer les interactions clés entre le moteur compresseur, le collecteur d'air et la cathode, offrant ainsi une vision claire du fonctionnement du système d'alimentation en air.

Au cours de ce chapitre, nous avons exploré les équations mathématiques et les concepts fondamentaux sous-tendant notre modèle, mettant en lumière les réponses dynamiques du moteur compresseur aux besoins de la pile à combustible, la régulation du rapport d'excès d'oxygène et l'impact de la cathode sur la performance globale.

Enfin, nous avons conduit une comparaison par simulation avec un modèle plus complet à 9 états pour évaluer la précision du modèle simplifié. Cette comparaison nous a permis de déterminer les limites et la pertinence de chaque modèle.

En somme, ce chapitre a constitué un premier pas crucial vers la modélisation et la compréhension des PAC, ouvrant la voie à une exploration plus approfondie des phénomènes électrochimiques et fluidiques qui sous-tendent ces systèmes énergétiques novateurs. Dans le chapitre suivant, nous approfondirons notre compréhension et aborderons un sujet clés qu'est la détection de défauts et l'optimisation des performances pour contribuer au développement continu de cette technologie prometteuse.

# Chapter 3

## Diagnostic des défauts du collecteur d'air basée sur l'observation par mode glissant

### 3.1 Introduction

Dans le domaine des piles à combustible à membrane échangeuse de protons (PEMFC), le diagnostic des défauts revêt une importance cruciale pour maintenir leur performance et leur fiabilité. Parmi les défauts potentiels, les fuites dans le collecteur d'air constituent un problème majeur. Ces fuites peuvent compromettre le fonctionnement optimal de la PEMFC en provoquant des perturbations dans la distribution de l'air nécessaire à la réaction électrochimique.

Ce chapitre se concentre spécifiquement sur la détection et le diagnostic des fuites dans le collecteur d'air des PEMFC en utilisant des observateurs avancés. Une approche robuste de diagnostic basée sur un algorithme de mode glissant ST modifié est étudiée pour une classe de systèmes non linéaires incertains. L'algorithme de mode glissant ST modifié, qui comprend deux termes non linéaires et deux termes linéaires, est utilisé pour estimer les

états du système et reconstruire simultanément le signal de panne, en mettant l'accent sur le défaut de fuite dans le collecteur d'air. Ensuite, le signal de panne est reconstruit à partir du terme d'injection d'erreur de sortie équivalent calculé en ligne à partir des sorties du modèle du système et de l'observateur.

## 3.2 Super Twisting modifié pour la détection et l'isolation des défauts

Considérons un système non linéaire, comportant une partie linéaire, et une partie non-linéaire, et sujette à un défaut  $f(t)$  :

$$\begin{aligned} \dot{z} &= Az + g(z, u) + D(y, u)f(t), \\ y &= Cz, \end{aligned} \tag{3.1}$$

où  $z = [z_1 \ z_2]^T \in \mathbb{R}^n$ ,  $z_1 \in \mathbb{R}^p$ ,  $z_2 \in \mathbb{R}^{n-p}$ , est le vecteur d'état du système,  $u(t) \in \mathcal{U} \subset \mathbb{R}^m$  est l'entrée du système supposée connue,  $y \in \mathcal{Y} \subset \mathbb{R}^p$  est le vecteur de mesure. La matrice d'état  $A$  est défini comme suit

$$A = \begin{bmatrix} A_1^{p \times p} & A_2^{p \times (n-p)} \\ A_3^{(n-p) \times p} & A_4^{(n-p) \times (n-p)} \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{n \times n}$$

Dans laquelle  $A_4$  est Hurwitz stable.

La matrice  $C \in \mathbb{R}^{p \times n}$  est constante et de plein rang ( $q \leq p < n$ ). La fonction non linéaire connue  $g(z, u) \in \mathbb{R}^n$  est Lipschitz par rapport à  $z$  uniformément pour  $u \in \mathcal{U}$ .

$D(y, u) \in \mathbb{R}^{n \times q}$  est supposée être une fonction bornée dépendant des entrées et sorties du système. Le vecteur de signal de faute lisse  $f(t) \in \mathbb{R}^q$  satisfait

$$\|f(t)\| \leq \rho_1, \quad \|\dot{f}(t)\| \leq \rho_2, \tag{3.2}$$

où les constantes positives  $\rho_1$  et  $\rho_2$  sont connues.

En réordonnant les variables d'état, (3.1) peut être réécrite comme

$$\begin{aligned}\dot{z}_1 &= A_1 z_1 + A_2 z_2 + g_1(z, u) + D_1(y, u)f(t), \\ \dot{z}_2 &= A_3 z_1 + A_4 z_2 + g_2(z, u), \\ y &= z_1,\end{aligned}\tag{3.3}$$

où  $g(z, u) = \begin{bmatrix} g_1(z, u) \\ g_2(z, u) \end{bmatrix}$ ,  $D(y, u) = \begin{bmatrix} D_1(y, u) \\ 0 \end{bmatrix}$  et  $D(y, u)_1$  est une matrice bornée non singulière dans  $(y, u) \in \mathcal{Y} \times \mathcal{U}$ .

**Hypothèse 1.** Les termes non linéaires connus  $g_1(z, u)$  et  $g_2(z, u)$  sont Lipschitz continus par rapport à  $z_2$ , c'est-à-dire

$$\|g_i(z_1, z_2, u) - g_i(z_1, \hat{z}_2, u)\| \leq \gamma_i \|z_2 - \hat{z}_2\|,\tag{3.4}$$

où  $\gamma_i, i \in \{1, 2\}$  sont des constantes positives connues [27].

Considérons le système (3.3), un SMO ST est conçu comme suit :

$$\begin{aligned}\dot{\hat{z}}_1 &= A_1 y + A_2 \hat{z}_2 + g_1(\hat{z}, u) + v(y - \hat{y}), \\ \dot{\hat{z}}_2 &= A_3 y + A_4 \hat{z}_2 + g_2(\hat{z}, u), \\ \hat{y} &= \hat{z}_1,\end{aligned}\tag{3.5}$$

où  $v(\cdot)$  est le terme d'injection d'erreur de sortie généré par l'algorithme ST modifié [28] :

$$v(s) = \underbrace{k_1 |s|^{\frac{1}{2}} \text{sign}(s) + k_2 \int_0^t \text{sign}(s) d\tau}_{\text{Super-Twisting Classique}} + \underbrace{k_3 s + k_4 \int_0^t s d\tau}_{\text{Injection linéaire de type PI}},\tag{3.6}$$

où  $k_i, i \in \{1, 2, 3, 4\}$  sont des constantes positives à déterminer.

Désignons  $e_y = y - \hat{y}$  et  $e_2 = z_2 - \hat{z}_2$ , soustrayons (3.5) de (3.3), le système dynamique d'erreur est donné par :

$$\begin{aligned}\dot{e}_y &= -v(e_y) + A_2 e_2 + \Delta g_1 + D_1(y, u) f(t), \\ \dot{e}_2 &= A_4 e_2 + \Delta g_2,\end{aligned}\tag{3.7}$$

où  $\Delta g_1 = g_1(z, u) - g_1(\hat{z}, u)$  et  $\Delta g_2 = g_2(z, u) - g_2(\hat{z}, u)$ .

**Proposition 1.** *Supposons que l'Hypothèse 1 est vérifiée, le système dynamique d'erreur (3.7) est exponentiellement stable s'il existe une matrice définie positive  $\Psi$ , qui satisfait l'inégalité suivante:*

$$A_4^T \Psi + \Psi A_4 + \frac{1}{\varepsilon} \Psi \Psi^T + \varepsilon \gamma_2^2 I_{n-p} + \sigma I_{n-p} < 0,\tag{3.8}$$

où  $\varepsilon$  et  $\sigma$  sont deux petites constantes positives.

*Preuve.* Considérons une fonction candidate de Lyapunov  $W = e_2^T \Psi e_2$ , sa première dérivée temporelle est calculée comme suit :

$$\begin{aligned}\dot{W} &= e_2^T (A_4^T \Psi + \Psi A_4) e_2 + 2e_2^T \Psi \Delta g_2 \\ &\leq e_2^T (A_4^T \Psi + \Psi A_4) e_2 + \frac{1}{\varepsilon} e_2^T \Psi \Psi^T e_2 + \varepsilon \gamma_2^2 \|e_2\|^2 \\ &\leq e_2^T \left( A_4^T \Psi + \Psi A_4 + \frac{1}{\varepsilon} \Psi \Psi^T + \varepsilon \gamma_2^2 I_{n-p} \right) e_2 \\ &< -\sigma e_2^T e_2 \leq -\frac{\sigma}{\lambda_{\min}(\Psi)} W.\end{aligned}\tag{3.9}$$

Par conséquent, la conclusion peut être directement obtenue à partir de (3.9), c'est-à-dire,  $\lim_{t \rightarrow \infty} e_2(t) = 0$ . □

En vue de (3.7), nous pouvons conclure à partir des résultats de la proposition 1 que  $\dot{e}_2$  est borné. Sous les conditions (3.2) et (3.4), la dérivée temporelle du terme non linéaire dans (3.7)  $A_2 e_2 + \Delta g_1 + D_1(y, u) f(t)$  est bornée :

$$\left\| \phi(t) = \frac{d}{dt} (A_2 e_2 + \Delta g_1 + D_1(y, u) f(t)) \right\| \leq \delta,\tag{3.10}$$

où  $\delta$  est une constante positive.

**Théorème 1.** Supposons que (3.10) est vérifiée, les trajectoires du système dynamique d'erreur (3.7) convergent vers zéro en temps fini si les gains de conception  $k_i$  dans l'algorithme ST modifié (3.5) sont formulés comme suit

$$\begin{aligned} k_1 &= k_{10}\sqrt{L}, & k_2 &= k_{20}L, \\ k_3 &= k_{30}L, & k_4 &= k_{40}L^2, \end{aligned} \quad (3.11)$$

où  $k_{i0}, i \in \{1, 2, 3, 4\}$  et  $L$  sont des constantes positives qui satisfont

$$4k_{20}k_{40} > 8k_{30}^2k_{20} + 9k_{10}^2k_{30}^2, \quad (3.12)$$

$$L > \frac{\delta \|q_1\|_2 \sqrt{\lambda_{\max}(P)}}{\sqrt{\lambda_{\min}(P)} \lambda_{\min}(M_1)}. \quad (3.13)$$

*Preuve.* Le système (3.7) peut être réécrit comme

$$\begin{aligned} \dot{e}_y &= -k_1 |e_y|^{\frac{1}{2}} \text{signe}(e_y) - k_3 e_y + \varepsilon, \\ \dot{\varepsilon} &= -k_2 \text{signe}(e_y) - k_4 e_y + \phi(t) \end{aligned} \quad (3.14)$$

Afin d'effectuer une analyse de Lyapunov, le vecteur d'état suivant est introduit

$$\xi = \left[ L^{\frac{1}{2}} |e_y|^{\frac{1}{2}} \text{signe}(e_y), L e_y, \varepsilon \right]^T. \quad (3.15)$$

Le système (3.14) est réécrit comme

$$\dot{\xi} = \frac{L}{|\xi_1|} F_1 \xi + L F_2 \xi + F_3, \quad (3.16)$$

$$\text{où } F_1 = \begin{bmatrix} -\frac{\lambda_0}{2} & 0 & \frac{1}{2} \\ 0 & -\lambda_0 & 0 \\ -\alpha_0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, F_2 = \begin{bmatrix} -\frac{k_{\lambda_0}}{2} & 0 & 0 \\ 0 & -k_{\lambda_0} & 1 \\ 0 & -k_{\alpha_0} & 0 \end{bmatrix} \text{ et } F_3 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \phi(t) \end{bmatrix}^T.$$

La fonction de Lyapunov candidate suivante est choisie pour le système (3.16)

$$V = \xi^T P \xi, \quad (3.17)$$

où la matrice  $P = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 4k_{20} + k_{10}^2 & k_{10}k_{30} & -k_{10} \\ k_{10}k_{30} & k_{30}^2 + 2k_{40} & -k_{30} \\ -k_{10} & -k_{30} & 2 \end{bmatrix}$  est symétrique définie positive en raison du fait que ses mineurs principaux sont tous positifs, étant donné que  $4k_{20}k_{40} > 8k_{10}^2k_{20} + 9k_{10}^2k_{30}^2$ .

En prenant la dérivée temporelle de (3.17) le long des trajectoires de (3.16),

$$\dot{V} = -\frac{L}{|\xi_1|} \xi^T M_1 \xi - L \xi^T M_2 \xi + q_1 \phi(t) \xi, \quad (3.18)$$

où  $q_1 = \begin{bmatrix} -\lambda_0 & -k_{\lambda_0} & 2 \end{bmatrix}$ ,  $M_1 = F_1^T P + P F_1$  et  $M_2 = F_2^T P + P F_2$  sont des matrices définies positives selon la condition (3.12).

Il découle de l'inégalité  $\lambda_{\min}(P) \|\xi\|^2 \leq V \leq \lambda_{\max}(P) \|\xi\|^2$  que

$$\begin{aligned} \dot{V} &\leq -L \frac{\lambda_{\min}(M_1)}{\sqrt{\lambda_{\max}(P)}} V^{\frac{1}{2}} - L \frac{\lambda_{\min}(M_2)}{\lambda_{\max}(P)} V + \frac{\delta \|q_1\|_2}{\sqrt{\lambda_{\min}(P)}} V^{\frac{1}{2}} \\ &= -\left( L \frac{\lambda_{\min}(M_1)}{\sqrt{\lambda_{\max}(P)}} - \frac{\delta \|q_1\|_2}{\sqrt{\lambda_{\min}(P)}} \right) V^{\frac{1}{2}} - L \frac{\lambda_{\min}(M_2)}{\lambda_{\max}(P)} V \\ &\leq -\eta V^{\frac{1}{2}} \end{aligned} \quad (3.19)$$

où  $\eta = L \frac{\lambda_{\min}(M_1)}{\sqrt{\lambda_{\max}(P)}} - \frac{\delta \|q_1\|_2}{\sqrt{\lambda_{\min}(P)}}$  est une constante positive selon la condition (3.13). Par conséquent, il en résulte que le principe de comparaison que  $\xi$  converge vers zéro en temps fini [29]. Ainsi, le Théorème 1 est prouvé.  $\square$

### 3.3 Reconstruction du défauts

Dans cette partie, une approche de reconstruction de défauts basée sur le ST SMO sera conçue pour le système (3.1) à l'aide de la technique d'injection équivalente d'erreurs de sortie [30]. Le Théorème 1 montre que  $e_y$  et  $\dot{e}_y$  convergent vers zéro en temps fini, ainsi,

l'équation suivante est obtenue pendant le mouvement de glissement  $e_y = \dot{e}_y = 0$

$$v(e_y) = A_2 e_2 + \Delta g_1 + D_1(y, u) f(t). \quad (3.20)$$

Selon les résultats de la proposition 1, nous avons

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \|A_2 e_2 + \Delta g_1\| \leq (\|A_2\| + \gamma_1) \|e_2(t)\| = 0. \quad (3.21)$$

Par conséquent, à condition que la matrice  $D_1(y, u)$  soit inversible, le signal de défaut  $f(t)$  peut être approximé par:

$$\hat{f}(t) = D_1^{-1}(y, u) v(e_{y_2}). \quad (3.22)$$

**Remarque 1.** *Il convient de noter que les calculs nécessaires pour l'algorithme ST modifié (3.5) sont légèrement plus intensifs que ceux de l'algorithme proportionnel-intégral (PI). Cependant, du point de vue pratique, la charge de calcul en temps réel de la correction  $v(s)$  est faible en raison des capacités de calcul élevées des calculateurs existants.*

### 3.4 Application à la pile PEMFC

Reprenons le modèle dynamique à 4 états (2.26) de la pile PEMFC présenté dans le chapitre 2, auquel on introduit un défaut  $W_{fuite}$  dans la dynamique du collecteur d'air. En plus, seuls les états  $p_{O_2}$ ,  $p_{N_2}$  et  $p_{sm}$  suffisent pour l'application de l'algorithme de détection, la dynamique de  $\omega_{cp}$ , quant à elle, est omise car son action sur le reste des états se fait à travers la fonction

$W_{cp}$  qui est directement mesurée. Le modèle défectueux devient donc:

$$\begin{aligned}\dot{x}_1 &= c_1 (x_3 - x_1 - x_2 - c_2) - \frac{c_3 x_1 W_{ca, out}}{c_4 x_1 + c_5 x_2 + c_6} - c_7 I_{st}, \\ \dot{x}_2 &= c_8 (x_3 - x_1 - x_2 - c_2) - \frac{c_3 x_2 W_{ca, out}}{c_4 x_1 + c_5 x_2 + c_6}, \\ \dot{x}_3 &= c_{14} \left[ 1 + c_{15} \left[ \left( \frac{x_3}{c_{11}} \right)^{c_{12}} - 1 \right] \right] \times [W_{cp} - c_{16} (x_3 - x_1 - x_2 - c_2) - W_{fuite}]\end{aligned}\quad (3.23)$$

Avec le vecteur d'état

$$x = [p_{O_2} \quad p_{N_2} \quad p_{sm}]^T \quad (3.24)$$

et de mesures:

$$y = [W_{cp} \quad T_{cp} \quad p_{sm} \quad W_{ca, out} \quad I_{st}]^T \quad (3.25)$$

**Remarque 2.** Dans certaines littératures, ce même défaut a été simulé par une modification de la constante  $c_{16}$  (constante physique  $k_{sm, out}$ ). Une telle conception est en réalité peu pertinente du fait que celle-ci simule plutôt un élargissement de l'ouverture du même orifice déversant dans la cathode, tandis qu'une fuite du collecteur déverse plutôt à l'extérieur (pression en aval valant  $p_{atm}$ ). Il est donc plus logique de simuler une fuite par l'introduction d'un nouveau débit massique qui tient compte de cette différence.

En faisant l'analogie entre (3.23) et (3.3), nous avons:

$$\begin{aligned}z_1 &= x_3 = p_{sm} \\ A_1 &= 0 \\ A_2 &= [0 \quad 0] \\ g_1(z, u) &= c_{14} \left[ 1 + c_{15} \left[ \left( \frac{x_3}{c_{11}} \right)^{c_{12}} - 1 \right] \right] \times [W_{cp} - c_{16} (x_3 - x_1 - x_2 - c_2)] \\ D_1 &= -c_{14} \left[ 1 + c_{15} \left[ \left( \frac{x_3}{c_{11}} \right)^{c_{12}} - 1 \right] \right]\end{aligned}\quad (3.26)$$

Et pour la variable  $z_2$

$$\begin{aligned}
 z_2 &= [x_1 \quad x_2]^T \\
 A_3 &= [c_1 \quad c_8]^T \\
 A_4 &= \begin{bmatrix} -c_1 & -c_1 \\ -c_8 & -c_8 \end{bmatrix} \\
 g_2(z, u) &= \begin{bmatrix} -c_1 c_2 - \frac{c_3 x_1 W_{ca, out}}{c_4 x_1 + c_5 x_2 + c_6} - c_7 I_{st} \\ -c_8 c_2 - \frac{c_3 x_2 W_{ca, out}}{c_4 x_1 + c_5 x_2 + c_6} \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{3.27}$$

L'observateur Super-Twisting modifié appliqué à la pile à combustible a donc la forme suivante

$$\begin{aligned}
 \dot{\hat{x}}_1 &= c_1 (\hat{x}_3 - \hat{x}_1 - \hat{x}_2 - c_2) - \frac{c_3 \hat{x}_1 W_{ca, out}}{c_4 \hat{x}_1 + c_5 \hat{x}_2 + c_6} - c_7 I_{st}, \\
 \dot{\hat{x}}_2 &= c_8 (\hat{x}_3 - \hat{x}_1 - \hat{x}_2 - c_2) - \frac{c_3 \hat{x}_2 W_{ca, out}}{c_4 \hat{x}_1 + c_5 \hat{x}_2 + c_6}, \\
 \dot{\hat{x}}_3 &= c_{14} \left[ 1 + c_{15} \left[ \left( \frac{\hat{x}_3}{c_{11}} \right)^{c_{12}} - 1 \right] \right] \times [W_{cp} - c_{16} (\hat{x}_3 - \hat{x}_1 - \hat{x}_2 - c_2)] + v(s)
 \end{aligned} \tag{3.28}$$

ou  $v(s)$  est donné par:

$$v(s) = k_1 |s|^{\frac{1}{2}} \text{sign}(s) + k_2 \int_0^t \text{sign}(s) d\tau + k_3 s + k_4 \int_0^t s d\tau \tag{3.29}$$

tel que  $s = e_y = p_{sm} - \hat{p}_{sm}$

## 3.5 Résultats de Simulation

### 3.5.1 L'observateur sans défaut

L'observateur est dans un premier temps implémenté et testé avec un modèle de pile à 4 états sans aucun scénario de défaut . Les paramètres physiques de la pile utilisée sont fournis dans le tableau 3.1. Nous rappelons que dans notre approche, cinq variables sont supposées mesurées, à savoir le débit d'air injecté dans le collecteur  $W_{cp}$ , sa température  $T_{cp}$ , la pression  $p_{sm}$  qui est le seul état mesuré du système, le débit d'air sortant de la cathode  $W_{ca, out}$  et le

Table 3.1: Paramètres physiques de la pile utilisée

Symbole	Paramètre	Valeur
$n$	Nombre de cellules dans la pile	90
$\gamma$	Rapport des chaleurs spécifiques de l'air	1.4
$\phi_{ca}$	Humidité relative à l'entrée de la cathode	1.0
$\phi_{atm}$	Humidité relative de l'air ambiant	0.5
$R$	Constante universelle des gaz	8.314 J/(mol · K)
$F$	Constante de Faraday	96485C/mol
$p_{atm}$	Pression atmosphérique	$1.01325 \times 10^5$ Pa
$T_{fc}$	Température de la pile à combustible	353.15 K
$T_{atm}$	Température atmosphérique	298.15 K
$C_p$	Capacité calorifique spécifique de l'air	1004 J/(Kg · K)
$C_D$	Décharge de la buse	0.0124
$y_{O_2, atm}$	Rapport molaire d'oxygène à l'entrée de la cathode	0.21
$M_a$	Masse molaire de l'air	$28.9644 \times 10^{-3}$ Kg/mol
$M_{O_2}$	Masse molaire de l'oxygène	$32 \times 10^{-3}$ Kg/mol
$M_{N_2}$	Masse molaire de l'azote	$28 \times 10^{-3}$ Kg/mol
$M_v$	Masse molaire de la vapeur	$18 \times 10^{-3}$ Kg/mol
$V_{ca}$	Volume de la cathode	0.01 m <sup>3</sup>
$V_{sm}$	Volume du collecteur d'alimentation	0.02 m <sup>3</sup>
$A_T$	Surface d'ouverture de la buse	0.002 m <sup>2</sup>
$J_{cp}$	Inertie du compresseur et du moteur	$5 \times 10^{-5}$ Kg · m <sup>2</sup>
$\eta_{cp}$	Efficacité du compresseur	80%
$\eta_{cm}$	Efficacité mécanique du moteur	98%
$k_t$	Constante du moteur	0.0153 N · m/A
$k_v$	Constante du moteur	0.0153 V/(rad/sec)
$R_{cm}$	Constante du moteur	0.82Ω
$k_{sm, out}$	Constante de sortie du collecteur d'alimentation	$0.3629 \times 10^{-5}$ Kg/(Pa · s)
$k_{ca, in}$	Constante d'entrée de la cathode	$0.3629 \times 10^{-5}$ Kg/(Pa · s)
$k_{ca, out}$	Constante de sortie de la cathode	$0.2177 \times 10^{-5}$ Kg/(Pas)

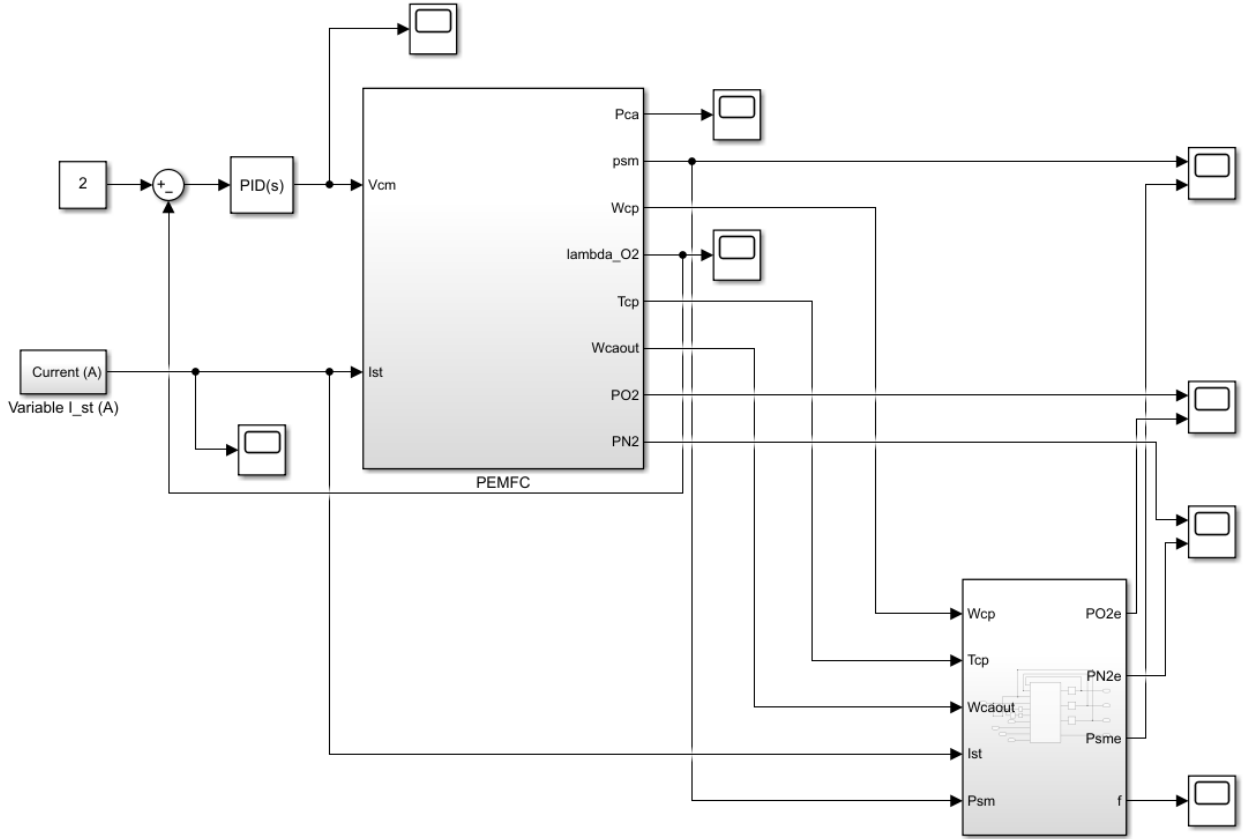


Figure 3.1: Schéma Simulink de la pile avec l'observateur

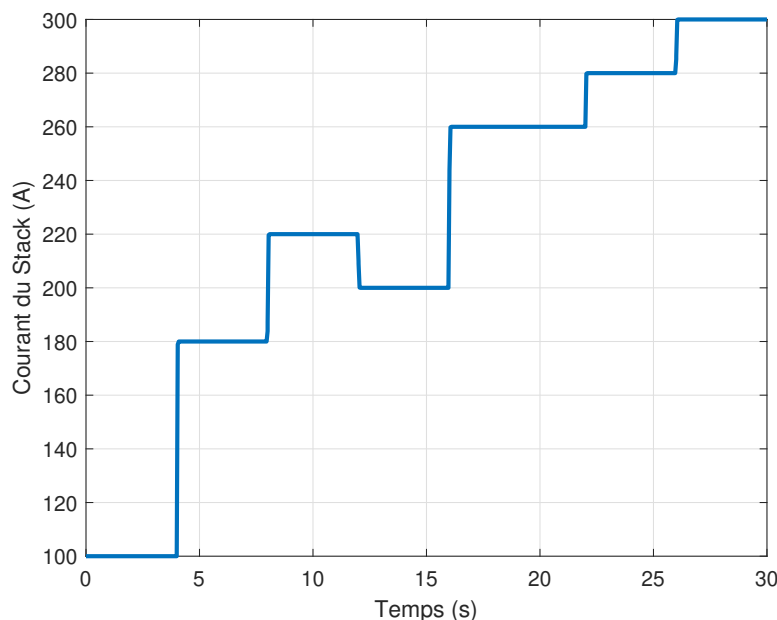
courant du stack  $I_{st}$ . Hormis la pression du collecteur, toutes les grandeurs mesurées sont soit des perturbations pour le système (entrées exogènes) et on parle de  $I_{st}$ , ou des fonctions de l'état (entrées endogènes) et on parle de  $W_{cp}$ ,  $T_{cp}$  et  $W_{ca,out}$ . Bien que la mesure de ses dernières est en fait pas nécessaire pour la réalisation de notre approche d'observation et de diagnostic vu que leur forme est connue, elles sont cependant très utiles à la réduction des incertitudes du modèle qui ont un impact direct sur l'efficacité de l'observateur. Le schéma bloc du modèle avec l'observateur est illustré dans la figure 3.1.

Les variables d'état du modèle de la pile ont été initialisées comme suit:

$$x = [p_{O2} \quad p_{N2} \quad p_{sm} \quad \omega_{cp}]^T = [0.11 \quad 0.85 \quad 1.48 \quad 5100]^T \quad (3.30)$$

Ou les pressions sont en bar et la vitesse est en rad/s.

Pour les variables d'état estimés, elles ont été initialisées à des valeurs 50% inférieures. le système a été sollicité par un courant  $I_{st}$  constant par morceaux variant de 100 à 300A afin de tester la convergence de l'observateur sur tous les points de fonctionnement du système, la tension du compresseur (variable de commande) est fournie par un régulateur PI qui asservit la variable  $\lambda_{O_2}$  à la valeur de référence  $\lambda_{O_2}^{ref} = 2$ . les figures montrent l'évolution des variables  $\hat{I}_{st}$ ,  $v_{cm}$ ,  $\lambda_{O_2}$ ,  $p_{O_2}$  vs  $\hat{p}_{O_2}$ ,  $p_{N_2}$  vs  $\hat{p}_{N_2}$ ,  $p_{sm}$  vs  $\hat{p}_{sm}$  et le signal de défaut  $f$ , respectivement.

Figure 3.2: Le courant  $I_{st}$ 

La figure 3.4 montre que le régulateur stabilise bien la valeur du rapport d'excès d'oxygène autour de sa valeur de référence  $\lambda_{O_2}^{ref} = 2$  avec un bon rejet de perturbation du courant  $I_{st}$ . Les figures 3.5, 3.6 et 3.7 montrent la convergence exponentielle de l'observateur avec la parfaite poursuite des états réels bien que leur évolution rapide. Malgré des conditions initiales relativement lointaines, l'observateur a convergé en moins d'une seconde, qui est une durée négligeable pour notre application.

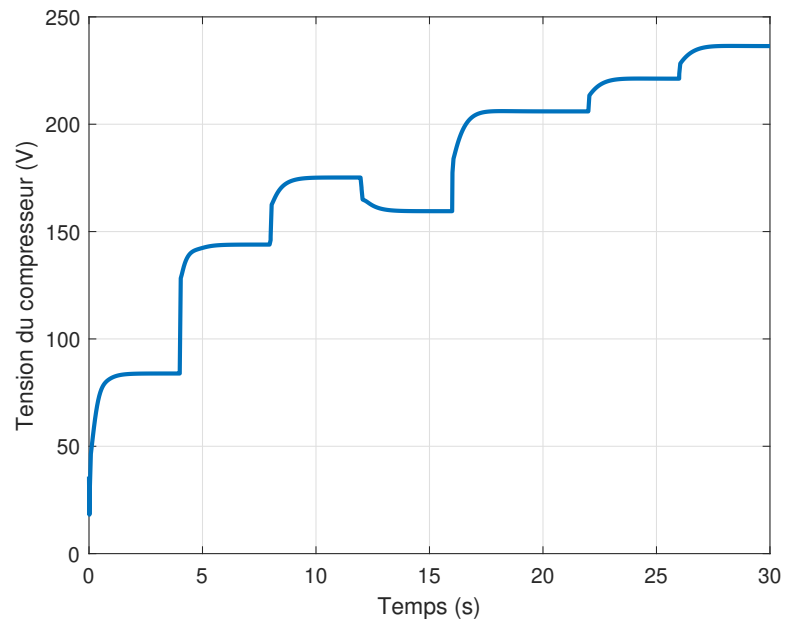


Figure 3.3: La tension du compresseur  $v_{cm}$

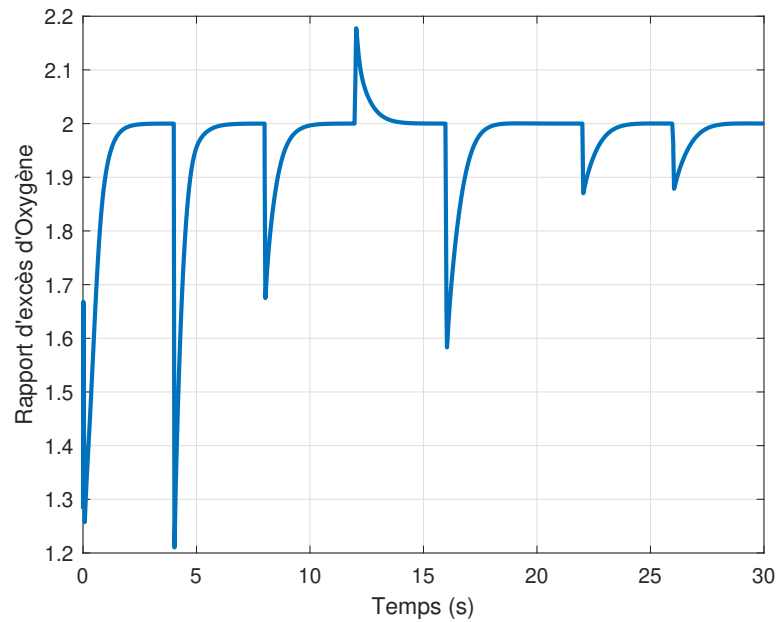


Figure 3.4: Le rapport d'excès d'oxygène

### 3.5.2 Scénario de Défaillance

Un scénario de défaillance sous forme d'une fuite d'air soudaine dans le collecteur d'air d'alimentation est envisagé. Il est simulé par l'introduction d'un nouveau débit, dit  $W_{fuite} =$

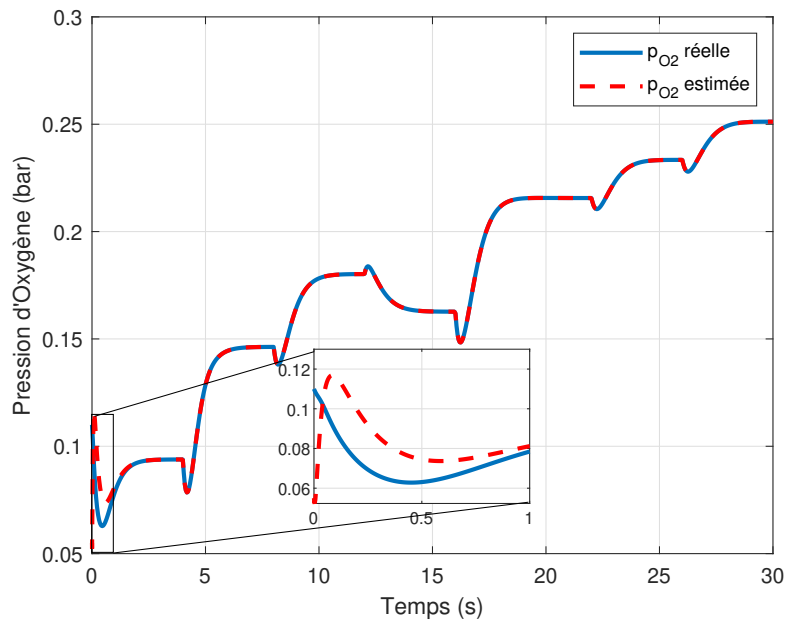


Figure 3.5: La pression d'oxygène avec celle estimée

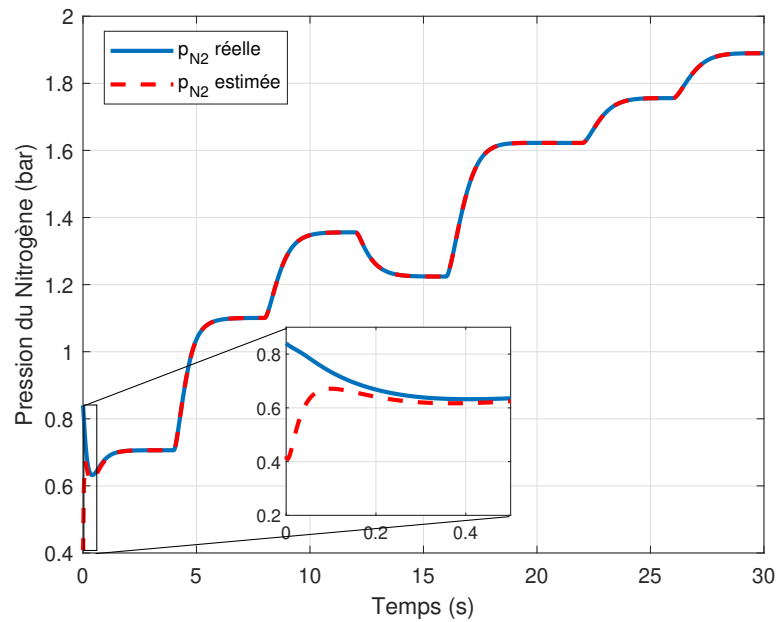


Figure 3.6: La pression d'azote avec celle estimée

$k_{sm_f}(p_{sm} - p_{atm})$  dans la dynamique de pression du collecteur d'air. [31, 32, 33]. La valeur  $k_{sm_f}$  exprime le niveau de sévérité du défaut, elle est donné comme

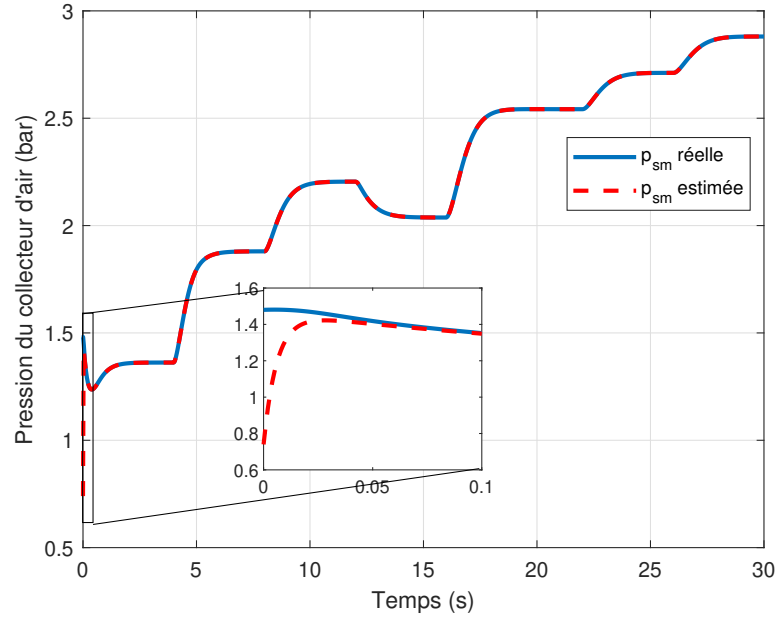


Figure 3.7: La pression du collecteur d'air avec celle estimée

$$k_{sm_f} = \begin{cases} 0, & \text{si } t \in [0, 10) \\ 0.5E-7 & \text{si } t \in [10, 20) \\ 1E-7, & \text{sinon} \end{cases} \quad (3.31)$$

La simulation a montré que l'introduction du défaut de fuites aux instants 10s et 20s n'a presque pas affecté les performances de la commande PI. Ceci est visible sur la figure 3.9 ou on voit la réaction du régulateur aux instants du défaut afin de compenser le débit de fuite. Dans la figure 3.10 on voit bien le rejet de l'effet du défaut sur le rapport d'excès d'oxygène. D'autre part, l'observateur a éprouvé une robustesse spectaculaire au défaut, vu que sa poursuite des valeurs réelle n'a presque pas été affecté. Ceci reflète le caractère robuste de l'observateur MHOSMO avec les gains choisis. La figure 3.14 montre comment le défaut a été reconstruit avec succès. Le signal affiché concerne la valeur  $W_{fuite}$ , celle-ci permet de calculer le pourcentage de la fuite par rapport au débit  $W_{ca,in}$  injecté dans la cathode. Il est clair donc que le schéma proposé est capable de reconstruire le signal de défaillance et d'estimer en même temps les états non mesurés du système.

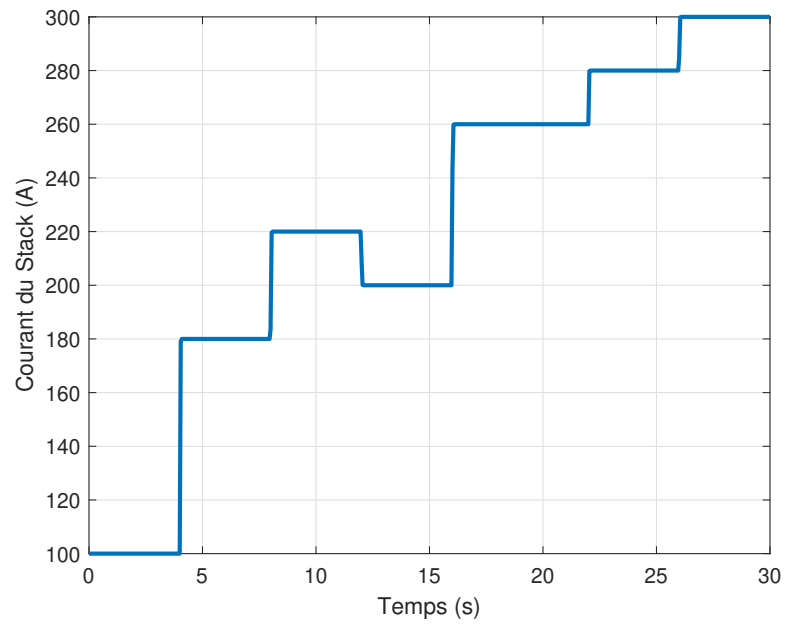


Figure 3.8: Le courant  $I_{st}$

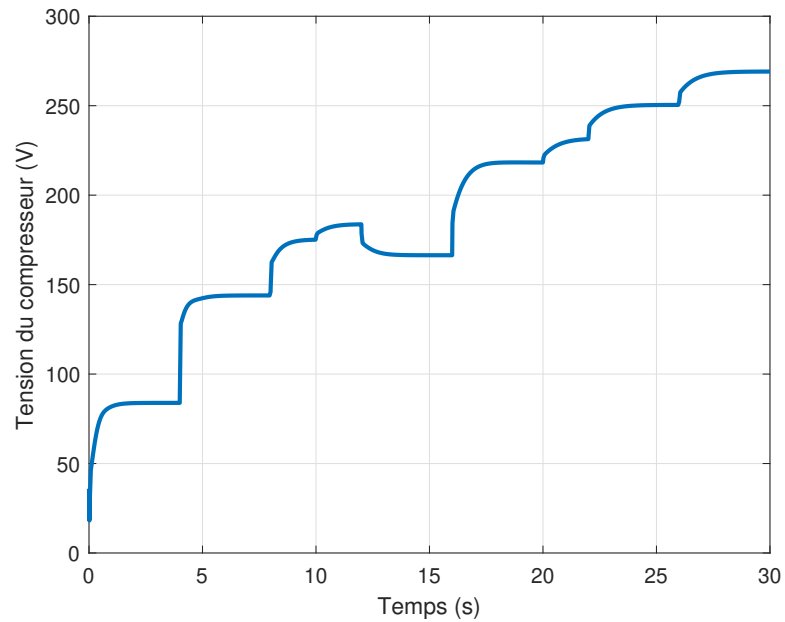


Figure 3.9: La tension du compresseur  $v_{cm}$

## 3.6 CONCLUSIONS

Ce papier a proposé une méthode robuste de diagnostic de défaillance pour le système d'alimentation en air des piles à combustible PEM. Les signaux résiduels sont générés en

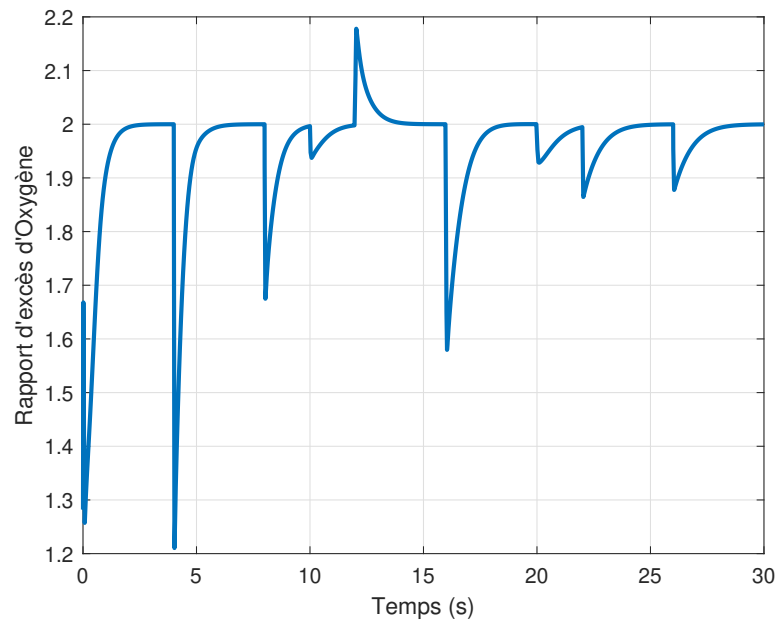


Figure 3.10: Le rapport d'excès d'oxygène  $\lambda_{O_2}$

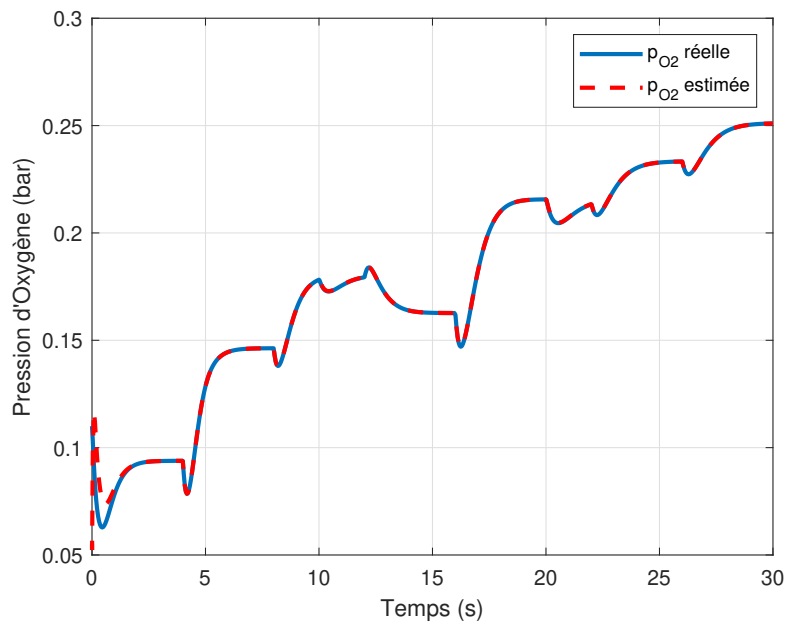


Figure 3.11: La pression d'oxygène avec celle estimée

comparant les variables de sortie du modèle du système d'alimentation en air des piles à combustible et leur estimation correspondante fournie par des observateurs. La conception de l'observateur proposé est basée sur l'algorithme de mode glissant ST modifié qui

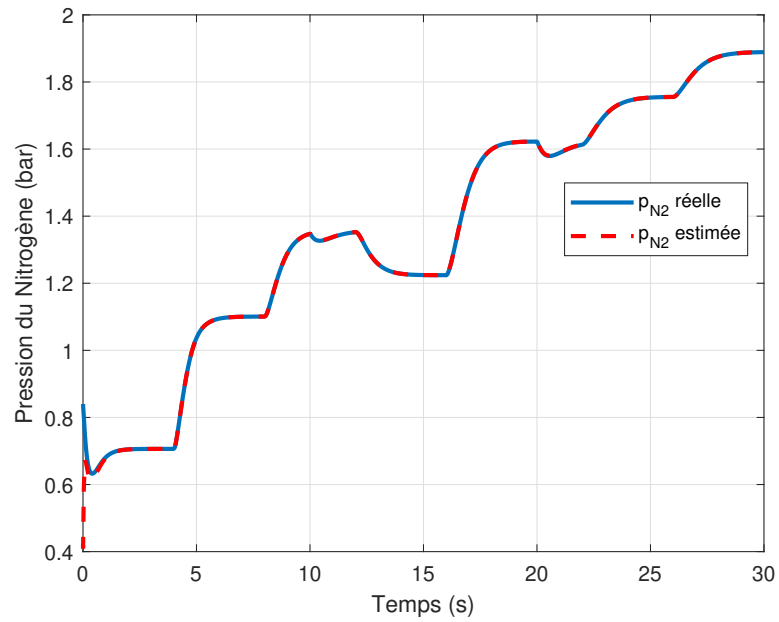


Figure 3.12: La pression d'azote avec celle estimée

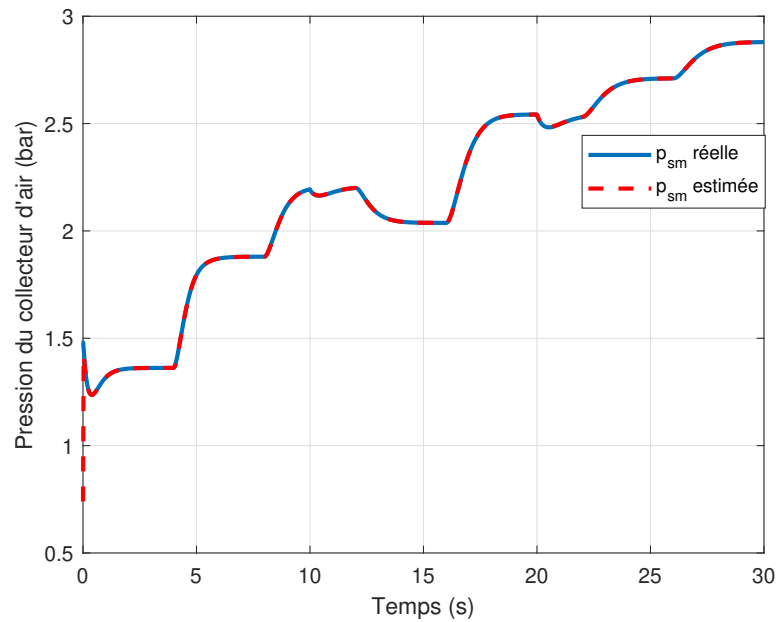


Figure 3.13: La pression du collecteur d'air avec celle estimée

se compose de deux termes non linéaires et de deux termes linéaires. Cet observateur est capable d'estimer non seulement les états du système, mais aussi les signaux de défaillance, en présence de perturbations externes. Une fois que le mouvement de glissement est atteint,

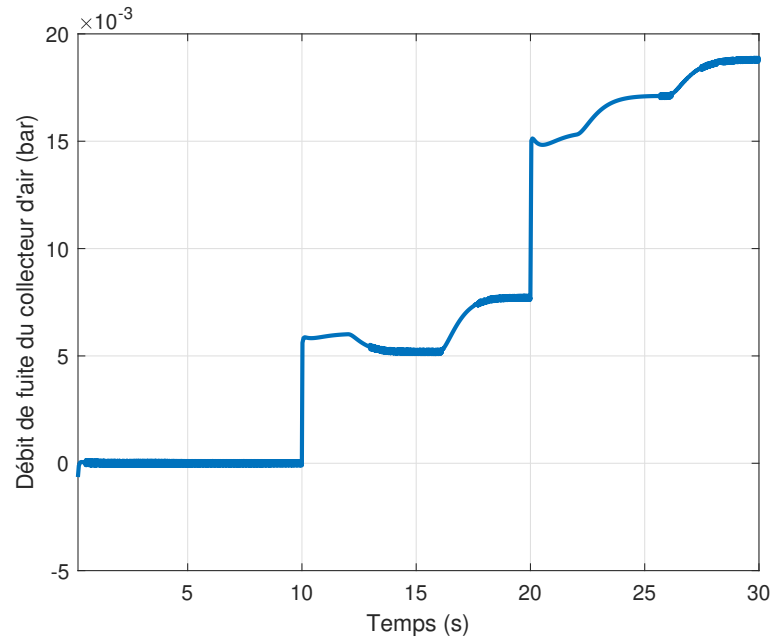


Figure 3.14: Valeur du débit de fuite

l'injection d'erreur de sortie équivalente obtenue est calculée en ligne pour reconstruire les éventuelles défaillances du système. L'approche de diagnostic de défaillance proposée a été mise en œuvre avec succès dans l'environnement Matlab/Simulink, où une fuite d'air soudaine dans le collecteur d'air d'alimentation en air est considérée comme le scénario de défaillance. Ainsi, le débit d'air fourni par le compresseur d'air doit être augmenté afin d'augmenter le débit d'oxygène, voire d'arrêter immédiatement la pile à combustible si la défaillance est importante.

$$\begin{aligned}
 b_1 &= \frac{RT_{fc}k_{ca,in}}{M_{O_2}V_{ca}} \frac{x_{O_2, atm}}{1+\omega_{atm}}, & b_2 &= p_{sat} \\
 b_3 &= \frac{RT_{fc}}{V_{ca}}, & b_4 &= M_{O_2} \\
 b_5 &= M_{N_2}, & b_6 &= M_{v,ca} \\
 b_7 &= \frac{nRT_{fc}}{4FV_{ca}}, & b_8 &= \frac{RT_{fc}k_{ca,in}}{M_{N_2}V_{ca}} \frac{1-x_{O_2, atm}}{1+\omega_{atm}} \\
 b_9 &= \frac{k_v k_t \eta_{cm}}{J_{cp} R_{cm}}, & b_{10} &= \frac{C_p T_{atm}}{J_{cp} \eta_{cp}} \\
 b_{11} &= p_{atm}, & b_{12} &= \frac{\gamma-1}{\gamma} \\
 b_{13} &= \frac{\eta_{cm} k_t}{J_{cp} R_{cm}}, & b_{14} &= \frac{\gamma R T_{atm}}{M_a V_{sm}} \\
 b_{15} &= \frac{1}{\eta_{cp}}, & b_{16} &= k_{ca,in} \frac{x_{O_2, atm}}{1+\omega_{atm}} \\
 b_{17} &= \frac{nM_{O_2}}{4F}.
 \end{aligned}$$

# Conclusion Générale

En conclusion, ce mémoire a exploré en profondeur les défis et les opportunités liés aux piles à combustible à membrane échangeuse de protons (PEMFC), en mettant un accent particulier sur leur système d'alimentation en air. Les PEMFC sont des technologies d'électrochimie prometteuses, offrant une conversion efficace et propre de l'hydrogène en électricité, avec un large éventail d'applications potentielles.

L'un des principaux défis dans l'exploitation optimale des PEMFC réside dans la gestion de l'alimentation en air, qui joue un rôle crucial dans la réaction chimique. Une connaissance précise de la pression partielle d'oxygène est essentielle pour garantir un fonctionnement fiable et efficace. Cependant, les capteurs conventionnels ne peuvent fournir qu'une mesure de la pression totale de l'air, ce qui rend difficile le contrôle efficace.

Dans ce contexte, ce mémoire a examiné en détail l'utilisation d'observateurs avancés, en particulier l'observateur à mode glissant d'ordre supérieur avec injection PI, pour estimer avec précision la pression partielle d'oxygène et surveiller le comportement du système d'alimentation en air. De plus, une méthode de détection de défauts basées sur cet observateur a été présentée pour identifier les problèmes potentiels, tels que les fuites dans le collecteur d'air d'alimentation, qui peuvent compromettre la performance globale de la PEMFC.

Les contributions de ce mémoire ouvrent la voie à une meilleure compréhension et à une gestion améliorée des PEMFC, en contribuant à maximiser leur rendement énergétique, leur fiabilité et leur durabilité. Alors que les PEMFC continuent de progresser en tant que technologies essentielles pour une énergie propre et durable, cette recherche apporte une

contribution significative à leur avancement et à leur application pratique.

# Bibliography

- [1] W. R. Grove. *On Voltaic Series and the Combination of Gases by Platinum*, volume 14. 1839.
- [2] J. M. Grimwood, B. C. Hacker, and P. J. Vorzimmer. *Project Gemini Technology and Operations: A Chronology NASA*. 1969.
- [3] L. Carrette, K. A. Friedrich, and U. Stimming. Fuel cells - fundamentals and applications. *Fuel Cells*, 1:5–39, 2001.
- [4] Distributed Utility Associates. *DUIT: Distributed Utility Integration Test, Report No. SR-560-34389*. 2003.
- [5] A. Vahidi, A. Stefanopoulou, and H. Peng. Current management in a hybrid fuel cell power system: A model-predictive control approach. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 14(6):1047–1057, Nov 2006.
- [6] J. Pukrushpan, A. Stefanopoulou, and H. Peng. Control of fuel cell breathing: initial results on the oxygen starvation problem. *IEEE Control Systems*, 24(2):30–46, 2004.
- [7] S. Thomas and M. Zalbowitz. *Fuel Cells Green Power*. Los Alamos National Laboratory, New Mexico, 2000.
- [8] P. Stevens, F. Novel-Cattin, A. Hammou, C. Lamy, and M. Cassir. *Piles à Combustible*. Number D 3340. 2001.

- [9] R. Mosdale. *Transport Électrique Routier, Véhicules Électriques à Piles à Combustible*, volume 12. 2003.
- [10] S. Srinivasan. *Fuel Cells: From Fundamentals to Applications*. Springer Science, 2006.
- [11] A. Corbeau. *Les piles à combustible*, 2000.
- [12] P. Stevens, F. Novel-Cattin, and A. Hammou. *Pile à Combustible*. 2000.
- [13] W. T. Grubb and L. W. Niedrach. Batteries with solid ion-exchange membrane electrolytes. *Journal of The Electrochemical Society*, 107:131–135, 1960.
- [14] J. Lachaize. Étude des stratégies et des structures de commande pour le pilotage des systèmes Énergétiques à pile à combustible (pac) destinés à la traction, 2004.
- [15] S. Thomas and M. Zalbowitz. *Fuel cells green power*, 1999.
- [16] K. W. Suh. *Modeling, Analysis and Control of Fuel Cell Hybrid Power Systems*. PhD thesis, Department of Mechanical Engineering, The University of Michigan, 2006.
- [17] J. Pukrushpan, A. Stefanopoulou, and H. Peng. *Control of Fuel Cell Power Systems: Principles, Modeling, Analysis and Feedback Design*. Springer, 2004.
- [18] J. Larminie, A. Dicks, and M. S. McDonald. *Fuel Cell Systems Explained*, volume 2. Wiley Chichester, 2003.
- [19] K. Kordesch and G. Simader. *Fuel Cells and Their Applications*. Wiley, 2006.
- [20] J. C. Amphlett, R. Baumert, R. F. Mann, B. A. Peppley, P. R. Roberge, and T. J. Harris. Performance modeling of the ballard mark iv solid polymer electrolyte fuel cell ii. empirical model development. *Journal of the Electrochemical Society*, 142(1):9–15, 1995.

- [21] R. Talj, D. Hissel, R. Ortega, M. Becherif, and M. Hilaiet. Experimental validation of a pem fuel-cell reduced-order model and a moto-compressor higher order sliding-mode control. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 57(6):1906–1913, 2010.
- [22] T. V. Nguyen and R. E. White. A water and heat management model for proton-exchange-membrane fuel cells. *Journal of the Electrochemical Society*, 140(8):2178–2186, 1993.
- [23] Stéphane Caux, Jérôme Lachaize, Maurice Fadel, P Shott, and Laurent Nicod. Modelling and control of a fuel cell system and storage elements in transport applications. *Journal of Process Control*, 15(4):481–491, 2005.
- [24] Chan-Chiao Lin, Huei Peng, Min Joong Kim, and Jessy W Grizzle. Integrated dynamic simulation model with supervisory control strategy for a pem fuel cell hybrid vehicle. In *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, volume 47063, pages 275–286, 2004.
- [25] Jing Sun and Ilya V Kolmanovskiy. Load governor for fuel cell oxygen starvation protection: A robust nonlinear reference governor approach. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 13(6):911–920, 2005.
- [26] S Rodatz, Gino Paganelli, and Lino Guzzella. Optimizing air supply control of a pem fuel cell system. In *Proceedings of the 2003 American Control Conference, 2003.*, volume 3, pages 2043–2048. IEEE, 2003.
- [27] X. Zhang, M. Polycarpou, and T. Parisini. Fault diagnosis of a class of nonlinear uncertain systems with lipschitz nonlinearities using adaptive estimation. *Automatica*, 46(2):290–299, 2010.
- [28] A. Levant. Higher-order sliding modes, differentiation and output-feedback control. *International Journal of Control*, 76(9-10):924–941, 2003.

- [29] H. K. Khalil and J. Grizzle. *Nonlinear Systems*, volume 3. Prentice Hall, 1996.
- [30] C. Edwards, S. Spurgeon, and R. Patton. Sliding mode observers for fault detection and isolation. *Automatica*, 36(4):541–553, 2000.
- [31] T. Escobet, D. Feroldi, S. D. Lira, V. Puig, J. Quevedo, J. Riera, and M. Serra. Model-based fault diagnosis in pem fuel cell systems. *J Power Sources*, 192(1):216–223, 2009.
- [32] S. Laghrouche, J. Liu, F.-S. Ahmed, M. Harmouche, and M. Wack. Adaptive second-order sliding mode observer-based fault reconstruction for pem fuel cell air-feed system. *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, 23(3):1098–1109, May 2015.
- [33] S. D. Lira, V. Puig, J. Quevedo, and A. Husar. Lpv observer design for pem fuel cell system: application to fault detection. *J Power Sources*, 196(9):4298–4305, 2011.
- [34] J. Pukrushpan, H. Peng, and A. Stefanopoulou. Control-oriented modeling and analysis of fuel cell reactant flow for automotive fuel cell systems. *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, 126(1):14–25, March 2004.
- [35] W. Grove and O. Egeland. A small voltaic battery of great energy. *Philosophical Magazine*, 15:287–293, 1839.
- [36] I. Matraji, S. Laghrouche, S. Jemei, and M. Wack. Robust control of the pem fuel cell air-feed system via sub-optimal second-order sliding mode. *Applied Energy*, 104:945–957, 2013.
- [37] S.-Y. Choe, J.-W. Ahn, J.-G. Lee, and S.-H. Baek. Dynamic simulator for a pem fuel cell system with a pwm dc/dc converter. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 23(2):669–680, 2008.
- [38] A. Arce, A. del Real, C. Bordons, and D. Ramirez. Real-time implementation of a constrained mpc for efficient airflow control in a pem fuel cell. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 57(6):1892–1905, 2010.

- [39] M. Tekin, D. Hissel, M.-C. Pera, and J. M. Kaufmann. Energy-management strategy for embedded fuel-cell systems using fuzzy logic. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 54(1):595–603, 2007.
- [40] J. Gruber, C. Bordons, and A. Oliva. Nonlinear mpc for the airflow in a pem fuel cell using a volterra series model. *Control Engineering Practice*, 20(2):205–217, 2012.
- [41] R. Talj, R. Ortega, and M. Hilairet. A controller tuning methodology for the air supply system of a pem fuel-cell system with guaranteed stability properties. *International Journal of Control*, 82(9):1706–1719, 2009.