

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

UNIVERSITÉ AMAR TELIDJI DE LAGHOUAT



FACULTÉ DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT D'ÉLECTROTECHNIQUE

Mémoire de Fin d'Etude

Soumis en vue de l'obtention du diplôme de Master en Automatique
Option: Automatique et Systèmes

Présenté par **Maazouzi Atallah** et **Bouazzara Mebarek**

Thème

**Etude de Quelques Défauts Cathodiques dans une Pile
à Combustible PEM**

Jury:

Président	Aboubakeur Hadjaissa	MCA	Université de Laghouat
Encadrant	BOUGRINE Mohamed	MCB	Université de Laghouat
Examineur	Bachir Bendjedia	MCB	Université de Laghouat

Juin 2024

Remerciements

Louange à Dieu Tout-Puissant qui nous a donnés la foi, le courage et la patience pour mener à bien ce travail.

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à notre encadrant Dr. BOUGRINE Mohamed Djamel de l'université de Laghouat, pour la confiance qu'il nous a accordée, par sa présence toujours à nos côtés, par sa direction, sa modestie, ses conseils, et ses remarques constructives pour le bon déroulement de ce travail.

Nous tenons à remercier tous ceux qui nous ont aidés à améliorer ce travail grâce à leurs remarques pertinentes, qui nous ont permis de perfectionner ce manuscrit.

Nous exprimons notre profonde gratitude à nos parents, nos frères, et soeurs et toutes nos familles pour leurs encouragements et leurs prières qui nous ont permis d'accomplir ce modeste travail. Nous sommes très reconnaissants de la confiance qu'ils nous ont accordée.

Enfin, nous exprimons notre gratitude à tous ceux qui ont contribué d'une manière ou d'une autre à l'élaboration de ce travail.

Ô Allah, envoie tes bénédictions sur ton noble messager, sa famille et ses compagnons, et bénis-nous dans notre vie.



Dedicace

Je dédie ce travail à mon père :

*Puissent-ils trouver ici un témoignage de ma profonde gratitude
reconnaissance*

*A mes frères, sœurs, grands-parents et ma famille Donne amour et
vitalité.*

*À tous ceux qui m'ont aidé - directement ou indirectement A tous
mes amis qui m'encouragent toujours, et je leur souhaite encore
plus de réussite.*

Merci!

Mebarek Bouazzara

Dedicace

Je dédie ce travail à mes parents:

*Puissent-ils trouver ici un témoignage de ma profonde gratitude
reconnaissance*

*Aux mains pures qui ont retiré de mon chemin les épines de l'échec.
À ceux qui m'ont soutenu avec amour quand je suis faible... À ceux
qui ont dessiné l'avenir avec des lignes de confiance et d'amour...*

C'est ma famille

*Je dédie la joie de ma remise de diplôme à cette grande personne
qui a toujours souhaité que ses yeux admettent me voir un jour
comme celui-ci à... Ma mère*

*Et à celui dont la sueur couronnait son front et m'a appris que le
succès ne peut venir qu'avec de la patience Et la persévérance.*

Mon père

Atallah Maazouzi

ملخص

في هذه الدراسة، يتم تحليل بعض العيوب الكاثودية في خلايا الوقود ذات الغشاء البروتوني (PEM). تهدف هذه الدراسة إلى تحديد وفهم تأثير هذه العيوب على أداء وكفاءة خلايا الوقود. يعتبر العمل كامتداد إلى محاكي موجود لخلايا الوقود تم تطويره بواسطة بوكروشبان وآخرين ليشمل محاكاة هذه العيوب. تقدم الدراسة أيضاً اقتراحات تجريبية حول تمييز هذه العيوب بناءً على محاكاة تأثيراتها على بعض مخرجات خلايا الوقود.
كلمات مفتاحية: بطارية الهيدروجين، عيوب كاثودية، محاكاة

Abstract

In this study, some cathodic defects in PEM (Proton Exchange Membrane) fuel cells are analyzed. The aim of this study is to identify and understand the impact of these defects on the performance and efficiency of the fuel cell. The work extends an existing simulator for fuel cells developed by Pukrushpan et al. to include the simulation of faults. The study also provides empirical suggestions on the distinguishability of these faults based on the simulation of the faults effect on some fuel cell outputs.

Key words: Fuel Cell, Cathodic faults, Simulation

Résumé

Dans cette étude, certains défauts cathodiques dans les piles à combustible à membrane échangeuse de protons (PEM) sont analysés. Le but de cette étude est d'identifier et de comprendre l'impact de ces défauts sur la performance et l'efficacité de la pile à combustible. Le travail étend un simulateur existant pour les piles à combustible développé par Pukrushpan et al. afin d'inclure la simulation de ces défauts. L'étude fournit également des suggestions empiriques sur la distinction de ces défauts en se basant sur la simulation de leurs effets sur certaines sorties de la pile à combustible.

Mots Clés : Pile à Combustible, Défauts cathodiques, Simulation

Sommaire

Liste des Figures

Liste des Tableaux

General Introduction	1
I Généralités sur les Systèmes Pile à Combustible et les Défauts Liés	3
I.1 Introduction	3
I.2 La pile à combustible	5
I.3 Les piles à membrane échangeuse de protons (PEM)	5
I.4 Tension électrique de la PEMFC	6
I.5 Système Pile à Combustible	8
I.5.1 Le stack	9
I.5.2 Les auxiliaries	9
I.6 Les défauts de la pile PEM	14
I.7 Conclusion	15
II Modélisation du système d'alimentation en air de la pile à combustible	
PEM	16
II.1 Revue de la Modélisation des Systèmes de Piles à Combustible	17
II.2 Modèle de PEMFC à l'état stationnaire	19
II.2.1 Tension de circuit ouvert de Nernst	19
II.2.2 Perte d'activation	22
II.2.3 Perte ohmique	23

II.2.4	Tension terminale de la pile à combustible	23
II.3	Modèle dynamique d'alimentation en air de la PEMFC	25
II.3.1	Modèle de compresseur d'air	26
II.3.2	Modèle du collecteur d'approvisionnement	27
II.3.3	Modèle de débit de cathode	28
II.4	Modèle à quatre états	31
II.4.1	Entrées et sorties du système	31
II.4.2	System performances	32
II.5	Analyse en régime permanent	32
II.6	simulation Dynamique	33
II.7	Conclusion	37
III	Un simulateur de pile à combustible incluant les défauts	38
III.1	Introduction	38
III.2	Description du simulateur de la pile à combustible	39
III.3	Inclusion des pannes dans le simulateur PEM	40
III.3.1	Le moteur subit une surchauffe	41
III.3.2	Augmentation de la friction du moteur	42
III.3.3	Blocage des canaux d'évacuation par l'eau produite	43
III.3.4	Fuite d'air dans le collecteur d'air d'alimentation	43
III.3.5	Augmentation de la température du stack	44
III.4	Résultats de la simulation	45
III.4.1	Défaut F1	45
III.4.2	Défaut F2	45
III.4.3	Défaut F3	46
III.4.4	Défaut F4	46
III.4.5	Défaut F5	46
III.5	Conclusion	47
	Bibliography	2

A Paramètres du Modèle de La pile

A.1 Paramètres du Modèle de la pile

A.2 Paramètres du Modèle réduit

Liste des Figures

I.1	Expérience de sir WILLIAM GROVE en 1839.[ref]	4
I.2	Fonctionnement d'une cellule pile à combustible de type PEM	6
I.3	Courbe de polarisation $80^{\circ}C$ pour une pression de la cathode 1 bar	7
I.4	Système Pile à Combustible	9
I.5	Schéma d'un stack et photo d'un stack pile à combustible	10
I.6	schéma Système d'alimentation en hydrogène	12
I.7	Convertisseur DC/DC de Type Boost pour pile à combustible mobile	13
II.1	Chutes de tension dues aux différents types de pertes dans la pile à combustible.	24
II.2	Schéma du système de pile à combustible.	26
II.3	z_2 courbe de performance pour différents courants de pile.	33
II.4	Contrôle anticipatif statique pour système de pile à combustible.	34
II.5	Résultats de simulation dynamique du modèle de système de pile à combustible pour une série de changements de courant de pile d'entrée.	36
III.1	Schéma du modèle de système de pile à combustible PEM.	40
III.2	Comparaison des réponses du modèle sain et défectueux pour: défaut F1	48
III.3	Comparaison des réponses du modèle sain et défectueux pour: défaut F2	49
III.4	Comparaison des réponses du modèle sain et défectueux pour: défaut F3	50
III.5	Comparaison des réponses du modèle sain et défectueux pour: défaut F4	51
III.6	Comparaison des réponses du modèle sain et défectueux pour: défaut F5	52

Liste des Tableaux

II.1	Variation de l'énergie libre de Gibbs d'une pile à hydrogène à différentes températures	21
III.1	Défaux Etudiés et Simulés	41
A.1	Paramètres de la Pile (équation de la tension)	
A.2	Constantes du modèle réduit	
A.3	Paramtres physiques du modèle réduit	

Introduction Générale

Les technologies des piles à combustible ont connu un renouveau dans ces dernières années, pour plusieurs raisons. Le réchauffement climatique et la pollution atmosphérique locale causés par divers les processus d'utilisation de l'énergie ont créé une multitude de préoccupations environnementales, favorisant la développement de nouvelles technologies avec des rendements de conversion élevés et de faibles émissions, éventuellement zéro émission, en ce qui concerne les gaz à effet de serre et d'autres polluants . Le pic pétrolier en est un autre raison du regain d'intérêt pour les technologies des piles à combustible, en particulier pour les applications automobiles. Bien que ce fait soit discuté de manière très manière controversée, limitation en pétrole brut l'offre est évidente dans une perspective à long terme.

Cet aspect particulier des ressources en combustibles fossiles est fortement liée à la perspective future de le « prix du pétrole » et, par conséquent, sa compétitivité économique par rapport aux autres carburants, par exemple les carburants issus des énergies renouvelables. Dans ce contexte, l'installation de nouveaux infrastructures d'approvisionnement en carburants alternatifs, par ex. H₂, est un important complément économique et facteur politique. Une analyse dédiée a clairement montré que la conversion d'énergie dans les piles à combustible doit être à base de carburants, notamment d'hydrogène, dérivés à partir de sources renouvelables [1, 2]. En outre, la répartition géographique des réserves de pétrole suscite des inquiétudes quant à la sécurité de l'approvisionnement des industries centres à travers le monde.

Le présent travail porte sur la simulation d'une Pile à Combustible de type PEM dont l'objectif de la modélisation de quelques défauts cathodiques, il est structuré de la façon suivante :

Chapitre 1 présente l'état de l'art des piles à combustible : son histoire, son principe

de fonctionnement. Chapitre 2 sera consacré à la modélisation d'une pile à combustible saine. Ensuite, on présente la simulation du modèle de la PàC avec une commande en boucle ouverte à l'aide du logiciel MATLAB/Simulink. Chapitre 3 se concentre sur la modélisation des défauts pouvant survenir sur une pile à combustible de type PEM. Ces défauts sont modélisés comme des variations paramétriques du modèle sain de la pile. L'influence des défauts sur les différentes sorties mesurées est également étudiée. Enfin, nous cloturons le travail par une conclusion.

CHAPITRE I

Généralités sur les Systèmes Pile à Combustible et les Défauts Liés

I.1 Introduction

Les systèmes de piles à combustible représentent une percée majeure dans le domaine de la technologie énergétique, offrant une alternative prometteuse aux combustibles fossiles traditionnels. Ces systèmes exploitent des réactions électrochimiques pour convertir directement l'énergie chimique des combustibles, tels que l'hydrogène ou les hydrocarbures, en électricité, produisant ainsi de l'énergie de manière propre et efficace. [3]

À première vue, les piles à combustible semblent être une solution idéale, offrant des avantages tels qu'une faible émission de polluants et une grande efficacité énergétique. Cependant, malgré leur potentiel, ces systèmes ne sont pas sans défauts. Comprendre ces défauts est essentiel pour maximiser les avantages et minimiser les risques associés à cette technologie révolutionnaire.

Dans cette introduction, nous explorerons les généralités des systèmes de piles à combustible, mettant en lumière leurs avantages, leurs applications potentielles ainsi que les défauts et les défis auxquels ils sont confrontés. En examinant de près ces aspects, nous pourrions mieux comprendre le rôle crucial que les piles à combustible pourraient jouer dans le paysage énergétique futur, tout en identifiant les domaines nécessitant davantage de recherche et de développement pour réaliser pleinement leur potentiel. [3]

Ce chapitre vise à présenter un état de l'art complet sur les systèmes de piles à combustible PEM, en mettant particulièrement l'accent sur le système d'alimentation en air et les défauts liés. Nous explorerons les avancées technologiques dans le domaine des piles à combustible PEM, les différentes technologies PEM, leurs applications, ainsi que les enjeux et défis actuels. De plus, nous examinerons de près les types de défauts potentiels qui peuvent affecter le système d'alimentation en air, y compris les obstructions, les fuites d'air, les variations de température et les problèmes de distribution de l'air.

La compréhension de ces éléments clés est essentielle pour améliorer la fiabilité, l'efficacité et la durabilité des piles à combustible PEM, ce qui est fondamental pour leur intégration réussie dans divers domaines, de la mobilité aux applications stationnaires. Ce chapitre posera ainsi les bases pour la suite de notre étude sur la simulation de ces défauts et leur impact sur le système d'alimentation en air des piles à combustible PEM.

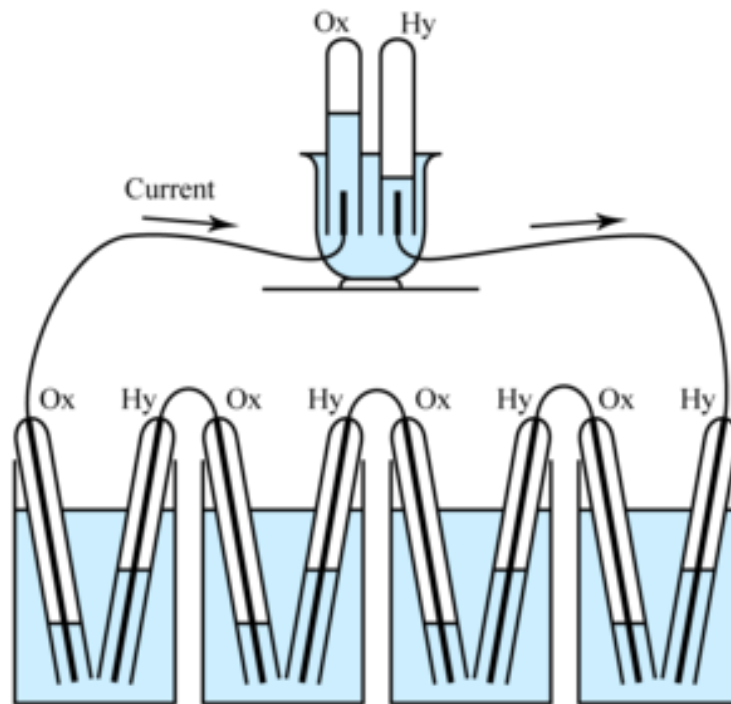


Figure I.1: Expérience de sir WILLIAM GROVE en 1839.[ref]

I.2 La pile à combustible

Une pile à combustible est une pile électrochimique capable de convertir l'énergie chimique emmagasinée dans un carburant donné en énergie électrique.

La pile à combustible de type PEM Parmi toutes les familles existantes, la pile à combustible de type PEM suscite de nombreux travaux de recherche et développement à travers le monde. La technologie évolue vite, d'autant plus qu'elle est poussée par la volonté des constructeurs des piles de proposer le plus rapidement possible des produits économiquement viables et fiables.

Nous ne nous intéresserons qu'à la pile à combustible de type PEM, parce que cette technologie semble effectivement être la plus proche de la commercialisation dans le domaine du transport. En comparaison avec d'autres types des piles à combustibles, la pile de PEM a plusieurs caractéristiques attractives comme:

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

I.3 Les piles à membrane échangeuse de protons (PEM)

Les Piles à Combustible à Membrane Échangeuse de Protons (PEMFC) sont des dispositifs électrochimiques avancés convertissant directement l'énergie chimique de l'hydrogène et de l'oxygène en électricité et en eau. Elles fonctionnent selon deux réactions électrochimiques principales. À l'anode, l'hydrogène (H_2) est oxydé pour produire des protons (H^+) et des électrons (e^-), selon l'équation :



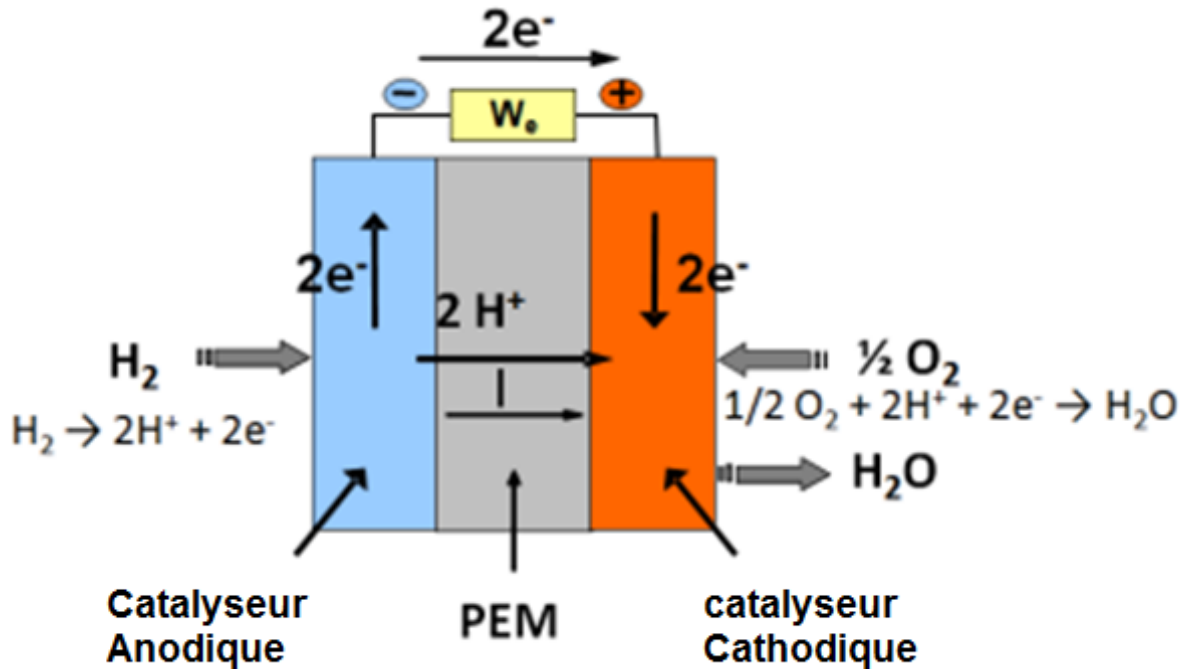


Figure I.2: Fonctionnement d'une cellule pile à combustible de type PEM

À la cathode, les protons et les électrons réagissent avec l'oxygène pour former de l'eau, comme indiqué par l'équation :



Ces réactions se produisent séparément, avec une membrane échangeuse de protons (PEM) entre elles. Cette membrane facilite le passage des protons tout en bloquant le passage des électrons, créant ainsi un circuit électrique externe pour alimenter un appareil électrique, la figure I.2 illustre le principe de fonctionnement d'une pile à combustible de type PEM.

I.4 Tension électrique de la PEMFC

La PEMFC est un type de pile à combustible qui utilise une membrane polymère conductrice de protons comme électrolyte. La tension électrique d'une PEMFC dépend de plusieurs facteurs, notamment la nature des matériaux utilisés, la température de fonctionnement, et la pression des gaz d'entrée. La tension électrique produite par une PEMFC est généralement comprise entre 0,6 et 0,9 volt pour des applications stationnaires, et peut atteindre jusqu'à

1,2 volt pour des applications portables à haute densité de puissance. La formule générale pour calculer la tension électrique d'une PEMFC est :

$$E_{cell} = E_{an} - E_{ca}$$

Où E_{cell} est la tension de la cellule, E_{anode} est le potentiel de l'anode, et $E_{cathode}$ est le potentiel de la cathode. En pratique, la tension de fonctionnement d'une PEMFC peut être influencée par des pertes ohmiques, des pertes de polarisation de concentration, et des pertes de polarisation d'activation. Ces pertes réduisent la tension réelle de la cellule par rapport à la tension théorique calculée.

Il est important de noter que pour obtenir une haute tension et des performances optimales d'un PEMFC, il est nécessaire de maintenir des conditions de fonctionnement appropriées, notamment la température, la pression et la qualité des matériaux utilisés dans la cellule, comme le montre la courbe de la figure I.3. La tension de la pile est définie en fonction de :

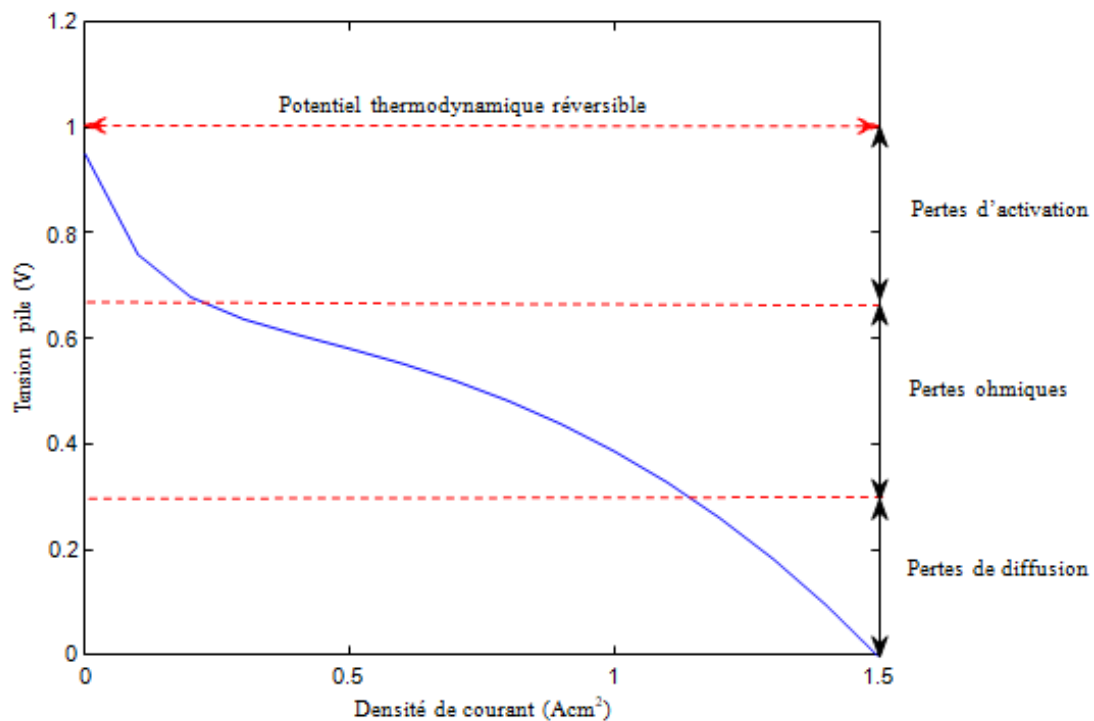


Figure I.3: Courbe de polarisation 80°C pour une pression de la cathode 1 bar

la densité de courant, la pression d'eau dans la cathode, la pression partielle de l'oxygène et

de l'hydrogene, la température de la pile et l'humidite [ref], elle est donnée par :

$$V_{fc} = E - V_{act} - V_{ohm} - V_{conc} \quad (I.3)$$

où :

- V_{fc} est la tension finale d'une cellule,
- E est la tension de Nernst,
- V_{act} est la perte d'activation,
- V_{ohm} est la perte ohmique,
- V_{conc} est la perte due à la concentration.

Cette équation donne une description complete des pertes de tension dans une cellule à combustible, en prenant en compte les divers facteurs qui affectent la performance de la cellule. [3]

I.5 Système Pile à Combustible

La pile a besoin d'un certain nombre des systèmes auxiliaires qui garantissent la meilleur condition de fonctionnement. Ces auxiliaires sont calibrés pour améliorer les performances et les conditions de fonctionnement de la pile. Le auxiliaires principaux sont : le système d'alimentation en air de la partie cathode, le système d'alimentation en hydrogène de la partie anode, le convertisseur DC/DC à la sortie de la puissance, le refroidisseur, l'humidificateur et le système de contrôle. Un système PàC typique est présenté sur la Figure I.4

Le système pile à combustible comporte de nombreux composants importants. Il y a la pile à combustible elle-même, qui se compose d'une membrane électrolytique polymère (PEM), d'électrodes et de catalyseurs. Il existe également un réservoir pour le carburant tel que l'hydrogène et un réservoir pour les oxydants tels que l'hydrogène. l'oxygène ou l'air. Le système de gestion thermique assure le contrôle de la température et le système de gestion de l'eau aide à maintenir l'humidité idéale dans la pile à combustible.[3]

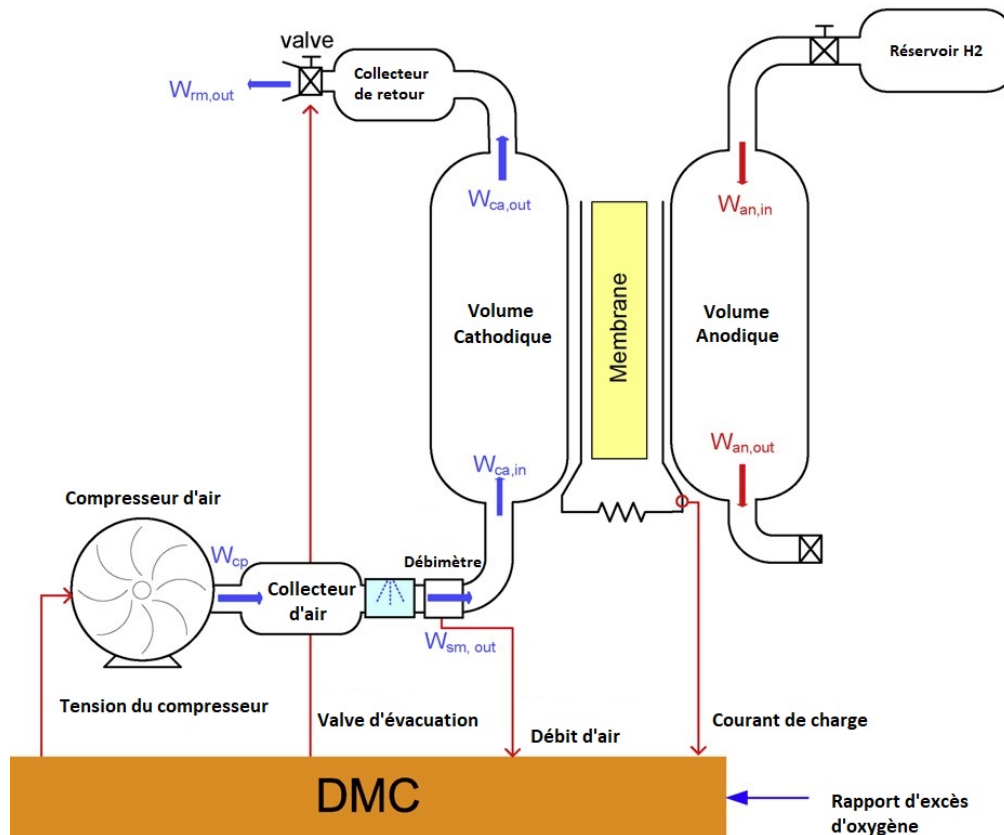


Figure I.4: Système Pile à Combustible

I.5.1 Le stack

Un stack est un empilement de cellules élémentaires connectées en série. Chaque cellule contient une membrane électrolytique, des électrodes et des catalyseurs comme montré dans la figure I.5. C'est là que se produit la réaction chimique qui génère de l'électricité à partir d'hydrogène et d'oxygène. Le stack est le composant principal du système la pile à combustible.

I.5.2 Les auxiliaries

La pile à combustible nécessite plusieurs systèmes supplémentaires pour fonctionner efficacement et offrir des performances optimales. Dans ce qui suit on donnera une description de ces systèmes auxiliaires:

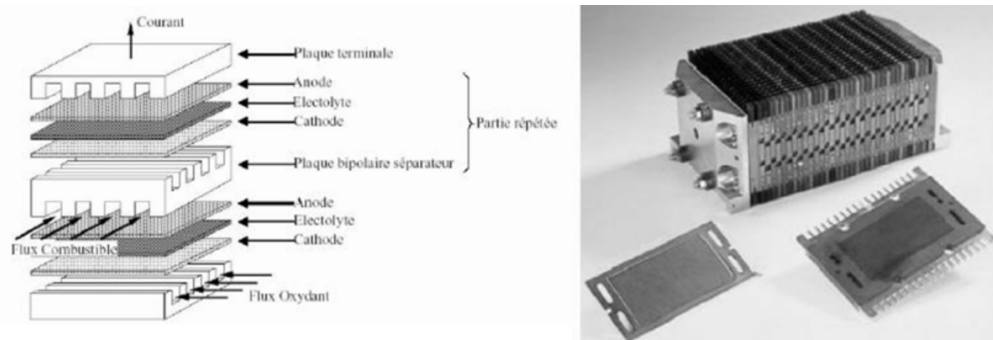


Figure I.5: Schéma d'un stack et photo d'un stack pile à combustible

I.5.2.1 Système d'alimentation en air de la partie cathode

: Ce système est responsable de fournir l'oxygène nécessaire à la réaction d'oxydation à la cathode. Il assure un apport constant d'air pour maintenir une réaction chimique efficace et une performance stable de la cathode. Les composants principaux de ce sous-système sont:

- **Compresseur**: Augmente la pression de l'air ambiant pour assurer un débit suffisant à travers la pile à combustible, favorisant ainsi une réaction d'oxydation efficace à l'anode.

- **Échangeur de Chaleur**: Préchauffe l'air en utilisant la chaleur générée par la réaction d'oxydation à l'anode, améliorant ainsi l'efficacité globale du système en récupérant la chaleur perdue.

- **Filtre à Air**: Élimine les particules et contaminants de l'air ambiant avant son entrée dans la pile à combustible, protégeant ainsi la membrane échangeuse de protons et les catalyseurs contre les dommages.

- **Humidificateur**: Ajuste l'humidité de l'air entrant dans la cathode pour maintenir des conditions de fonctionnement optimales de la PEM, prévenant le dessèchement de la membrane et assurant une conductivité ionique efficace.

- **Cathode**: Lieu où l'air humidifié réagit avec les protons et les électrons de l'anode pour produire de l'eau et de l'électricité, constituant ainsi la principale sortie de la pile à combustible.

I.5.2.2 Système d'alimentation en hydrogène de la partie anode

Un système d'alimentation en hydrogène pour la partie anode d'une pile à combustible ou d'un électrolyseur est essentiel pour assurer un fonctionnement efficace et continu. Les composants clés d'un tel système sont:

- **le réservoir d'hydrogène** : c'est là que l'hydrogène est stocké. Il peut être sous forme liquide ou gazeuse, selon les besoins et les contraintes du système.

- **Régulateur de pression** : Il contrôle la pression de l'hydrogène provenant du réservoir pour la rendre compatible avec les exigences de la pile à combustible ou de l'électrolyseur.

- **Le Filtre**: Il élimine les impuretés et les contaminants de l'hydrogène avant son introduction dans la partie anode pour éviter d'endommager les électrodes ou d'altérer les réactions chimiques.

- **Système de distribution** : Il transporte l'hydrogène du réservoir jusqu'à la partie anode de manière sécurisée et contrôlée.

- **Électrovanne ou robinet de commande** : Il contrôle le flux d'hydrogène dans le système et permet de l'ouvrir ou de le fermer selon les besoins.

- **Capteurs de sécurité**: Ils surveillent les niveaux de pression, de température et de concentration d'hydrogène pour assurer un fonctionnement sûr du système.

Ensemble, ces composants forment un système d'alimentation en hydrogène robuste et fiable pour la partie anode, garantissant un fonctionnement optimal et sécurisé de la pile à combustible ou de l'électrolyseur Comme le montre la figure [.I.6](#)

I.5.2.3 Convertisseur DC/DC à la sortie de la puissance

Un convertisseur DC/DC à la sortie de la puissance est un composant essentiel dans de nombreux systèmes électriques et électroniques, notamment dans les systèmes de piles à combustible (PAC) et d'autres sources d'énergie renouvelable.

Dans le contexte des PAC, un convertisseur DC/DC à la sortie de la puissance est souvent utilisé pour réguler la tension continue produite par la pile à combustible. Cette tension peut varier en fonction de la charge de la PAC, de la température et d'autres facteurs. Le convertisseur DC/DC assure que la tension de sortie reste constante et adaptée aux besoins du système électrique ou électronique connecté à la PAC.

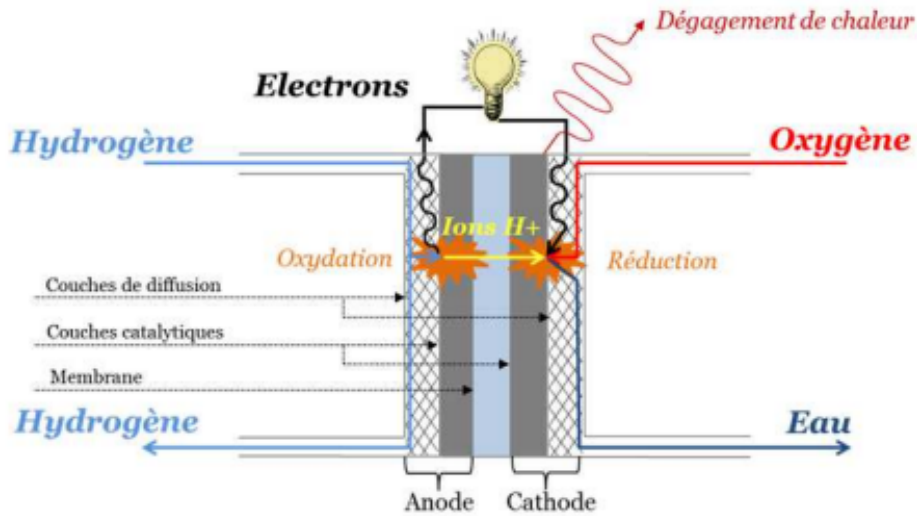


Figure I.6: schéma Système d'alimentation en hydrogène

En maintenant une tension de sortie constante, le convertisseur DC/DC assure la stabilité du système électrique ou électronique alimenté par la PAC. Cela garantit un fonctionnement fiable et optimal des dispositifs connectés, tels que les moteurs électriques, les systèmes de contrôle, ou les batteries de stockage.

Les convertisseurs DC/DC modernes sont conçus pour être hautement efficaces, minimisant les pertes d'énergie lors de la conversion de tension. Cela contribue à maximiser l'efficacité énergétique globale du système, en réduisant la consommation d'énergie et en prolongeant l'autonomie des dispositifs alimentés par la PAC la figure.I.7

I.5.2.4 Système de contrôle

Dans le contexte des piles à combustible à membrane échangeuse de protons (PEMFC) ou d'autres systèmes énergétiques avancés, le système de contrôle joue un rôle essentiel pour assurer un fonctionnement efficace, sûr et fiable. Voici quelques aspects du système de contrôle dans ce contexte :

Régulation de l'alimentation en carburant et en oxydant:

Le système de contrôle surveille et ajuste les débits de carburant (hydrogène) et d'oxygène (généralement de l'air) pour maintenir des ratios optimaux et assurer une réaction chimique efficace dans la pile à combustible.



Figure I.7: Convertisseur DC/DC de Type Boost pour pile à combustible mobile

Gestion thermique :

Le contrôle de la température est crucial pour le bon fonctionnement de la pile à combustible. Le système de contrôle surveille et ajuste les températures à l'intérieur de la pile à combustible, ainsi que dans les autres composants du système, pour éviter la surchauffe ou le refroidissement excessif.

Contrôle de l'humidité :

Comme mentionné précédemment, le maintien de l'humidité à un niveau optimal est vital pour les piles à combustible PEMFC. Le système de contrôle gère les humidificateurs et les systèmes de gestion de l'humidité pour garantir des conditions de fonctionnement appropriées.[4] Optimisation des performances : Le système de contrôle peut également effectuer des ajustements pour optimiser les performances de la pile à combustible, telles que la maximisation de l'efficacité énergétique et la minimisation des pertes.

Surveillance et diagnostic :

Le système de contrôle surveille en continu les paramètres de fonctionnement de la pile à combustible, détecte les anomalies et les pannes potentielles, et fournit des informations pour le diagnostic et la maintenance.

Sécurité :

Enfin, le système de contrôle assure la sécurité en surveillant les conditions de fonction-

nement, en détectant les situations potentiellement dangereuses et en prenant des mesures pour les prévenir. Dans l'ensemble, le système de contrôle joue un rôle central dans le fonctionnement efficace et sûr des piles à combustible PEMFC, en assurant le bon équilibre entre les différents paramètres de fonctionnement et en répondant aux besoins spécifiques de chaque application. Ces systèmes auxiliaires travaillent en synergie pour garantir une opération efficace et stable de la pile à combustible, en maximisant son rendement énergétique et en prolongeant sa durée de vie.

I.6 Les défauts de la pile PEM

Les piles à combustible (PAC) sont des dispositifs énergétiques avancés qui convertissent directement l'énergie chimique en électricité par le biais de réactions électrochimiques entre un combustible (typiquement de l'hydrogène) et un oxydant (généralement de l'oxygène). Cependant, leur fonctionnement efficace et leur durabilité sont soumis à plusieurs défis et défauts potentiels qui peuvent compromettre leur performance globale et leur fiabilité. Nous citons dans ce qui suit les défauts potentiels qui peuvent survenir dans un système pile à combustible. **Compresseur:** Un dysfonctionnement du compresseur peut entraîner une diminution du débit d'air nécessaire à la réaction d'oxydation à l'anode de la pile à combustible, réduisant ainsi la puissance de sortie et l'efficacité globale du système.

Collecteurs d'Air et de Retour: Des fuites ou des obstructions dans les collecteurs d'air ou de retour peuvent perturber le flux d'air vers et depuis la pile à combustible. Cela peut déséquilibrer les pressions nécessaires à une distribution uniforme de l'air et affecter négativement les performances générales du système.

Système de Distribution de Combustible: Des problèmes dans le système de distribution de combustible, comme des fuites ou des régulateurs défectueux, peuvent altérer la quantité et la qualité du combustible disponible pour la réaction électrochimique, entraînant une baisse de l'efficacité et de la stabilité de la PAC.

Problèmes de Gestion Thermique: Une gestion thermique inefficace peut conduire à une surchauffe ou à une sous-chauffe des composants de la pile à combustible. Cela peut non seulement réduire l'efficacité énergétique, mais aussi causer des dommages irréversibles aux

matériaux et composants de la PAC.

Contamination des Catalyseurs: Les catalyseurs présents dans la PAC sont sensibles à la contamination par des impuretés présentes dans les combustibles ou l'air. Une contamination accrue peut réduire l'activité catalytique, affectant ainsi directement les performances électrochimiques et la durabilité de la pile.

Durabilité de la Membrane Échangeuse de Protons (PEM): La membrane PEM est essentielle pour le transport des protons dans la pile à combustible. Une dégradation prématurée de la membrane due à des conditions de fonctionnement extrêmes ou à une contamination peut entraîner une diminution de l'efficacité et une perte de durabilité de la PAC.

Défauts du Collecteur d'Air: Des défauts dans le collecteur d'air, tels que des fissures ou des joints défectueux, peuvent causer des fuites d'air. Cela compromet le flux d'air nécessaire aux réactions chimiques à l'intérieur de la pile à combustible, affectant ainsi ses performances et sa stabilité opérationnelle.

I.7 Conclusion

Les piles à combustible, notamment les piles à membrane échangeuse de protons (PEMFC), représentent une technologie prometteuse pour la conversion directe de l'énergie chimique en électricité, offrant des avantages tels que des émissions réduites et une haute efficacité énergétique. Cependant, elles sont sujettes à divers défauts opérationnels tels que les problèmes de compresseur, les fuites dans les collecteurs d'air, la gestion thermique inadéquate, et la fragilité de la membrane PEM. Ces défis nécessitent une gestion attentive pour garantir des performances optimales et une durabilité accrue.

Le prochain chapitre abordera la modélisation des piles à combustible, visant à comprendre leur comportement et à optimiser leur fonctionnement. Cette approche permettra d'analyser en profondeur les interactions physico-chimiques et les paramètres de contrôle, facilitant ainsi la modélisation des défauts pour bien comprendre le fonctionnement des piles à combustible en présence des défauts.

CHAPITRE II

Modélisation du système d'alimentation en air de la pile à combustible PEM

Comme introduit au Chapitre ??, les objectifs du contrôle des systèmes PEMFC sont de réduire la consommation de carburant tout en prévenant la détérioration des performances, le manque d'oxygène et, éventuellement, les dommages irréversibles aux membranes polymères. Cependant, le système PEMFC comporte plusieurs variables à réguler de manière spécifique, telles que la quantité d'hydrogène à l'anode, la quantité d'air injectée par le compresseur dans la cathode, la quantité d'eau produite, la température générée par la réaction chimique et l'énergie fournie par le système de pile à combustible. Ces sous-processus sont fortement interconnectés, ce qui rend l'ensemble du système hautement non linéaire et difficile à contrôler. Dans ce contexte, des modèles de système de pile à combustible adaptés à la conception de stratégies de contrôle non linéaires sont nécessaires.

II.1 Revue de la Modélisation des Systèmes de Piles à Combustible

Les modèles développés dans la littérature peuvent être organisés en trois grandes catégories : les modèles de performance des piles à combustible, les modèles de système de pile à combustible à l'état stationnaire et les modèles de système de pile à combustible dynamique. Les principaux objectifs des deux premières catégories de modèles sont de concevoir les composants de la pile à combustible et de déterminer les points de fonctionnement de la pile à combustible [5]. Bien que ces modèles ne soient pas adaptés aux fins de contrôle, ils permettent d'obtenir les caractéristiques de polarisation du système de pile à combustible, qui sont définies par une relation entre la tension et le courant du système de pile à combustible pour des paramètres de pile à combustible fixes [6]. Dans la plupart des modèles, le courant du système de pile à combustible est considéré comme une entrée du système, et la tension électrique du système de pile à combustible est considérée comme une sortie [7].

Les deux dernières décennies ont vu le développement de nombreux modèles dynamiques de systèmes de piles à combustible, mais seuls quelques-uns sont adaptés à une utilisation dans la conception de contrôles non linéaires. Un modèle adapté doit être capable de prédire à la fois le comportement stationnaire et transitoire du système de pile à combustible dans une large gamme de conditions de fonctionnement. Il convient de noter que seuls les modèles les plus pertinents et adaptés à l'étude du contrôle sont cités.

Jurado [8] a établi un modèle dynamique linéaire de l'empilement SOFC qui ne considère que la puissance électrique de sortie. Le modèle est réduit à des fonctions de transfert à l'aide d'algorithmes d'identification afin de le simplifier et ainsi faciliter son contrôle. La nature linéaire du modèle rend les résultats obtenus plus critiques.

Lachaize et al. [9] réunissent les phénomènes électrochimiques et thermiques. Cependant, ils étudient chaque partie de la cellule séparément (anode, cathode et membrane) sans prendre en compte le couplage et l'interférence entre les différents phénomènes. De plus, la linéarisation du modèle pour simplifier le contrôle rend les résultats obtenus encore moins précis.

Une cellule PEM typique est modélisée en détail par Phatapathi et al. [10]. Le modèle

décrit le comportement transitoire des phénomènes thermiques et fluidiques ainsi que l'effet de la capacité de double couche. Le modèle est ensuite linéarisé pour simplifier l'étude. Cependant, Yerramalla et al. [11] ont simulé le modèle sous forme non linéaire et linéaire. Les résultats du travail [11] ont montré une différence majeure entre le modèle non linéaire et son linéarisé.

Une autre approche pour la modélisation des piles à combustible est l'utilisation de circuits équivalents utilisant des éléments électriques, tels que des résistances, des capacités ou des inductances pour représenter le comportement du système. Qi et al. [12] ont présenté un circuit électrique équivalent complet d'une cellule SOFC malgré quelques simplifications prises en compte. Leur modèle est complété et amélioré par un deuxième travail intégrant les phénomènes de transfert de chaleur à travers les différents composants de la cellule. Le problème de ce modèle est de ne pas prendre en compte l'influence de l'humidification de la membrane sur les pertes ohmiques.

Dans le modèle de Maldonado [13], les problèmes de séchage de la membrane et d'inondation des canaux de distribution de gaz sont discutés. Ce modèle calcule la consommation de gaz en traitant le transport de l'eau à travers la membrane. Il suppose que la zone active est réduite à une interface de zéro épaisseur entre les zones d'électrode et de membrane. Cette hypothèse semble valable uniquement pour les petites cellules, ce qui limite l'intérêt du modèle.

Kang [14] a développé un modèle pour le système PEMFC, ce modèle intègre l'évolution dynamique des phénomènes de transfert de chaleur et de transport de l'eau. Il est basé sur une approche simplifiée d'une représentation géométrique tridimensionnelle de la cellule. Cependant, le modèle ne considère pas l'évolution dynamique des quantités électriques telles que le potentiel électrochimique.

Cependant, bon nombre de ces modèles n'ont pas été validés expérimentalement, et il manque encore des études rigoureuses sur l'identification des paramètres et leur association avec les variables de performance. À cette fin, le modèle développé par J. Pukrushpan et al. [6] a été choisi, car il s'agit de l'un des modèles les plus complets et précis disponibles dans la littérature ouverte. Le modèle de Pukrushpan et al. intègre les comportements transitoires importants pour l'analyse et la conception du contrôle. Des modèles des différents composants auxiliaires, à savoir un compresseur, des collecteurs, un refroidisseur d'air et

un humidificateur, sont associés au modèle de l'empilement de piles à combustible, qui est composé de quatre sous-modèles interactifs, à savoir les modèles de tension de l'empilement, de flux de cathode, de flux d'anode et d'hydratation de la membrane. Des équations de flux, la continuité de masse, les bilans de masse et d'énergie, les relations électrochimiques, les transferts d'eau et d'azote dans la membrane et la thermodynamique des piles à combustible ainsi que d'autres phénomènes physiques sont intégrés pour créer ce modèle. La courbe de polarisation dans ce modèle est fonction du courant de l'empilement, de la température de l'empilement, de la vapeur d'eau, des pressions partielles d'hydrogène et d'oxygène et de l'humidité de la membrane.

Dans la suite de ce chapitre, une présentation d'un modèle de PEMFC à l'état stationnaire est donnée. Ce modèle est utile pour calculer la tension de l'empilement PEMFC. Ensuite, une présentation du modèle dynamique réduit basé sur les travaux de [15] et [16] est réalisée. Enfin, une analyse à l'état stationnaire du système PEMFC est effectuée afin de définir la valeur optimale du point de consigne du flux d'air, appelé Ratio d'Excess Oxygène (OER), qui maximise la puissance nette.

II.2 Modèle de PEMFC à l'état stationnaire

Le modèle à l'état stationnaire peut être utilisé pour prédire la tension de sortie de la pile à combustible v_{fc} en fonction de la densité de courant du système de pile à combustible, de la température de la cellule, des pressions des gaz réactifs et des produits, et de l'humidité de la membrane [6]. L'expression de la tension de la pile à combustible est calculée sur la base de la tension de circuit ouvert de Nernst avec des pertes d'activation, ohmiques et de concentration [6]. La tension de circuit ouvert de Nernst et les trois principaux types de pertes dans le système de pile à combustible sont discutés plus en détail dans les sous-sections suivantes.

II.2.1 Tension de circuit ouvert de Nernst

Les piles à combustible convertissent directement l'énergie potentielle chimique en énergie électrique par une réaction électrochimique. L'énergie électrique libérée par la pile à combustible peut être calculée à partir du changement de l'énergie libre de Gibbs (ΔG), c'est-à-

dire la différence entre l'énergie libre d



the change in the Gibbs free energy ΔG is expressed by [6]

$$\Delta G = \Delta G^0 - RT_{fc} \ln \left[\frac{p_{H_2} p_{O_2}^{\frac{1}{2}}}{p_{H_2O}} \right], \quad (\text{II.2})$$

où ΔG^0 est le changement de l'énergie libre de Gibbs à pression standard (1 bar), qui à son tour varie avec la température de la pile à combustible, T_{fc} , en Kelvin. R est la constante universelle pour les gaz parfaits, p_{H_2} est la pression partielle de l'hydrogène, p_{O_2} est la pression partielle de l'oxygène, et p_{H_2O} est la pression partielle de la vapeur d'eau. Les valeurs des changements de l'énergie libre de Gibbs, ΔG^0 , de la réaction dans (II.1) pour une pression standard à différentes températures de réaction sont données dans le Tableau (II.1). La valeur de ΔG^0 est négative, ce qui signifie que l'énergie est libérée par la réaction.

Si le processus électrochimique dans la cellule était "réversible", toute l'énergie libre de Gibbs, à température et pression constantes, pourrait être convertie en énergie électrique et ainsi définir un potentiel standard [6].

$$E^0 = \frac{-\Delta G^0}{\bar{n}F}, \quad (\text{II.3})$$

où E^0 est le potentiel idéal de la cellule, qui est le potentiel maximum théoriquement atteignable. \bar{n} est le nombre d'électrons et F est la constante de Faraday. Le nombre d'électrons pour une réaction de cellule $H_2 - O_2$ est de 2, donc (II.3) pour le potentiel idéal de la pile à combustible devient

$$E^0 = \frac{-\Delta G^0}{2F} \quad (\text{II.4})$$

Ce potentiel, E^0 , est correct pour la température et la pression standard. Cependant, les PEMFC fonctionnent généralement à des températures plus élevées et, puisque l'énergie libre de Gibbs est une fonction de la température, cela réduit le potentiel de la cellule dans une certaine mesure. Par conséquent, en utilisant (II.2), le potentiel théorique réel d'une PEMFC peut être écrit comme suit

$$E = \frac{-\Delta G}{2F} = \frac{-\Delta G^0}{2F} + \frac{RT_{fc}}{2F} \ln \left[\frac{p_{H_2} p_{O_2}^{\frac{1}{2}}}{p_{H_2O}} \right]. \quad (\text{II.5})$$

Tableau II.1: Variation de l'énergie libre de Gibbs d'une pile à hydrogène à différentes températures

Forme du produit de l'eau	Température K	ΔG^0 (kJ/mole)
Liquide	298.15	-237.2
Liquide	353.15	-228.2
Gaz	353.15	-226.1
Gaz	373.15	-225.2
Gaz	473.15	-220.4
Gaz	673.15	-210.3
Gaz	873.15	-199.6
Gaz	1073.15	-188.6
Gaz	1273.15	-177.4

Le potentiel E dans (II.5) est appelé la tension de circuit ouvert "Nernst" d'une PEMFC. En pratique, le processus de la pile à combustible n'est pas réversible, une partie de l'énergie chimique est convertie en énergie thermique, et la tension de Nernst est inférieure à celle prédite par (II.5). En fait, le terme $-\Delta G^0/2F$ varie par rapport à son potentiel de référence dans des conditions standard ($E^0 = 1.229$ volts) en fonction de la température [17]

$$\frac{-\Delta G^0}{2F} = 1.229 + (T_{fc} - T_0) \left(\frac{\Delta S^0}{2F} \right), \quad (\text{II.6})$$

où T_0 est la température standard (298.15 °K), et ΔS^0 est le changement d'entropie. Ainsi, (II.6) peut être réécrit comme suit

$$\frac{-\Delta G^0}{2F} = 1.229 - \frac{298.15 \times \Delta S^0}{2F} + \left(\frac{\Delta S^0}{2F} \right) T_{fc}. \quad (\text{II.7})$$

En utilisant les valeurs thermodynamiques standard concernant les changements d'entropie, (II.7) est encore développé et donne [17]

$$E = 1.229 - 0.85 \times 10^{-3}(T_{fc} - 298.15) + 4.3085 \times 10^{-5}T_{fc} \left[\ln(p_{H_2}) + \frac{1}{2} \ln(p_{O_2}) \right]. \quad (\text{II.8})$$

Lorsque la pile à combustible fonctionne, la tension réelle de la pile à combustible v_{fc} chute par rapport à la tension de circuit ouvert de Nernst, E , et cette chute de tension est

due à des pertes, qui sont proportionnelles au courant tiré par le circuit électrique (Figure II.1(d)). Ce phénomène est connu sous le nom de polarisation et permet d'identifier le point de fonctionnement du système PEMFC. Il existe trois principaux types de pertes : la perte d'activation v_{act} , la perte ohmique v_{ohm} et la perte de concentration v_{conc} . Ces aspects sont plus discutés par la suite.

II.2.2 Perte d'activation

La perte d'activation ou surtension d'activation, illustrée à la Figure II.1(a), est la tension requise pour former et rompre les liaisons chimiques, à la fois à l'anode et à la cathode [18]. De plus, une certaine quantité de tension est utilisée dans le transfert d'électrons, également appelée densité de courant d'échange, vers et depuis les électrodes. Il convient de noter que les réactions à l'anode sont très rapides par rapport à celles à la cathode, c'est pourquoi la surtension anodique est parfois négligée [19]. La réduction des pertes d'activation peut être réalisée en augmentant la surface active des catalyseurs, en augmentant la température et en augmentant la concentration des réactifs. La relation entre la perte d'activation et la densité de courant peut être déterminée à partir de l'équation de Tafel [18]

$$v_{act} = \frac{RT_{fc}}{2\bar{\alpha}F} \ln\left(\frac{i}{i_0}\right), \quad (\text{II.9})$$

où la constante $\bar{\alpha}$ est le coefficient de transfert de charge et i_0 est la densité de courant d'échange. i est la densité de courant, qui est définie comme le courant de la pile I_{st} (A), par la surface active de la cellule, A_{fc} (cm²).

$$i = \frac{I_{st}}{A_{fc}}. \quad (\text{II.10})$$

Il convient de noter que cette équation est exacte uniquement pour $i > i_0$, ce qui peut poser des problèmes de simulation. Par conséquent, une fonction similaire qui est correcte pour toute la gamme de i est préférée

$$v_{act} = v_0 + v_a \left(1 - e^{-b_1 i}\right), \quad (\text{II.11})$$

où v_0 est la chute de tension à une densité de courant nulle, et v_a et b_1 sont des constantes qui dépendent de la température et de la pression partielle d'oxygène [20, 21]. Les expressions de v_0 et v_a sont définies dans l'Annexe ??.

II.2.3 Perte ohmique

La perte ohmique, illustrée à la Figure II.1(b), est due à la résistance de la membrane au transfert de protons, et à la résistance des électrodes au transfert d'électrons. Les pertes ohmiques peuvent être surmontées en utilisant des électrodes ayant une conductivité électronique élevée et une faible épaisseur de membrane qui présente une haute propriété de transfert de protons. La formulation de ce type de pertes est présentée ci-dessous

$$v_{ohm} = iR_{ohm}, \quad (\text{II.12})$$

où R_{ohm} représente la résistance électrique interne de la cellule et dépend fortement de la température et de l'humidité de la membrane [22]. La résistance ohmique de la membrane Nafion 117 est une fonction de la conductivité de la membrane, σ_m , et de l'épaisseur de la membrane, t_m selon l'expression suivante [23]:

$$R_{ohm} = \frac{t_m}{\sigma_m}, \quad (\text{II.13})$$

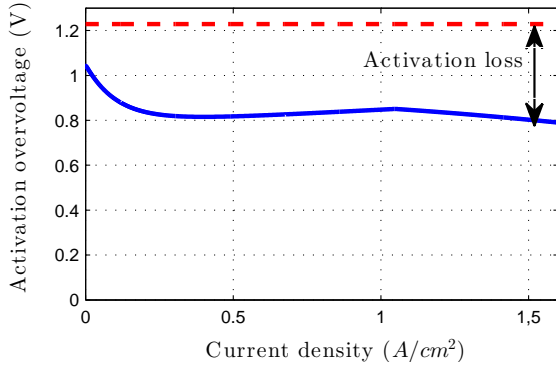
La conductivité de la membrane, σ_m , est une fonction de la teneur en eau de la membrane, λ_m , et est définie par l'équation suivante [6]:

II.2.4 Tension terminale de la pile à combustible

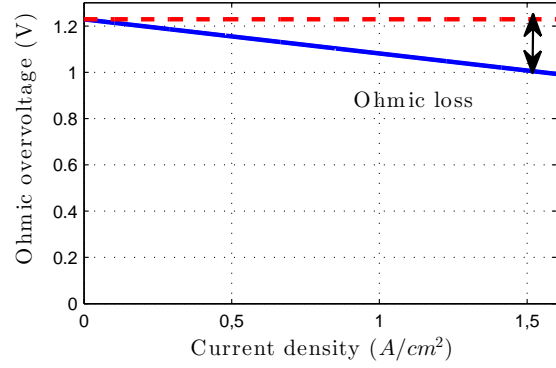
La tension terminale de la pile à combustible est égale à la différence entre la tension de circuit ouvert de Nernst du système de pile à combustible et les différents types de pertes (activation, ohmique et de concentration). La tension terminale de la pile à combustible est exprimée par l'équation suivante :

$$\begin{aligned} v_{fc} &= E - v_{act} - v_{ohm} - v_{conc} \\ &= E - v_0 - v_a \left(1 - e^{-b_1 i}\right) - iR_{ohm} - i \left(b_2 \frac{i}{i_{max}}\right)^{b_3}. \end{aligned} \quad (\text{II.14})$$

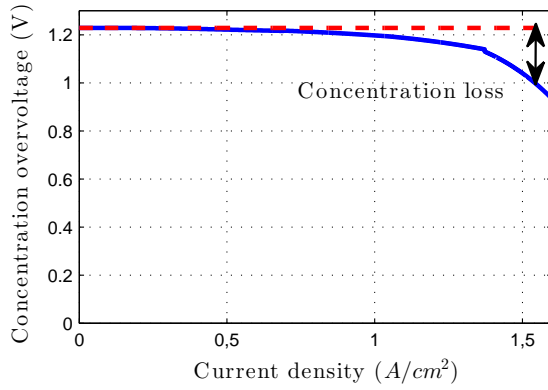
La courbe de polarisation de la PEMFC résultante est représentée à la Figure II.1(d). On peut voir que la chute de tension est significativement plus importante aux faibles et aux forts densités de courant. Aux faibles densités de courant, la perte d'activation est prédominante et aux fortes densités de courant, la perte de concentration est une cause majeure de pertes.



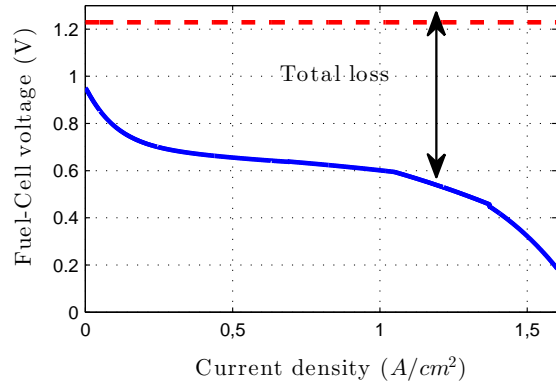
(a) Pertes d'activation



(b) Pertes ohmiques



(c) Pertes de concentration



(d) Pertes totales

Figure II.1: Chutes de tension dues aux différents types de pertes dans la pile à combustible.

La perte ohmique n'est rien d'autre que la résistance de la cellule et donc avec l'augmentation du courant de la cellule, la chute de tension augmente proportionnellement (Figure II.1(b)). Toutes les valeurs numériques des paramètres se trouvent dans le Tableau A.1 en Annexe ??.

La tension de la pile V_{st} est calculée comme la somme des tensions individuelles des piles à combustible

$$V_{st} = n v_{fc}, \quad (\text{II.15})$$

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

$$P_{st} = I_{st} V_{st}. \quad (\text{II.16})$$

II.3 Modèle dynamique d'alimentation en air de la PEMFC

Pour concentrer l'étude sur le sous-processus d'alimentation en air (oxygène), qui a une grande influence sur l'efficacité globale du système PEMFC, le modèle d'état-espace du neuvième ordre proposé par Pukrushpan et al. [6] a été simplifié en un modèle d'état-espace du quatrième ordre par [16] sous les hypothèses suivantes :

- Tous les gaz obéissent à la loi des gaz parfaits ;
- Le système de pile à combustible est alimenté en hydrogène de haute pureté sous pression et la commande d'alimentation en hydrogène est parfaite pour suivre la pression anode à la pression cathode ;
- La température de la pile à combustible, T_{fc} , est bien contrôlée et maintenue constante à 353,15 K ;
- La température de l'écoulement à l'intérieur de la cathode est égale à la température de la pile ;
- Les flux de réactif d'entrée sont humidifiés de manière cohérente et rapide ;
- L'eau à l'intérieur de la cathode est uniquement à l'état de vapeur et toute eau supplémentaire à l'état liquide est évacuée des canaux ;
- L'engorgement de la couche de diffusion des gaz est négligé ;
- Les variations spatiales sont négligées, il est supposé que le canal d'écoulement et la couche de diffusion des gaz sont regroupés en un seul volume ;
- La dynamique de l'humidité et de la température est négligée car elle est plus lente que la dynamique de l'écoulement d'air.

De plus, une validation expérimentale a été réalisée dans [18] à travers un banc d'essai Hardware In the Loop (HIL) qui se compose d'un système d'alimentation en air de PEMFC physique, basé sur un compresseur à vis commercial et un émulateur PEMFC en temps réel.

Here is the translation of the provided text into French:

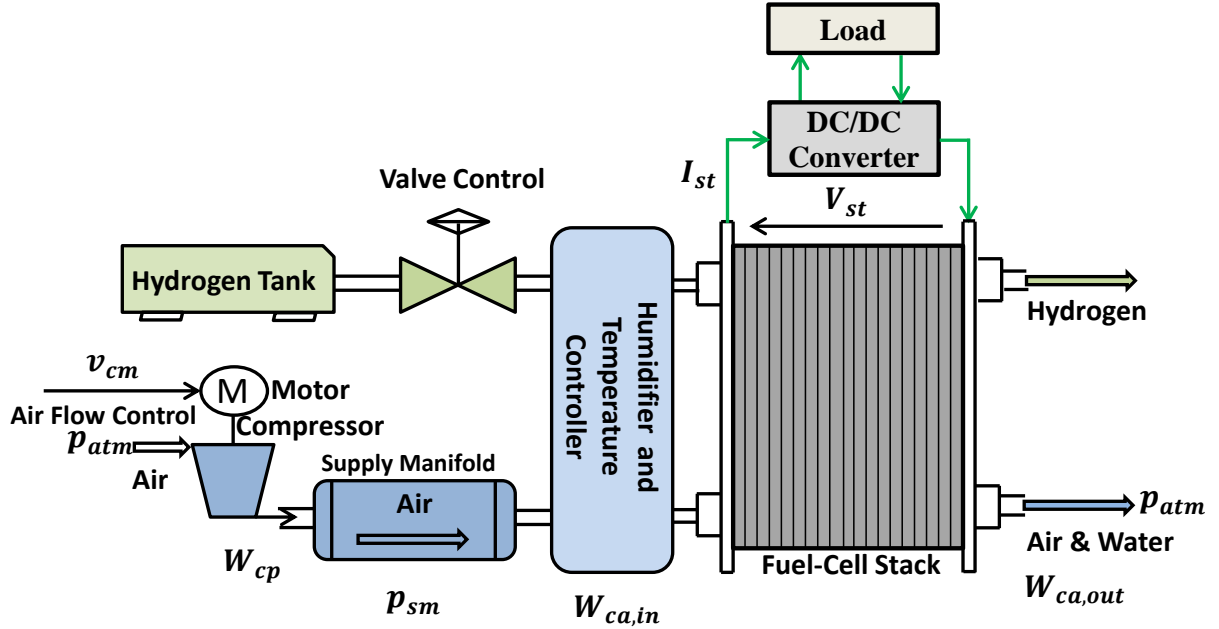


Figure II.2: Schéma du système de pile à combustible.

II.3.1 Modèle de compresseur d'air

Le compresseur d'air se compose d'un turbocompresseur de 14 kW et d'un moteur à courant continu. Il est utilisé pour fournir de l'air du côté cathode par le collecteur d'admission. Les entrées du modèle comprennent la pression d'air d'admission $p_{cp,in}$, sa température $T_{cp,in}$, la tension du moteur du compresseur v_{cm} et la pression du collecteur d'alimentation p_{sm} . L'air d'admission est atmosphérique et sa pression et sa température sont égales à $p_{atm} = 101325$ Pa et $T_{atm} = 298,15$ K, respectivement.

L'état dynamique dans le modèle est la vitesse de rotation de l'arbre moteur dans le compresseur ω_{cp} , qui est présentée par l'équation suivante

$$\frac{d\omega_{cp}}{dt} = \frac{1}{J_{cp}} (\tau_{cm} - \tau_{cp}), \quad (\text{II.17})$$

où J_{cp} désigne l'inertie du compresseur et du moteur ($\text{kg} \times \text{m}^2$), τ_{cm} est le couple moteur du compresseur ($\text{N} \times \text{m}$) et τ_{cp} est le couple nécessaire pour entraîner le compresseur ($\text{N} \times \text{m}$), qui

$$\begin{aligned} \tau_{cm} &= \eta_{cm} \frac{k_t}{R_{cm}} (v_{cm} - k_v \omega_{cp}), \\ \tau_{cp} &= \frac{C_p T_{atm}}{\eta_{cp} \omega_{cp}} \left[\left(\frac{p_{sm}}{p_{atm}} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} - 1 \right] W_{cp}, \end{aligned} \quad (\text{II.18})$$

où k_t , R_{cm} et k_v sont des constantes du moteur, η_{cm} est l'efficacité mécanique du moteur, C_p et γ correspondent aux capacités thermiques spécifiques de l'air, η_{cp} est l'efficacité du compresseur et W_{cp} est le débit massique du compresseur. Ce dernier est déterminé par la vitesse de rotation du moteur compresseur et la pression de l'air dans le collecteur d'alimentation, qui a été approximée par l'équation suivante “

$$W_{cp} = \frac{W_{cp}^{max} \omega_{cp}}{\omega_{cp}^{max}} \left(1 - \exp \left(\frac{-r \left(s + \frac{\omega_{cp}^2}{q} - p_{sm} \right)}{s + \frac{\omega_{cp}^2}{q} - p_{sm}^{min}} \right) \right), \quad (\text{II.19})$$

avec \exp étant la fonction exponentielle, $r = 15$, $q = 462,25 \text{ rad}^2/(\text{s}^2\text{Pa})$, $\omega_{cp}^{max} = 11500 \text{ rad/s}$, $p_{sm}^{min} = 50000 \text{ Pa}$, $s = 100000 \text{ Pa}$ et $W_{cp}^{max} = 0,0975 \text{ kg/s}$.

La puissance du moteur du compresseur P_{cp} est calculée en utilisant le couple du compresseur τ_{cm} et sa vitesse de rotation ω_{cp}

$$P_{cp} = \frac{v_{cm}}{R_{cm}} (v_{cm} - k_v \omega_{cp}). \quad (\text{II.20})$$

Cette puissance peut être fournie directement par la pile à combustible ou par une source d'alimentation auxiliaire, comme des batteries ou des supercondensateurs.

II.3.2 Modèle du collecteur d'approvisionnement

Le collecteur d'approvisionnement en air est associé à des tuyaux et des raccords entre le compresseur et la cathode de la pile à combustible (illustré à la figure II.2). En appliquant le principe de conservation de la masse, la dynamique de la pression de l'air dans le collecteur d'approvisionnement dépend du débit d'entrée dans le collecteur d'approvisionnement W_{cp} , du débit de sortie du collecteur d'approvisionnement $W_{sm,out}$ et de la température du débit du compresseur T_{cp} .

$$\frac{dp_{sm}}{dt} = \frac{\gamma R T_{cp}}{M_{a,atm} V_{sm}} (W_{cp} - W_{ca,in}), \quad (\text{II.21})$$

où V_{sm} est le volume du collecteur d'approvisionnement, $M_{a,atm}$ est la masse molaire de l'air atmosphérique et T_{cp} est la température de l'air sortant du compresseur, qui est calculée en fonction de [24] avec une carte de l'efficacité du compresseur η_{cp} , c'est-à-dire,

$$T_{cp} = T_{atm} + \frac{T_{atm}}{\eta_{cp}} \left[\left(\frac{p_{sm}}{p_{atm}} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} - 1 \right]. \quad (\text{II.22})$$

La relation entre le débit de sortie du collecteur d’approvisionnement et la chute de pression peut être simplifiée en une équation de buse linéaire en raison de la petite différence de pression entre la cathode p_{ca} et le collecteur d’approvisionnement p_{sm}

$$W_{sm,out} = k_{sm,out} (p_{sm} - p_{ca}), \quad (\text{II.23})$$

où $k_{sm,out}$ est la constante de débit de sortie du collecteur d’approvisionnement, le débit sortant du collecteur d’approvisionnement entre dans la cathode de la pile à combustible et donc, le débit de sortie du collecteur d’approvisionnement $W_{sm,out}$ est appelé débit d’entrée de cathode $W_{ca,in}$.

II.3.3 Modèle de débit de cathode

Le modèle de débit de masse de la cathode décrit le comportement de l’écoulement d’air à l’intérieur de la cathode. L’air est un mélange de gaz, constitué principalement de 78% d’azote, 21% d’oxygène, et d’autres gaz en moins de 1% comme l’argon, le monoxyde de carbone, le dioxyde de carbone, le néon, etc. Seuls les principaux gaz seront pris en compte pour la modélisation de la partie cathodique, c’est-à-dire l’azote et l’oxygène. Le modèle est généré en utilisant les propriétés thermodynamiques de l’air et le principe de conservation de la masse [6]. En raison de la continuité de la masse de l’oxygène et de l’azote à l’intérieur du volume de la cathode et de la loi des gaz parfaits, la pression partielle de l’oxygène et de l’azote à l’intérieur de la cathode est donnée par

$$\begin{aligned} \frac{dp_{O_2}}{dt} &= \frac{RT_{fc}}{M_{O_2}V_{ca}} (W_{O_2,in} - W_{O_2,out} - W_{O_2,rcr}), \\ \frac{dp_{N_2}}{dt} &= \frac{RT_{fc}}{M_{N_2}V_{ca}} (W_{N_2,in} - W_{N_2,out}), \end{aligned} \quad (\text{II.24})$$

où $W_{O_2,in}$ et $W_{N_2,in}$ sont respectivement le débit massique d’oxygène et d’azote entrant dans la cathode, $W_{O_2,out}$ et $W_{N_2,out}$ sont respectivement le débit massique d’oxygène et d’azote sortant de la cathode, $W_{O_2,rcr}$ est le taux d’oxygène réagi, V_{ca} est le volume de la cathode et M_{O_2} , M_{N_2} sont respectivement la masse molaire de l’oxygène et de l’azote.

Le débit massique d’oxygène $W_{O_2,in}$ et d’azote $W_{N_2,in}$ entrant est calculé à partir du débit d’entrée de la cathode $W_{ca,in}$ comme suit :

$$\begin{aligned} W_{O_2,in} &= \frac{x_{O_2,atm}}{1 + \omega_{atm}} W_{ca,in}, \\ W_{N_2,in} &= \frac{1 - x_{O_2,atm}}{1 + \omega_{atm}} W_{ca,in}, \end{aligned} \quad (II.25)$$

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

$$x_{O_2,atm} = \frac{y_{O_2,atm} M_{O_2}}{M_{a,atm}} = \frac{y_{O_2,atm} M_{O_2}}{y_{O_2,atm} M_{O_2} + (1 - y_{O_2,atm}) M_{N_2}}, \quad (II.26)$$

avec la fraction molaire d'oxygène $y_{O_2,atm} = 0.21$ pour l'air d'entrée et le rapport d'humidité de l'air d'entrée ω_{atm} est exprimé comme

$$\omega_{atm} =, \frac{M_v}{M_{a,atm}} \frac{\phi_{atm} p_{sat}(T_{fc})}{p_{atm} - \phi_{atm} p_{sat}(T_{fc})}, \quad (II.27)$$

où M_v est la masse molaire de la vapeur, ϕ_{atm} est l'humidité relative aux conditions ambiantes (sa valeur est fixée à 0.5) et $p_{sat}(T_{fc})$ est la pression de saturation de la vapeur. La pression de saturation p_{sat} dépend de la température et est déterminée à partir de l'équation donnée dans [25] comme

$$\log_{10}(p_{sat}), =, -1.69 \times 10^{-10} T_{fc}^4 + 3.85 \times 10^{-17} T_{fc}^3 - 3.39 \times 10^{-4} T_{fc}^2 + 0.143 T_{fc} - 20.92, \quad (II.28)$$

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

Comme mentionné ci-dessus, le débit d'entrée de la cathode $W_{ca,in}$ est supposé être similaire au débit de sortie du collecteur d'alimentation $W_{sm,out}$

(??)

$$W_{ca,in} = k_{sm,out} (p_{sm} - p_{ca}), \quad (II.29)$$

où la pression de la cathode p_{ca} est supposée être invariante dans l'espace, ce qui est donné par

$$p_{ca}, =, p_{O_2} + p_{N_2} + p_{sat}(T_{fc}), \quad (II.30)$$

où p_{O_2} , p_{N_2} et $p_{sat}(T_{fc})$ sont respectivement les pressions partielles d'oxygène, d'azote et de vapeur.

Les débits massiques de sortie de l'oxygène $W_{O_2,out}$ et de l'azote $W_{N_2,out}$ sont calculés en fonction du débit massique de sortie de la cathode $W_{ca,out}$ de la manière suivante:

$$\begin{aligned} W_{O_2,out} &= \frac{x_{O_2,ca}}{1 + \omega_{ca,out}} W_{ca,out}, \\ W_{N_2,out} &= \frac{1 - x_{O_2,ca}}{1 + \omega_{ca,out}} W_{ca,out}, \end{aligned} \quad (\text{II.31})$$

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

$$\begin{aligned} x_{O_2,ca} &= \frac{y_{O_2,ca} M_{O_2}}{y_{O_2,ca} M_{O_2} + (1 - y_{O_2,ca}) M_{N_2}}, \\ \omega_{ca,out} &= \frac{M_v}{y_{O_2,ca} M_{O_2} + (1 - y_{O_2,ca}) M_{N_2}} \frac{p_{sat}}{p_{O_2} - p_{N_2}}. \end{aligned} \quad (\text{II.32})$$

Contrairement au flux d'entrée, la fraction molaire d'oxygène dans le flux de sortie de la cathode $y_{O_2,ca}$ n'est pas constante car l'oxygène est réagi, ce qui est calculé comme suit:

$$y_{O_2,ca} = \frac{p_{O_2}}{p_{O_2} + p_{N_2}}. \quad (\text{II.33})$$

En utilisant (II.32) et (II.33), (II.31) peut être réécrit comme suit :

$$W_{O_2,out} = \frac{M_{O_2} p_{O_2}}{M_{O_2} p_{O_2} + M_{N_2} p_{N_2} + M_v p_{sat}} W_{ca,out}, \quad (\text{II.34})$$

$$W_{N_2,out} = \frac{M_{N_2} p_{N_2}}{M_{O_2} p_{O_2} + M_{N_2} p_{N_2} + M_v p_{sat}} W_{ca,out}. \quad (\text{II.35})$$

Le débit massique de sortie de la cathode $W_{ca,out}$ est régi par les équations de la buse [26] et est calculé comme suit :

$$W_{ca,out} = \frac{C_D A_T}{\sqrt{RT_{fc}}} \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma - 1}} (p_{ca}) \left(\frac{p_{atm}}{p_{ca}} \right)^{\frac{1}{\gamma}} \sqrt{1 - \left(\frac{p_{atm}}{p_{ca}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}}, \quad (\text{II.36})$$

où C_D est le coefficient de décharge de la buse, A_T est la surface d'ouverture de la buse.

La quantité d'oxygène réagi $W_{O_2,rc}$ est calculée selon les principes de l'électrochimie, qui est une fonction du courant de la pile I_{st} , et est écrite comme suit:

$$W_{O_2,rc} = M_{O_2} \frac{n I_{st}}{2F}. \quad (\text{II.37})$$

II.4 Modèle à quatre états

Equations (II.24), (II.17) and (II.21) peuvent être représentées par le modèle suivant

$$\dot{x}_1 = c_1 (x_4 - \chi - c_2) - \frac{c_3 x_1 \alpha}{c_4 x_1 + c_5 x_2 + c_6} - c_7 w, \quad (\text{II.38a})$$

$$\dot{x}_2 = c_8 (x_4 - \chi - c_2) - \frac{c_3 x_2 \alpha}{c_4 x_1 + c_5 x_2 + c_6}, \quad (\text{II.38b})$$

$$\dot{x}_3 = -c_9 x_3 - \frac{c_{10}}{x_3} \left[\left(\frac{x_4}{c_{11}} \right)^{c_{12}} - 1 \right] y_3 + c_{13} u, \quad (\text{II.38c})$$

$$\dot{x}_4 = c_{14} \left[1 + c_{15} \left[\left(\frac{x_4}{c_{11}} \right)^{c_{12}} - 1 \right] \right] \times [y_3 - c_{16} (x_4 - \chi - c_2)], \quad (\text{II.38d})$$

ou

$$\begin{aligned} \chi &= p_{O_2} + p_{N_2} = x_1 + x_2, \\ \alpha &= W_{ca,in} = c_{17} (\chi - c_2) \left(\frac{c_{11}}{\chi - c_2} \right)^{c_{18}} \sqrt{1 - \left(\frac{c_{11}}{\chi - c_2} \right)^{c_{12}}}, \end{aligned} \quad (\text{II.39})$$

et les coefficients c_i , pour $\{i = 1, \dots, 24\}$, sont définis dans le Tableau A.2 de l'Annexe A.1. Le vecteur d'états $x \in \mathbb{R}^4$ est associé aux pressions partielles d'oxygène et d'azote dans le canal de la cathode, à la vitesse de rotation de l'arbre du moteur du compresseur et à la pression de l'air dans le collecteur d'admission, respectivement [15]. Ainsi,

$$x, =, \left[p_{O_2} \quad p_{N_2} \quad \omega_{cp} \quad p_{sm} \right]^T. \quad (\text{II.40})$$

II.4.1 Entrées et sorties du système

Les entrées du système de la pile à combustible sont (i) la tension du moteur du compresseur $u = v_{cm}$ qui est considérée comme une entrée de contrôle, elle permet de manipuler la vitesse angulaire du compresseur, et donc, l'approvisionnement en oxygène de la pile à combustible, et (ii) le courant de la pile $w = I_{st}$ qui est considéré comme une perturbation mesurable du système.

Le vecteur des sorties du système de la pile à combustible $y \in \mathbb{R}^3$ est donné par

$$y = \left[y_1 \quad y_2 \quad y_3 \right]^T = \left[p_{sm} \quad V_{st} \quad W_{cp} \right]^T, \quad (\text{II.41})$$

ou p_{sm} , V_{st} et W_{cp} sont données dans (II.21), (II.15) et (II.19), respectivement.

II.4.2 System performances

Les variables de performance $z \in \mathbb{R}^2$, avec z_1 comme puissance nette et z_2 comme OER, sont données par

$$z = \begin{bmatrix} z_1 & z_2 \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} P_{net} & \lambda_{O_2} \end{bmatrix}^T. \quad (\text{II.42})$$

La puissance nette de la pile à combustible z_1 est la différence entre la puissance produite par la pile P_{st} et la puissance consommée par le compresseur P_{cm} . Ainsi, la puissance nette peut être exprimée comme

$$z_1 = P_{st} - P_{cm} = y_2 w - c_{21} u (u - c_{22} x_3), \quad (\text{II.43})$$

où la puissance de la pile P_{st} et la puissance du compresseur P_{cm} sont données dans (II.16) et (II.20), respectivement.

Le rendement électrochimique z_2 , qui est défini par la quantité d'oxygène fournie, notée $W_{O_2,in}$, et la quantité d'oxygène réagie, notée $W_{O_2,rct}$, est exprimé comme

$$z_2 = \frac{W_{O_2,in}}{W_{O_2,rct}} = \frac{c_{23} (x_4 - \chi - c_2)}{c_{24} w}. \quad (\text{II.44})$$

II.5 Analyse en régime permanent

Le système d'alimentation en air dispose d'une tension de moteur de compresseur comme unique actionneur de contrôle. Deux variables considérées pour la performance de contrôle sont la puissance nette du système de pile à combustible, z_1 , et le Rendement Électrochimique de l'Oxydation de l'Eau (OER), z_2 . Si la valeur de z_2 est assez faible, même si elle est supérieure à 1, il est susceptible de provoquer une "starvation" en oxygène. Ce phénomène peut causer un court-circuit et un point chaud à la surface de la membrane de la pile à combustible. En revanche, des valeurs plus élevées de z_2 inciteront le moteur du compresseur à consommer plus de puissance et, par conséquent, à se diriger vers des conditions de fonctionnement moins efficaces. Par conséquent, il est nécessaire de définir la valeur optimale de z_2 qui maximise la puissance nette z_1 . La relation entre l'OER et la puissance nette pour différentes intensités de pile est appelée la *courbe de performance* (voir Figure II.3). Cette courbe est obtenue à partir d'une analyse complète hors ligne du système d'alimentation en

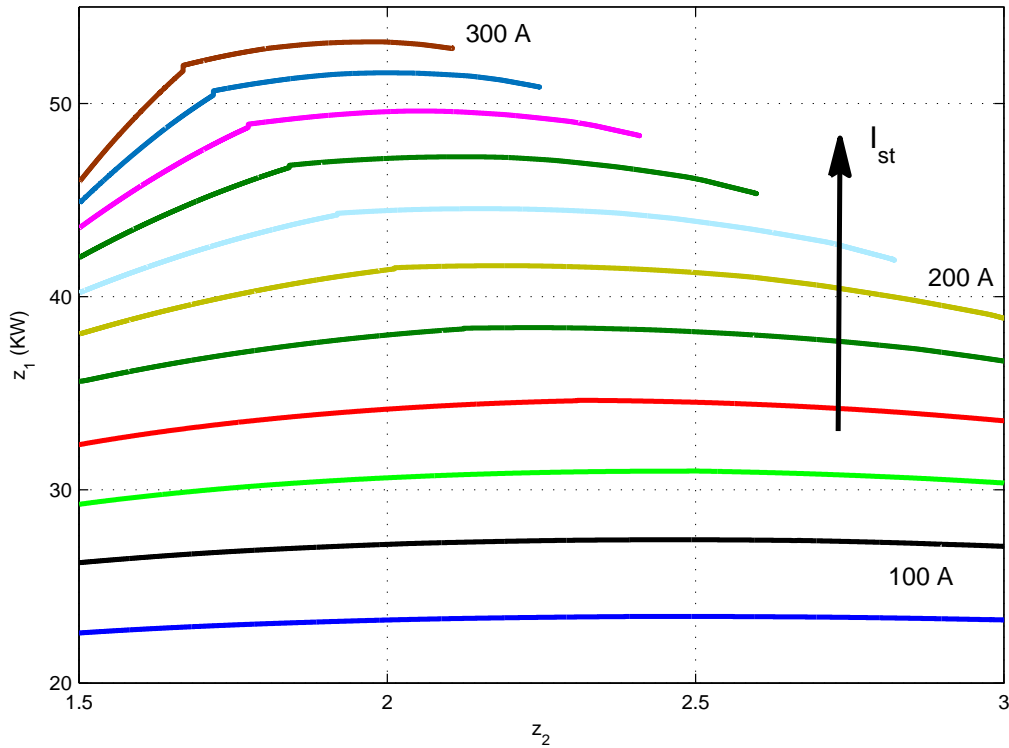


Figure II.3: z_2 courbe de performance pour différents courants de pile.

air de PEMFC en boucle ouverte, à la lumière des variations du courant de pile et d'une large gamme de valeurs d'OER. Le modèle non linéaire dans (II.38) correspond à une pile à combustible haute pression de 75 kW alimentée par un compresseur turbo de 14 kW utilisé dans le véhicule électrique Ford P2000 FC. Les paramètres nominaux du modèle sont répertoriés dans le Tableau A.3 de l'Appendice A.1. Il est possible de voir sur la Figure II.3 que la puissance nette maximale z_1 est atteinte à un OER z_2 entre 1,9 et 2,5 pour des variations de courant de pile entre 100 et 300 A. Cependant, afin d'obtenir le meilleur compromis entre sécurité et efficacité, il est nécessaire de réguler z_2 autour d'une valeur optimale $z_{2,opt} = 2,05$ comme discuté dans [27].

II.6 simulation Dynamique

Un changement de courant dans la pile, tel que montré dans la Figure II.5(a), est appliqué au système de pile à combustible en tant que perturbation. Le courant de la pile augmente

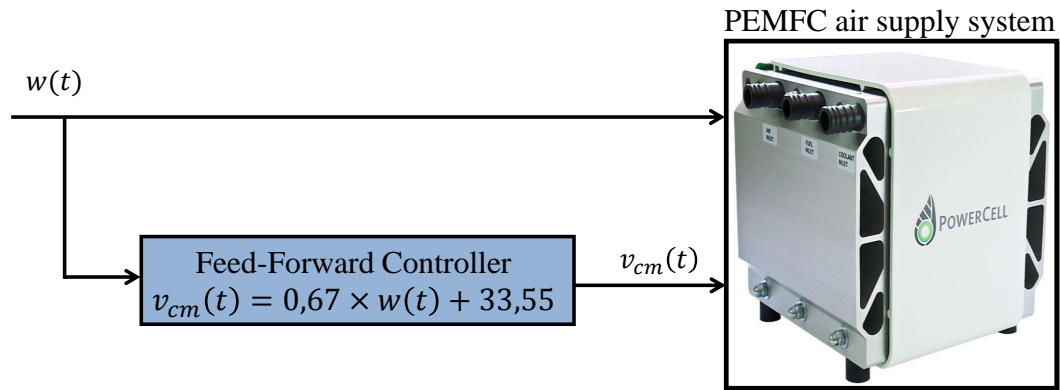
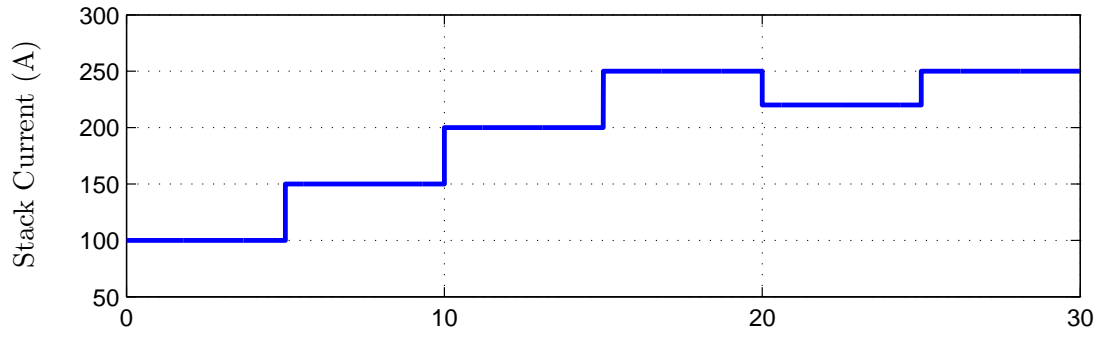


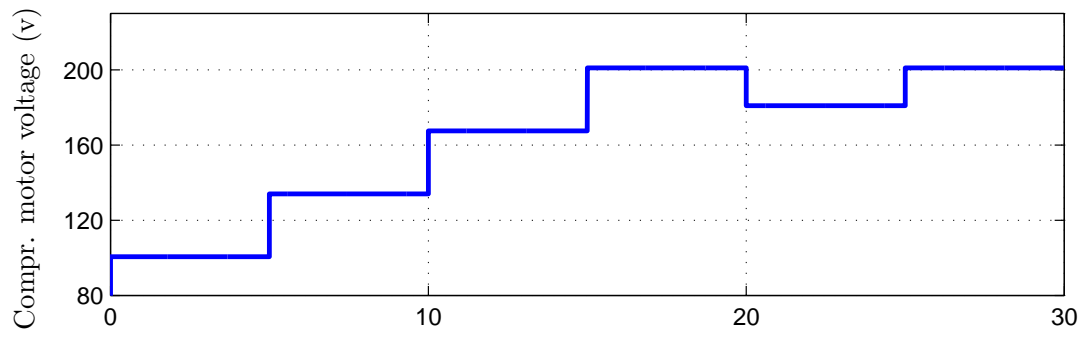
Figure II.4: Contrôle anticipatif statique pour système de pile à combustible.

de 100 A à 150 A à $t = 5$ s. Ensuite, après 5 s, il augmente de 50 A. Cet incrément s'arrête lorsque le courant de la pile atteint 250 A. Après 20 s, le courant tombe à 220 A. Enfin, à $t = 25$ s, il augmente à nouveau de 220 A à 250 A (Figure II.5(a)). Une tension d'entrée de moteur de compresseur, comme illustré dans la Figure II.5(b), est également appliquée au système de pile à combustible en tant qu'entrée de contrôle. L'entrée de contrôle est déduite d'un régulateur statique à anticipation basé sur la mesure du courant de la pile, comme montré dans la Figure II.4.

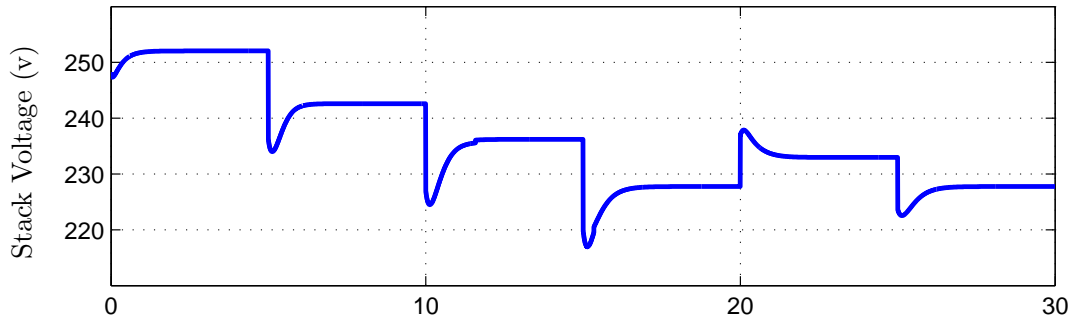
Lors d'un changement de courant positif, le rapport d'excès d'oxygène (OER) diminue, comme illustré dans la Figure II.5(e), en raison de la réduction d'oxygène dans le canal de la cathode. Cela entraîne à son tour une diminution significative de la tension de la pile, comme illustré dans la Figure II.5(c). Il est immédiatement remarquable à partir de la Figure II.5(b) que la tension du compresseur répond instantanément pendant les étapes de courant (à 5, 10, 15, 20 et 25 secondes). Cependant, il existe encore un effet transitoire dans la tension de la pile, et par conséquent dans la puissance de la pile et la puissance nette (Figure II.5(d)), en raison du comportement transitoire de la pression partielle d'oxygène (Figure II.5(f)).



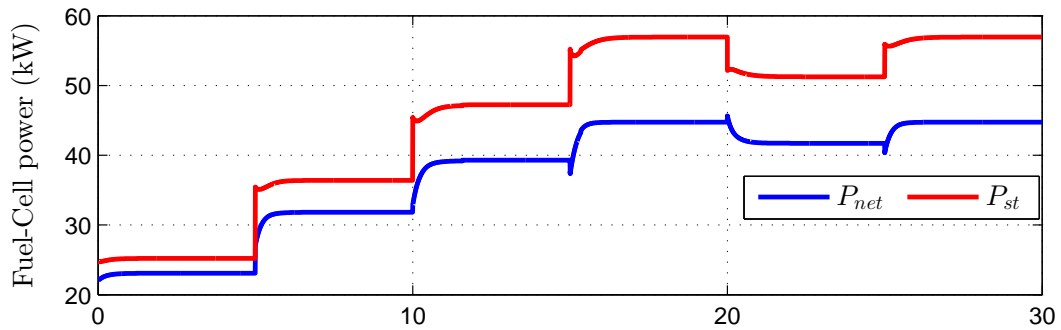
(a) Stack-current



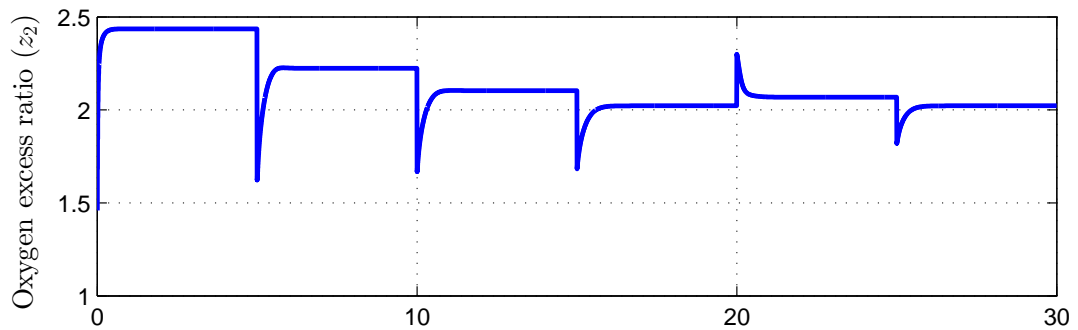
(b) Compressor motor voltage



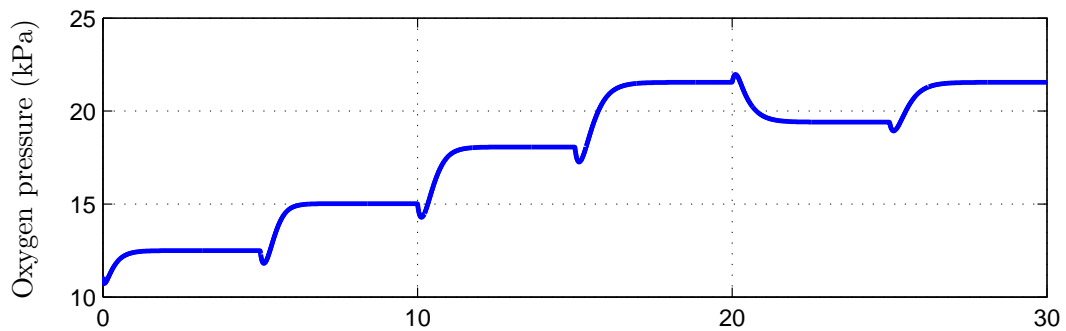
(c) Stack voltage



(d) Stack and net power



(e) Oxygen excess ratio



(f) Oxygen pressure

Figure II.5: Résultats de simulation dynamique du modèle de système de pile à combustible pour une série de changements de courant de pile d'entrée.

II.7 Conclusion

Ce chapitre présente les principaux concepts concernant les systèmes PEMFC, en montrant les expressions correspondant à la tension et à l'efficacité de la pile à combustible. De plus, différentes approches de modélisation sont présentées. En conséquence, une revue des modèles PEMFC a été réalisée. Les modèles de pile à combustible peuvent être classés en trois catégories : les modèles de performance de la pile à combustible, les modèles de système de pile à combustible à l'état stationnaire ou les modèles de système de pile à combustible dynamique. Parmi ces modèles, un modèle largement utilisé dans la littérature à des fins de contrôle est décrit en détail. En utilisant ce modèle, l'influence de l'équipement auxiliaire sur l'efficacité du système est analysée et le modèle est également utilisé pour étudier le fonctionnement optimal d'un système PEMFC, en trouvant une tension de compresseur optimale pour chaque charge de courant qui maximise la puissance nette de sortie. De même, ce modèle dynamique est utilisé comme modèle de base dans les autres chapitres de cette thèse.

CHAPITRE III

Un simulateur de pile à combustible incluant les défauts

III.1 Introduction

La pile à combustible est une technologie très prometteuse pour la production d'énergie propre, mais comme toute technologie, elle comporte également des défauts et des limitations. Voici quelques-uns des principaux défauts associés aux piles à combustible :

Coût : Les piles à combustible sont généralement coûteuses à produire en raison des matériaux coûteux utilisés dans leur construction, tels que le platine pour les électrodes. Cela rend souvent les systèmes de piles à combustible plus chers que d'autres technologies énergétiques. **Durabilité :** La durabilité des piles à combustible, en particulier des électrodes, peut poser problème. Les matériaux utilisés peuvent se dégrader au fil du temps, réduisant ainsi l'efficacité et la durée de vie de la pile. **Stockage et distribution de l'hydrogène :** L'hydrogène, qui est souvent utilisé comme combustible dans les piles à combustible, est difficile à stocker et à distribuer en toute sécurité en raison de sa faible densité énergétique et de sa nature hautement inflammable. Cela pose des défis pour l'infrastructure nécessaire à grande échelle. **Performance à basse température :** Certaines piles à combustible, comme les piles à hydrogène, peuvent rencontrer des difficultés de performance à basse température, ce qui peut limiter leur utilisation dans des climats froids ou dans des applications nécessitant un démarrage rapide. **Sensibilité aux contaminants :** Les piles à combustible peuvent être

sensibles aux contaminants présents dans le combustible, tels que le dioxyde de carbone, le monoxyde de carbone et les impuretés. Ces contaminants peuvent endommager les électrodes et réduire l'efficacité de la pile. Infrastructure limitée : En raison de la rareté des stations de ravitaillement en hydrogène et de l'infrastructure limitée pour la production, le stockage et la distribution d'hydrogène, l'adoption généralisée des piles à combustible est entravée. Bien que ces défauts présentent des défis, de nombreuses recherches et développements sont en cours pour atténuer ces limitations et rendre les piles à combustible plus compétitives sur le marché de l'énergie propre.

III.2 Description du simulateur de la pile à combustible

Le modèle du système de pile à combustible PEM (Membrane Électrolyte Polymère) utilisé dans ce travail a été proposé par Pukrushpan et al. ([3]), et des informations supplémentaires peuvent être trouvées dans Pukrushpan ([28]). Ce benchmark est largement accepté dans la communauté de contrôle comme une bonne représentation du comportement d'un système de pile à combustible. Le modèle, voir Fig. III.1, inclut une description très détaillée du compresseur d'air, des collecteurs de cathode d'entrée et de retour, du refroidisseur d'air statique, de l'humidificateur statique, du flux d'hydrogène et de la pile à combustible PEM. Le modèle de la pile à combustible est ensuite décomposé en quatre sous-systèmes principaux : la tension de la pile, le flux de la cathode, le flux de l'anode et l'hydratation de la membrane. Dans le modèle, il est supposé que la température est connue et constante, car sa dynamique est beaucoup plus lente que celle du reste du modèle.

Les capteurs disponibles dans le système sont un autre aspect important à prendre en compte pour le diagnostic des pannes. Nous supposons les capteurs suivants installés dans le système : le courant de la pile (i_{st}), la vitesse du moteur du compresseur (ω_{cm}), le courant du moteur du compresseur (i_{cm}), la pression de sortie du compresseur ($p_{cm,out}$), la température de sortie du collecteur d'entrée ($T_{im,out}$), la pression d'entrée de la cathode ($p_{ca,in}$), la pression en aval de la pile ($p_{st,ds}$), le flux de sortie de la cathode ($W_{ca,out}$) et la pression de sortie de la cathode ($p_{ca,out}$). De plus, il existe un ensemble de variables déjà connues : la tension du compresseur (v_{cm}) car c'est une variable de contrôle, la température souhaitée (T_{des}) et

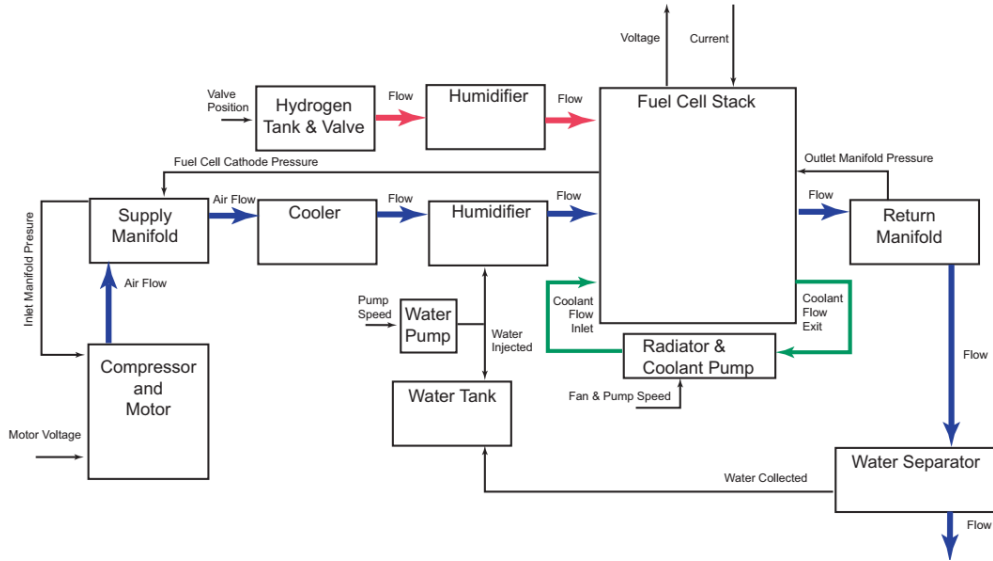


Figure III.1: Schéma du modèle de système de pile à combustible PEM.

l'humidité (ϕ_{des}), les deux points de consigne, la température de la pile (T_{st}) et toutes les variables ambiantes (pression p_{amb} , température T_{amb} et humidité ϕ_{amb}).

Dans ce qui suit, nous tentons d'inclure quelques types de pannes sur le simulateur développé par pukrushpan et .al. les variables qui nous intéressent dans ce contexte sont la tension et le courant du stack, la pression d'air dans le collecteur d'air et la vitesse du compresseur d'air.

III.3 Inclusion des pannes dans le simulateur PEM

Un ensemble de pannes a été défini pour ce benchmark. Chaque panne affecte principalement une équation en modifiant un paramètre ou une variable, de sorte que la relation entre une panne et une équation est unique. Le tableau 1 résume les pannes considérées dans ce travail. D'autres pannes pourraient facilement être incluses dans cet ensemble, à condition qu'elles soient liées à d'autres équations du modèle. Une autre hypothèse est que seules des pannes simples sont autorisées. Cela signifie que deux ou plusieurs pannes ne peuvent pas se produire dans le système en même temps.

Tableau III.1: Défaux Etudiés et Simulés

ID	Description du défaut	Taper	Ordre de grandeur
F1	Le moteur du compresseur subit une surchauffe	Paramétrique Brusque	$R_{cm} + 60\%$
F2	Augmentation de la friction dans le moteur du compresseur	Paramétrique Brusque	$T_f + 100\%$
F3	La résistance du fluide augmente à la sortie de la cathode en raison du blocage des canaux par l'eau	Paramétrique Brusque	$k_{ca,out} - 50\%$
F4	Fuite d'air dans le collecteur d'alimentation en air	Paramétrique Brusque	$k_{sm,out} - 50\%$
F5	Augmentation de la température du stack	Paramétrique Brusque	$T_{st} + 20\%$

III.3.1 Le moteur subit une surchauffe

Un défaut important à considérer dans le système de pile à combustible est la surchauffe du moteur du compresseur. Ce défaut est simulé par une augmentation de la résistance du moteur du compresseur. En effet, la surchauffe provoque une augmentation de la résistance interne du moteur, ce qui peut être modélisé par une modification du paramètre de résistance dans l'équation du modèle du compresseur.

L'équation affectée par ce défaut est celle décrivant la dynamique de la vitesse du compresseur. La résistance subit une augmentation importante de sa valeur en fonctionnement sain.

$$R_{cm}(t) = R_{cm0} (1 + \alpha \Delta T) \quad (\text{III.1})$$

où R_{cm0} est la résistance nominale, α est le coefficient de température de la résistance, et ΔT est l'augmentation de température due à la surchauffe. Cette augmentation de résistance est ensuite intégrée dans l'équation de tension du compresseur :

$$V_{cm} = I_{cm}R_{cm}(t) \quad (\text{III.2})$$

La surchauffe du moteur du compresseur, en augmentant la résistance R_{cm} , conduit à une augmentation de la tension requise pour maintenir le même courant I_{cm} , ce qui peut entraîner une diminution de l'efficacité du compresseur et affecter la performance globale du système de pile à combustible.

III.3.2 Augmentation de la friction du moteur

Un autre défaut critique à considérer dans le système de pile à combustible est l'augmentation de la friction du moteur du compresseur. Ce défaut est simulé par une augmentation du couple de friction dans le modèle du compresseur. L'augmentation de la friction entraîne une demande accrue de couple moteur pour maintenir la même vitesse de rotation, ce qui peut être modélisé par une modification du couple de friction dans l'équation du moteur.

L'équation affectée par ce défaut est celle décrivant la relation entre le couple moteur T_m , le couple de friction T_f , et le couple effectif T_e . En présence d'une augmentation de la friction, le couple de friction T_f augmente de la manière suivante :

$$T_f(t) = T_{f0} (1 + \beta \Delta F) \quad (\text{III.3})$$

où T_{f0} est le couple de friction nominal, β est le coefficient de variation de la friction, et ΔF est l'augmentation de la friction due à l'usure ou à d'autres facteurs. Cette augmentation de friction est ensuite intégrée dans l'équation de couple du moteur :

$$T_e = T_m - T_f(t) \quad (\text{III.4})$$

L'augmentation de la friction du moteur du compresseur, en augmentant le couple de friction T_f , conduit à une augmentation du couple moteur requis T_m pour maintenir le même couple effectif T_e . Cela peut entraîner une augmentation de la consommation d'énergie et une diminution de l'efficacité globale du compresseur, affectant ainsi les performances du système de pile à combustible. [29]

III.3.3 Blocage des canaux d'évacuation par l'eau produite

Un défaut significatif dans le système de pile à combustible est le blocage des canaux d'évacuation par l'eau dans le collecteur de retour. Ce défaut est réversible et peut être simulé par le changement de la constante $k_{ca,out}$ dans le modèle du collecteur de retour. Le blocage des canaux d'évacuation entraîne une restriction du flux de sortie de la cathode, ce qui peut être modélisé par une modification de la constante de débit.

L'équation affectée par ce défaut est celle décrivant le flux de sortie de la cathode $W_{ca,out}$ en fonction de la constante $k_{ca,out}$. En présence d'un blocage, la constante $k_{ca,out}$ change de la manière suivante :

$$k_{ca,out}(t) = k_{ca,out0} (1 - \gamma B(t)) \quad (\text{III.5})$$

où $k_{ca,out0}$ est la constante nominale de débit, γ est un coefficient de blocage, et $B(t)$ est une fonction représentant le degré de blocage dû à l'accumulation d'eau. Cette modification de la constante est ensuite intégrée dans l'équation du flux de sortie de la cathode :

$$W_{ca,out} = k_{ca,out}(t) \cdot \Delta P \quad (\text{III.6})$$

où ΔP est la différence de pression à travers le collecteur de retour. Le blocage des canaux d'évacuation par l'eau, en diminuant la constante $k_{ca,out}$, conduit à une réduction du flux de sortie de la cathode $W_{ca,out}$, ce qui peut provoquer une accumulation de gaz et affecter les performances du système de pile à combustible. Étant donné que ce défaut est réversible, la valeur de $k_{ca,out}$ peut revenir à son état nominal une fois le blocage résolu.

III.3.4 Fuite d'air dans le collecteur d'air d'alimentation

Un défaut critique dans le système de pile à combustible est la fuite dans le collecteur d'alimentation en air (supply manifold). Ce défaut peut être simulé par le changement de la constante $k_{sm,out}$ dans le modèle du collecteur d'alimentation en air. La fuite dans le collecteur d'alimentation en air entraîne une diminution de la pression d'entrée de l'air dans la pile à combustible, ce qui peut être modélisé par une modification de la constante de débit.

L'équation affectée par ce défaut est celle décrivant la pression d'entrée de la cathode $p_{ca,in}$ en fonction de la constante $k_{sm,out}$. En présence d'une fuite, la constante $k_{sm,out}$ change de la manière suivante :

$$k_{sm,out}(t) = k_{sm,out0} (1 - \beta F(t)) \quad (\text{III.7})$$

où $k_{sm,out0}$ est la constante nominale de débit, β est un coefficient de fuite, et $F(t)$ est une fonction représentant le degré de fuite dans le collecteur d'alimentation en air. Cette modification de la constante est ensuite intégrée dans l'équation de pression d'entrée de la cathode :

$$p_{ca,in} = k_{sm,out}(t) \cdot \dot{m}_{air} \quad (\text{III.8})$$

où \dot{m}_{air} est le débit massique de l'air. La fuite dans le collecteur d'alimentation en air, en diminuant la constante $k_{sm,out}$, conduit à une réduction de la pression d'entrée de l'air, ce qui peut affecter la performance globale du système de pile à combustible en réduisant la quantité d'air disponible pour la réaction électrochimique.

III.3.5 Augmentation de la température du stack

Un défaut crucial dans le système de pile à combustible est l'augmentation de la température du stack. Ce défaut peut être simulé par le changement de la température du stack dans le modèle. L'augmentation de la température du stack peut être causée par divers facteurs tels qu'une augmentation de la charge électrique ou des conditions environnementales défavorables.

L'équation affectée par ce défaut est celle décrivant la température du stack T_{st} . En présence d'une augmentation de la température, celle-ci peut être modélisée par une fonction de variation temporelle ou une fonction dépendante de la charge électrique du stack. Par exemple, une augmentation linéaire de la température du stack au fil du temps peut être modélisée par :

$$T_{st}(t) = T_{st0} + \alpha t \quad (\text{III.9})$$

où T_{st0} est la température initiale du stack et α est le taux d'augmentation de la température.

L'augmentation de la température du stack peut avoir plusieurs effets néfastes sur le système de pile à combustible, tels qu'une diminution de l'efficacité du processus électrochimique, une augmentation de la dégradation des matériaux du stack, et une réduction de la durée de vie utile de la pile à combustible. Il est donc crucial de surveiller et de contrôler la température du stack pour garantir le bon fonctionnement et la durabilité du système.

III.4 Résultats de la simulation

Nous présentons ici les résultats de simulation des cinq défauts précédemment décrits. Pour chaque défaut, nous avons appliqué une commande de type feed-forward avec un courant de stack variable en créneaux. L'objectif est d'étudier l'effet de ces défauts sur la courbe de vitesse du moteur du compresseur, la pression du collecteur d'air, et la tension du stack.

Les simulations ont été réalisées en modifiant les paramètres appropriés du modèle pour chaque défaut. Les résultats obtenus montrent l'impact de chaque défaut sur les performances du système de pile à combustible, en comparaison avec le fonctionnement nominal sans défaut.

III.4.1 Défaut F1

Nous remarquons sur la figure [III.2](#) qu'une surchauffe du moteur a provoqué une diminution de la vitesse du moteur, de la pression du collecteur ainsi que la tension de sortie de la pile. ce résultat est attendu mais nous remarquons que seul le régime statique a été affecté par ce défaut, tandis que le régime dynamique est resté tel quel sur la plupart des points de fonctionnement. nous remarquons par contre que pour les petites charges il y a une différence légère dans le régime dynamique provoquée par cette surchauffe.

III.4.2 Défaut F2

Nous remarquons sur la figure [III.3](#) qu'une augmentation de la friction du moteur a eu presque le même effet sur les sorties mesurées, avec un degré plus élevé. Ceci suggère que les défauts

1 et 2 ne sont pas distinguables en utilisant ces sorties et nécessitent donc d'autres mesures pour être distingués. Ceci est expliquée par le fait que les deux défauts touchent le même système, qui est le moteur du compresseur.

III.4.3 Défaut F3

Le défaut F3 a une influence légère sur les sorties mesurées, voir figure III.4. Ce résultat est attendu car il s'agit d'un défaut dans le collecteur de retour qui est loin d'apparaître clairement. Ceci n'implique pas forcément que le défaut n'est pas nuisible pour la pile, son impact peut être plus important sur d'autres parties du système. Cependant, nous suggérons que ce défaut est distinguable par rapport aux autres précédents du fait qu'il affecte la tension de sortie sans pour autant affecter la vitesse du moteur qui reste presque inchangée.

III.4.4 Défaut F4

Ce défaut est comme F3, distinguable par rapport à F1 et F2 pour les mêmes raisons, mais nous suggérons aussi que le défaut est bien distinguable par rapport à F3 car celui-ci affecte la tension de sortie en affectant aussi de façon remarquable la pression du collecteur d'air contrairement à F3 qui n'affecte pas aussi remarquablement le collecteur d'air (voir figure III.5).

III.4.5 Défaut F5

Ce défaut a un effet bizarre sur les sorties mesurées, qui est l'apparition d'une sorte de zig-zags sur la courbe de la tension (voir figure III.6). Ces zig-zag sont des effets dus au changement concret de la dynamique du système et sont témoins de l'apparition de zéros instables supplémentaires sur la tension de sortie. Ce défaut est donc distinguable par rapport à tous les défauts précédents.

III.5 Conclusion

Nous avons dans ce chapitre modélisé cinq types de défauts pouvant affecter le système pile à combustible avec une étude de leur influence sur trois sorties de la pile qui sont la tension de sortie, la vitesse du moteur et la pression du collecteur d'air. Nous avons aussi donné des indications ampériques sur la distinguabilité de ces défauts en suggérant que ces défauts sont tous distinguables l'un de l'autre. La confirmation de cette conjecture reste à confirmer par des études théoriques ce qui est posé comme perspective pour ce travail.

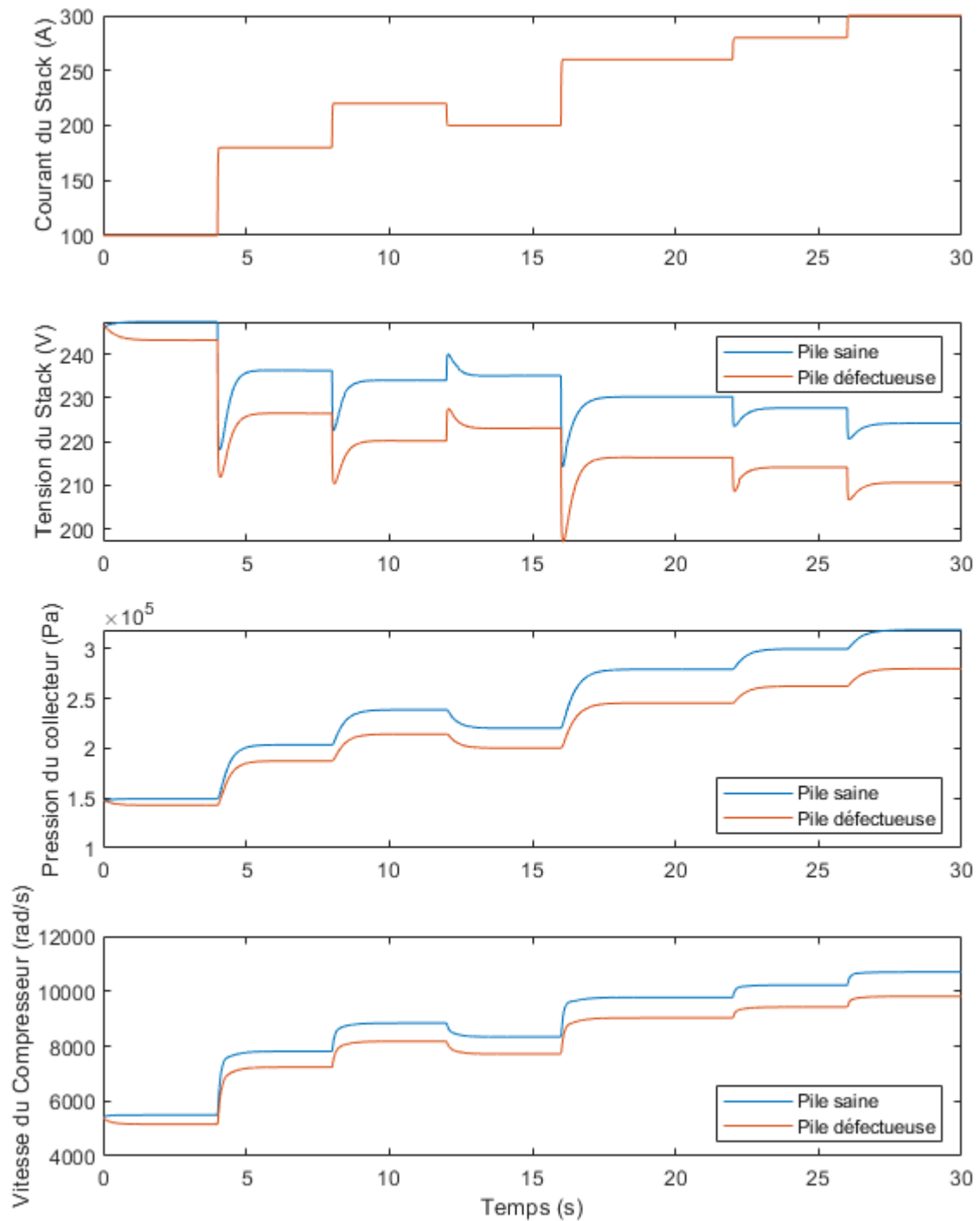


Figure III.2: Comparaison des réponses du modèle sain et défectueux pour: défaut F1

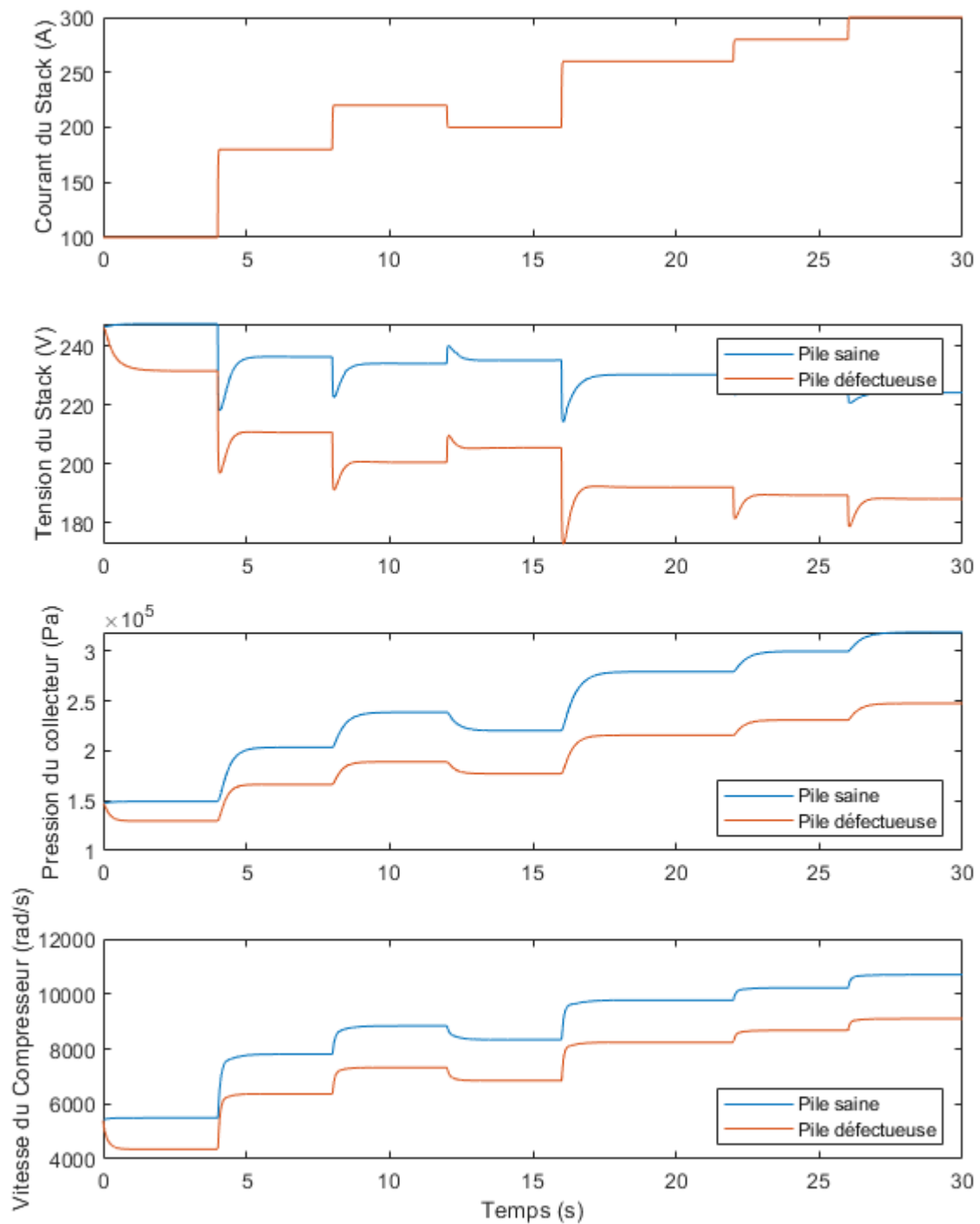


Figure III.3: Comparaison des réponses du modèle sain et défectueux pour: défaut F2

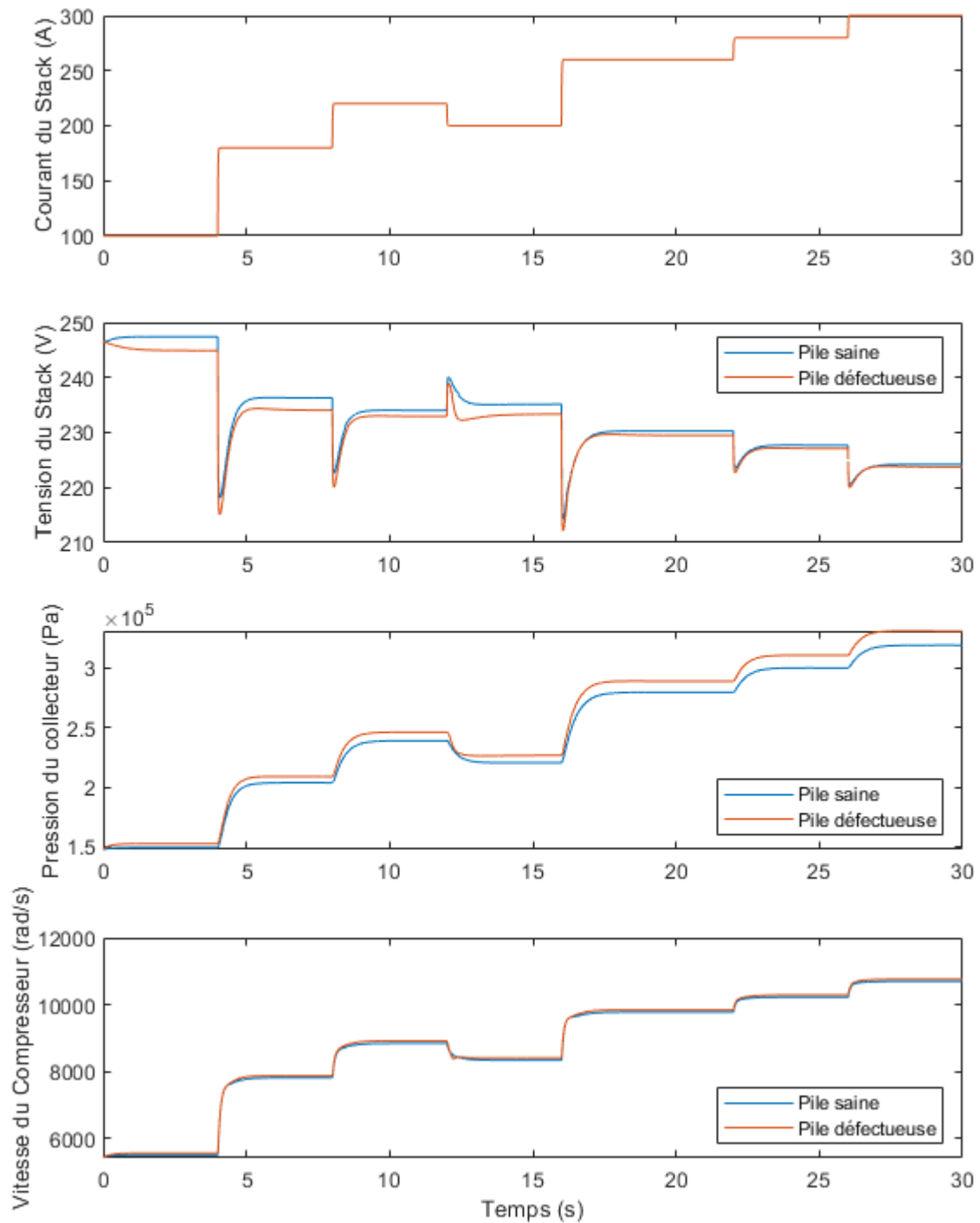


Figure III.4: Comparaison des réponses du modèle sain et défectueux pour: défaut F3

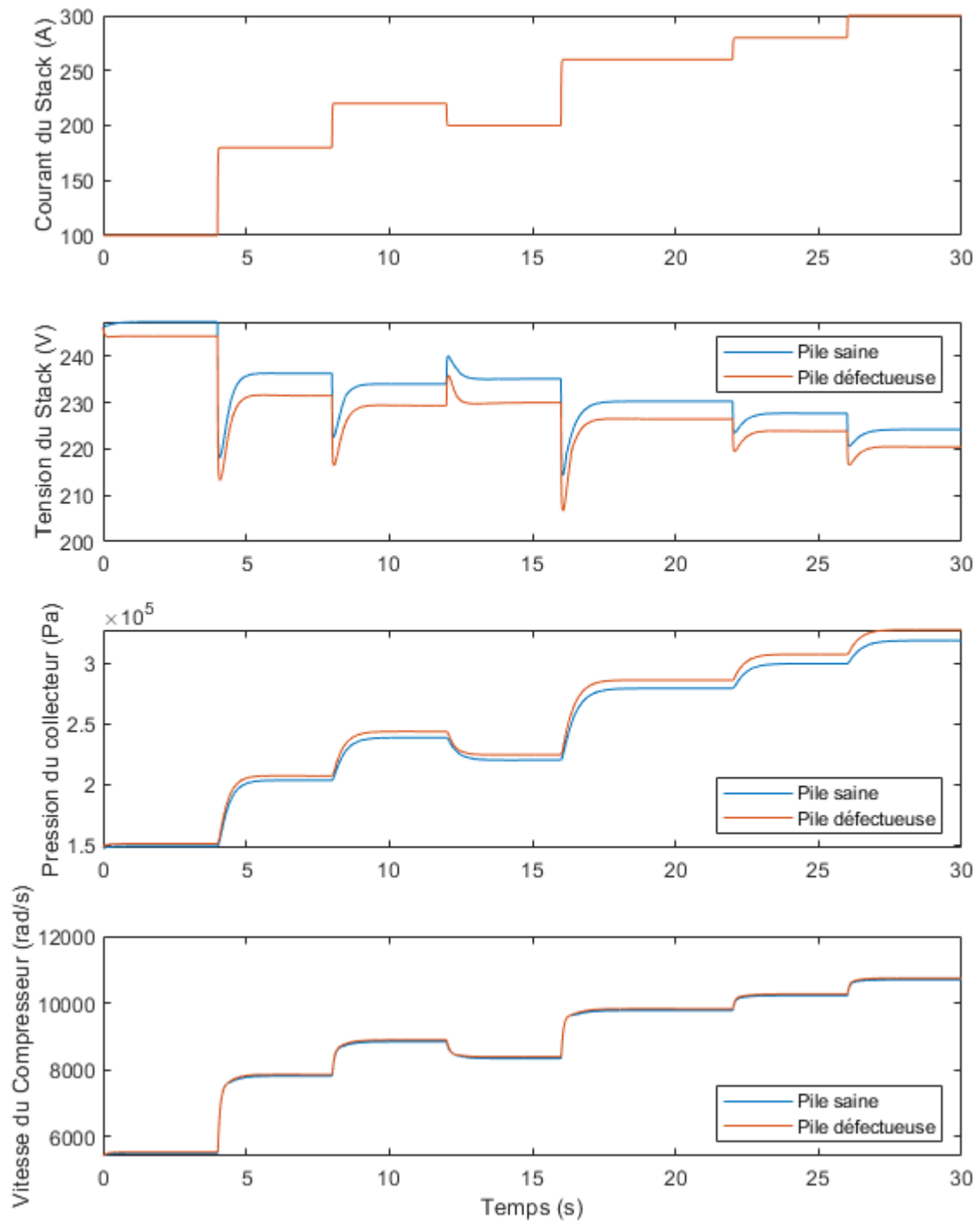


Figure III.5: Comparaison des réponses du modèle sain et défectueux pour: défaut F4

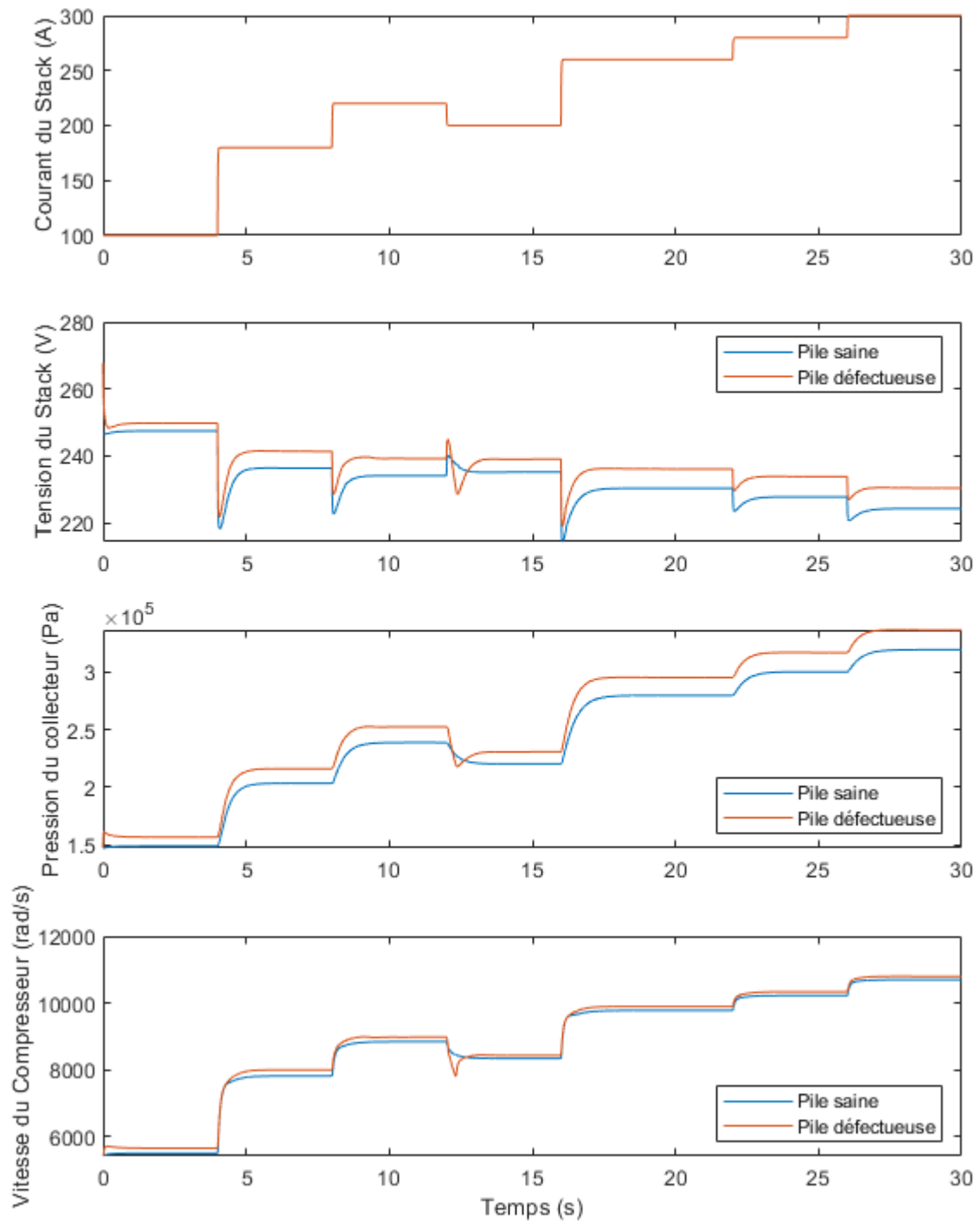


Figure III.6: Comparaison des réponses du modèle sain et défectueux pour: défaut F5

Conclusion Générale

Dans ce travail, nous avons réalisé une étude visant à étendre le modèle dynamique de Pukrushpan pour les piles à combustible de type PEM, afin d'inclure la simulation de certains défauts. Nous avons étudié cinq types de défauts, représentés comme des changements paramétriques du modèle sain, et avons analysé leurs effets sur trois sorties essentielles du système de pile à combustible : la tension de sortie, la pression du collecteur et la vitesse du moteur.

En analysant les résultats de simulation, nous avons pu donner des indications sur la distinguabilité de ces défauts. Nos observations suggèrent que ces défauts sont effectivement distinguables les uns des autres, bien que cette conclusion doive être confirmée par des analyses théoriques plus approfondies. Cette validation théorique constituera la perspective de ce travail, ouvrant la voie à des recherches futures pour améliorer la robustesse et la fiabilité des systèmes de piles à combustible.

En résumé, cette étude apporte une contribution significative à la modélisation et à la gestion des défauts dans les systèmes de piles à combustible PEM, et pose les bases pour des travaux futurs visant à confirmer et à approfondir ces résultats.

Bibliography

- [1] J Deign. So what exactly is green hydrogen. *gtm*, 2020.
- [2] Gaetano Squadrito, Gaetano Maggio, and Agatino Nicita. The green hydrogen revolution. *Renewable Energy*, 216:119041, 2023.
- [3] Jay Tawee Pukrushpan. *Modeling and control of fuel cell systems and fuel processors*. University of Michigan, 2003.
- [4] Yunjin Ao. Contribution au diagnostic en ligne, à la classification des défauts et au pronostic des piles à combustible pemfc. 2022.
- [5] Z. Baroud and A. Benalia. Steady-State Modeling and Performance Analysis of PEM Fuel Cell. In *The First Day of Automatic Theory and its Applications (JEAA)*, pages 1–6, Laghouat, Algeria, 2014.
- [6] J.T. Pukrushpan, A.G. Stefanopoulou, and H. Peng. *Control of fuel cell power systems: principles, modeling, analysis and feedback design*. Springer Science & Business Media, 2004.
- [7] J. Töpler and J. Lehmann. *Hydrogen and Fuel Cell: Technologies and Market Perspectives*. Springer Berlin Heidelberg, 2015. <https://books.google.dz/books?id=0FO-CwAAQBAJ>.
- [8] F. Jurado. Modeling SOFC plants on the distribution system using identification algorithms. *Journal of power sources*, 129(2):205–215, 2004.
- [9] 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*. PhD thesis,

- Systèmes automatiques Toulouse, INPT, 2004. <http://www.theses.fr/2004INPT028H/document>.
- [10] P.R. Pathapati, X. Xue, and J. Tang. A new dynamic model for predicting transient phenomena in a PEM fuel cell system. *Renewable energy*, 30(1):1–22, 2005.
- [11] S. Yerramalla, A. Davari, A. Feliachi, and T. Biswas. Modeling and simulation of the dynamic behavior of a polymer electrolyte membrane fuel cell. *Journal of power sources*, 124(1):104–113, 2003.
- [12] Y. Qi, B. Huang, and K.T. Chuang. Dynamic modeling of solid oxide fuel cell: The effect of diffusion and inherent impedance. *Journal of Power Sources*, 150:32–47, 2005.
- [13] S.L. Maldonado. *Experimental characterization of water sorption and transport properties of polymer electrolyte membranes for fuel cells*. PhD thesis, Mécanique et énergétique Université de Lorraine, 2012. <http://www.theses.fr/2012LORR0146/document>.
- [14] S. Kang. Quasi-three dimensional dynamic modeling of a proton exchange membrane fuel cell with consideration of two-phase water transport through a gas diffusion layer. *Energy*, 90:1388–1400, 2015.
- [15] J.K. Gruber, C. Bordons, and F. Dorado. Nonlinear control of the air feed of a fuel cell. In *American Control Conference*, pages 1121–1126, 2008.
- [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. <https://books.google.dz/books?id=ijSlsr7BN94C>.
- [17] M. Basualdo, D. Feroldi, and R. Outbib. *PEM fuel cells with bio-ethanol processor systems*, volume 10. Springer, 2012.
- [18] J. Liu. *Contributions to Adaptative Higher Order Sliding Mode Observers : Application to Fuel Cell an Power Converters*. PhD thesis, Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, Apr 2014. https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01488404/file/These_LIU_Jianxing_UTBM.pdf.

- [19] Z. Liu, Z. Mao, C. Wang, W. Zhuge, and Y. Zhang. Numerical simulation of a mini PEMFC stack. *Journal of Power Sources*, 160(2):1111 – 1121, 2006.
- [20] J. C. Amphlett, R. M. 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 i. mechanistic model development. *Journal of the Electrochemical Society*, 142(1):1–8, 1995.
- [21] B. C. Steele and A. Heinzel. Materials for fuel-cell technologies. In *Materials For Sustainable Energy: A Collection of Peer-Reviewed Research and Review Articles from Nature Publishing Group*, pages 224–231. World Scientific, 2011.
- [22] M. G. Santarelli and M. F. Torchio. Experimental analysis of the effects of the operating variables on the performance of a single pemfc. *Energy Conversion and Management*, 48(1):40–51, 2007.
- [23] R. F. Mann, J. C. Amphlett, M. A. Hooper, H. M. Jensen, B. A. Peppley, and P. R. Roberge. Development and application of a generalised steady-state electrochemical model for a pem fuel cell. *Journal of power sources*, 86(1-2):173–180, 2000.
- [24] J.T. Pukrushpan, A.G. Stefanopoulou, and H. Peng. Control of fuel cell breathing. *IEEE Control Systems*, 24(2):30–46, 2004.
- [25] T. Liu. *Pressure-and Temperature-Sensitive Paints*. Wiley Online Library, 2005.
- [26] J.T. Pukrushpan, A.G. Stefanopoulou, and H. Peng. Modeling and control for PEM fuel cell stack system. In *American Control Conference, 2002. Proceedings of the 2002*, volume 4, pages 3117–3122. IEEE, 2002.
- [27] C. Kunusch, P. Puleston, and M. Mayosky. *Sliding-Mode control of PEM fuel cells*. Springer Science & Business Media, 2012.
- [28] Jay T Pukrushpan, Anna G Stefanopoulou, and Huei Peng. *Control of fuel cell power systems: principles, modeling, analysis and feedback design*. Springer Science & Business Media, 2004.

- [29] Benhai Chen, Dongchen Qin, Tingting Wang, Jiangyi Chen, and Ruikang Zhao. Modeling and analysis of hydrogen-oxygen fuel cell. In *Energy Revolution and Chemical Research*, pages 421–430. CRC Press, 2022.

Annexes A

Paramètres du Modèle de La pile

A.1 Paramètres du Modèle de la pile

For the activation loss, the expressions of v_0 and v_a are expressed as follows[6]:

$$\begin{aligned} v_0 &= 0.279 - 8.5 \times 10^{-4} (T_{fc} - 298.15) \\ &\quad + 1.308 \times 10^{-5} T_{fc} \left[\ln \left(\frac{\chi}{1.01325} \right) + \frac{1}{2} \left(\frac{0.1173 \times \chi}{1.01325} \right) \right], \\ v_a &= \left(-1.618 \times 10^{-5} T_{fc} + 1.618 \times 10^{-2} \right) \left(\frac{x_1}{0.1173} + c_2 \right)^2 \\ &\quad + \left(1.8 \times 10^{-4} T_{fc} + 0.166 \right) \left(\frac{x_1}{0.1173} + c_2 \right) + \left(-5.8 \times 10^{-4} T_{fc} + 0.5736 \right) \end{aligned} \tag{A.1}$$

where $\chi = x_1 + x_2$ and $c_2 = p_{sat}(T_{fc})$.

For the concentration loss, the expression of b_2 is given according to [6] as follows:

$$b_2 = \begin{cases} (7.16 \times 10^{-4} T_{fc} - 0.622) \left(\frac{x_1}{0.1173} + c_2 \right) \\ \quad (+1.45 \times 10^{-3} T_{fc} + 1.68) & \text{for } \left(\frac{x_1}{0.1173} + c_2 \right) < 2 \text{ atm} \\ (8.66 \times 10^{-5} T_{fc} - 0.068) \left(\frac{x_1}{0.1173} + c_2 \right) \\ \quad (-1.6 \times 10^{-4} T_{fc} + 0.54) & \text{for } \left(\frac{x_1}{0.1173} + c_2 \right) \geq 2 \text{ atm}. \end{cases} \tag{A.2}$$

Tableau A.1: Paramètres de la Pile (équation de la tension)

Parameter	Description	Value	Unit
R	Universal gas constant	8.3145	J/(mol K)
F	Faraday number	96485	C mol ⁻¹
T_{fc}	Stack temperature	353.15	K
ΔG^0	Changes on the Gibbs free energy	-237.2	kJ mol ⁻¹
$\bar{\alpha}$	Change transfer coefficient	0.06	–
i_0	Exchange current density	0.04×10^{-3}	A
A_{fc}	Active-cell area	0.028	mm ⁻²
t_m	Membrane thickness	125×10^{-6}	m ⁻¹
λ_m	Membrane water content mass	14	–
b_1	Empirical constant for activation loss	10	–
b_3	Empirical constant for concentration loss	2	–
i_{max}	Maximal cell current density	2.2	A
n	Number of cells in fuel-cell stack	381	–

A.2 Paramètres du Modèle réduit

Tableau A.2: Constantes du modèle réduit

Constants	
$c_1 = \frac{RT_{fc}k_{sm,out}}{M_{O_2}V_{ca}} \left(\frac{x_{O_2,atm}}{1+\omega_{atm}} \right)$	$c_{13} = \frac{\eta_{cm}k_t}{J_{cp}R_{cm}}$
$c_2 = p_{sat}$	$c_{14} = \frac{RT_{atm}\gamma}{M_{a,atm}V_{sm}}$
$c_3 = \frac{RT_{fc}}{V_{ca}}$	$c_{15} = \frac{1}{\eta_{cp}}$
$c_4 = M_{O_2}$	$c_{16} = k_{sm,out}$
$c_5 = M_{N_2}$	$c_{17} = \frac{C_D A_T}{\sqrt{RT_{fc}}} \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma-1}}$
$c_6 = M_v p_{sat}$	$c_{18} = \frac{1}{\gamma}$
$c_7 = \frac{RT_{fc}n}{2FV_{ca}}$	$c_{19} = \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}$
$c_8 = \frac{RT_{fc}k_{sm,out}}{M_{N_2}V_{ca}} \left(\frac{1-x_{O_2,atm}}{1+\omega_{atm}} \right)$	$c_{20} = \frac{C_D A_T}{\sqrt{RT_{fc}}} \gamma^{0.5} \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma+1}{2\gamma-2}}$
$c_9 = \frac{\eta_{cm}k_t k_v}{J_{cp}R_{cm}}$	$c_{21} = \frac{1}{R_{cm}}$
$c_{10} = \frac{C_p T_{atm}}{J_{cp} \eta_{cp}}$	$c_{22} = k_v$
$c_{11} = p_{atm}$	$c_{23} = k_{sm,out} \left(\frac{x_{O_2,atm}}{1+\omega_{atm}} \right)$
$c_{12} = \frac{\gamma-1}{\gamma}$	$c_{24} = \frac{nM_{O_2}}{2F}$

Tableau A.3: Paramètres physiques du modèle réduit

Parameter	Description	Value	Unit
η_{cp}	Motor mechanical efficiency	0.98	%
η_{cm}	Compressor efficiency	0.8	%
J_{cp}	Compressor inertia	5×10^{-5}	kg m ²
R_{cm}	Compressor motor resistance	0.82	Ω
k_t	Motor parameter	0.0153	(N m)/A
k_v	Motor parameter	0.0153	V/(rad/s)
$M_{a,atm}$	Air molar mass	29×10^{-3}	kg mol ⁻¹
M_{O_2}	Oxygen molar mass	32×10^{-3}	kg mol ⁻¹
M_{N_2}	Nitrogen molar mass	28×10^{-3}	kg mol ⁻¹
M_v	Vapor molar mass	18×10^{-3}	kg mol ⁻¹
$y_{O_2,atm}$	Oxygen mole fraction	0.21	—
V_{ca}	Cathode volume	0.01	m ³
$k_{sm,out}$	Supply manifold outlet orifice constant	0.3629×10^{-5}	kg/(s Pa)
V_{sm}	Supply manifold volume	0.02	m ³
T_{fc}	Fuel-cell temperature	353.15	K
T_{atm}	Atmospheric temperature	298.15	K
p_{atm}	Atmospheric pressure	101325	Pa
$p_{sat}(T_{fc})$	Saturation pressure at stack temperature	42666	Pa
$p_{sat}(T_{atm})$	Saturation pressure at atmospheric temperature	2811.9	Pa
C_p	Constant pressure Specific heat of air	1004	J/(mol K)
C_D	Cathode outlet throttle discharge coefficient	0.0124	—
γ	Ratio of specific heat of air	1.4	—
A_T	Cathode outlet throttle area	0.002	m ²
ϕ_{atm}	Average ambient air relative humidity	0.5	—