

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Ahmed Draïa Adrar
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrique



THÈSE

En vue de l'obtention du diplôme de Doctorat LMD en Electrotechnique

Option : Commande électrique

Présenté Par : **Mohamed-Ali Mesaud Mahmud**

Thème

***Commande et diagnostic d'un système énergétique à pile
à combustible PEMFC pour application résidentielles***

Soutenu publiquement le :

Devant le jury composé de :

| | | | |
|------------------------|------------|-----------|-------------------|
| Mr. Mansouri Smail | MCA | Président | Université Adrar |
| Mr. Harrouz Abdelkader | Professeur | Encadreur | Université Adrar |
| Mr. Berbaoui Brahim | Professeur | Examineur | Université Adrar |
| Mr. Glaoui Hachemi | Professeur | Examineur | Université Bechar |
| Mr. Amar Nsaibia | Docteur | Examineur | URERMS - Adrar |
| Mr. Massmoudi Ramadan | MCA | Examineur | Université Adrar |

Année universitaire : 2025 - 2026

Dédicace

À mes chers parents À mes

frères et sœurs

À ma femme et à ma fille

À mon cher professeur, directeur de thèse À mon ami et

collègue Ibrahim

À tous ceux que j'aime

Remerciements

Je voudrais tout d'abord exprimer ma sincère gratitude à Dieu Tout- Puissant pour m'avoir accordé le courage, la santé, la volonté et la patience nécessaires à la réalisation de ce travail.

Cette thèse est le fruit du dévouement et de l'engagement de nombreux amis chers qui m'ont accompagné dans ce passionnant voyage. Je profite de cette occasion pour leur exprimer ma gratitude et ma reconnaissance.

Je tiens tout d'abord à exprimer mes sincères remerciements à mon directeur de thèse, le professeur Abdelkader Harrouz, pour son encadrement, son suivi et ses encouragements.

Je remercie également tous les membres du jury pour leur disponibilité à juger ce travail.

Je remercie également le centre CIEMAT- Madrid en Espagne où j'ai réalisé mon stage et mon publication je remercie tous les membres de ce centre : le professeur Tomas, Dr. Tony, le professeur Antonio, Francisco, Maria José, Luis Duque, José Luis, Ester et Roldan

Je remercie tous nos professeurs du département de contrôle électrique. Cette gratitude n'exclut pas tous ceux qui m'ont apporté, directement ou indirectement, leur aide pour la réalisation de cette thèse.

Les discussions, observations et commentaires de mes professeurs et collègues ont été des sources d'inspiration qui ont contribué au développement et à l'amélioration de ce travail.

Je remercie également ma famille et mes amis pour leur soutien moral.

Enfin, j'adresse ma sincère gratitude à mes parents pour leur soutien sans faille tout au long de mes longues années d'études.

Mohamed ali Mesaud Mahmud

المخلص

تهدف هذه المذكرة إلى دراسة وتحليل أداء خلايا الوقود من نوع غشاء التبادل ليروتوني، مع التركيز على النمذجة، المحاكاة، والتشخيص الذكي للأعطال باستخدام تقنيات الذكاء الاصطناعي، وخاصة المنطق الضبابي (Fuzzy Logic) في البداية، تم تقديم الإطار النظري لخلايا الوقود، مع شرح مبادئ عملها، مكوناتها الأساسية، وآليات التحويل الكهروكيميائي للطاقة. كما تم التطرق إلى النماذج الرياضية المعتمدة لوصف سلوك الخلية، بما في ذلك الخسائر المختلفة (الخسائر التنشيطية، الأومية، وخسائر النقل الكتلي) بعد ذلك، تم تطوير نموذج محاكاة لدراسة أداء النظام تحت ظروف تشغيل مختلفة، مع تحليل تأثير المتغيرات التشغيلية مثل درجة الحرارة، الضغط، نسبة الرطوبة، وتركيز الغازات على الجهد والتيار الناتج. أظهرت النتائج أن أداء الخلية يتأثر بشكل كبير بالظروف البيئية والتشغيلية، مما يستدعي اعتماد استراتيجيات تحكم دقيقة في الجزء التطبيقي، تم تصميم نظام تشخيص ذكي يعتمد على المنطق الضبابي للكشف عن الأعطال الرئيسية التي قد تصيب الخلية، مثل جفاف الغشاء، فيضان الكاثود، نقص الهيدروجين، وارتفاع درجة الحرارة. يعتمد هذا النظام على تحليل الإشارات المقاسة (الجهد، الضغط، الرطوبة، ودرجة الحرارة) واستخراج مؤشرات تشخيصية، ثم تطبيق قواعد ضبابية لاتخاذ قرار التشخيص. أظهرت نتائج المحاكاة أن النظام المقترح قادر على الكشف المبكر والدقيق للأعطال، مما يساهم في تحسين موثوقية النظام وتقليل تكاليف الصيانة. كما تناولت الدراسة الفرق بين الأداء النظري والفعلي لخلايا الوقود، حيث تم إبراز تأثير العوامل الواقعية مثل تدهور المواد، وعدم تجانس التفاعلات، والظروف التشغيلية غير المثالية. وفي إطار التطبيقي، تم اقتراح آفاق لتطبيق هذه التكنولوجيا في الجزائر، خاصة في المناطق ذات الإمكانيات الطاقوية العالية، من خلال دمج خلايا الوقود مع مصادر الطاقة المتجددة لإنتاج الهيدروجين الأخضر، مما يساهم في دعم الانتقال الطاقوي وتحقيق التنمية المستدامة.

الكلمات المفتاحية: خلايا الوقود PEMFC، الهيدروجين، النمذجة، المحاكاة، التشخيص الذكي، المنطق الضبابي، الطاقات المتجددة.

Résumé

Ce mémoire vise à étudier et analyser les performances des piles à combustible de type PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cell), en mettant l'accent sur la modélisation, la simulation et le diagnostic intelligent des défauts à l'aide des techniques d'intelligence artificielle, notamment la logique floue (Fuzzy Logic). Dans un premier temps, un cadre théorique des piles à combustible est présenté, comprenant l'explication de leurs principes de fonctionnement, de leurs composants principaux ainsi que des mécanismes de conversion électrochimique de l'énergie. Les modèles mathématiques utilisés pour décrire le comportement de la pile sont également abordés, en intégrant les différentes pertes (pertes d'activation, ohmiques et de transport de masse). Par la suite, un modèle de simulation a été développé afin d'étudier les performances du système sous différentes conditions de fonctionnement. L'influence des paramètres opératoires tels que la température, la pression, le taux d'humidité et la concentration des gaz sur la tension et le courant produits a été analysée. Les résultats obtenus montrent que les performances de la pile sont fortement influencées par les conditions environnementales et opérationnelles, ce qui nécessite l'adoption de stratégies de contrôle précises. Dans la partie appliquée, un système de diagnostic intelligent basé sur la logique floue a été conçu pour détecter les principaux défauts pouvant affecter la pile, tels que la sécheresse de la membrane, l'inondation de la cathode, le manque d'hydrogène et la surchauffe. Ce système repose sur l'analyse des signaux mesurés (tension, pression, humidité et température) et sur l'extraction d'indicateurs de diagnostic (résidus), suivie de l'application de règles floues pour la prise de décision. Les résultats de simulation montrent que le système proposé est capable d'assurer une détection précoce et précise des défauts, contribuant ainsi à améliorer la fiabilité du système et à réduire les coûts de maintenance. Par ailleurs, l'étude met en évidence l'écart entre les performances théoriques et réelles des piles à combustible, en soulignant l'impact de facteurs réels tels que la dégradation des matériaux, les hétérogénéités des réactions et les conditions de fonctionnement non idéales. Enfin, des perspectives d'application de cette technologie en Algérie ont été proposées, notamment dans les régions à fort potentiel énergétique, à travers l'intégration des piles à combustible avec les sources d'énergies renouvelables pour la production d'hydrogène vert, contribuant ainsi à la transition énergétique et au développement durable.

Mots-clés : Piles à combustible PEMFC, hydrogène, modélisation, simulation, diagnostic intelligent, logique floue, énergies renouvelables.

Abstract

This thesis focuses on the study, modeling, and intelligent fault diagnosis of Proton Exchange Membrane Fuel Cells (PEMFC), with an emphasis on the application of artificial intelligence techniques, particularly fuzzy logic. First, a comprehensive theoretical framework is presented, including the operating principles of fuel cells, their main components, and the electrochemical processes involved. Mathematical modeling is developed to describe system behavior, incorporating major losses such as activation, ohmic, and mass transport losses. A simulation model is then implemented to analyze the performance of the fuel cell under various operating conditions. The impact of key parameters such as temperature, pressure, humidity, and reactant concentration is investigated. Results indicate that system performance is highly sensitive to operating conditions, highlighting the need for efficient control strategies. The core contribution of this work lies in the development of an intelligent diagnostic system based on fuzzy logic. This system enables the detection and identification of major faults, including membrane drying, cathode flooding, hydrogen starvation, and overheating. The approach relies on measured signals (voltage, pressure, humidity, temperature) and diagnostic indicators, combined with a rule-based fuzzy inference system. Simulation results demonstrate the effectiveness of the proposed approach in terms of early fault detection, accuracy, and robustness, contributing to improved reliability and reduced maintenance costs. Furthermore, a comparison between theoretical and experimental performances reveals the limitations of simplified models when confronted with real-world conditions, such as material degradation, non-uniform reactant distribution, and environmental disturbances. Finally, potential applications in Algeria are discussed, particularly the integration of PEMFC systems with renewable energy sources for green hydrogen production, offering promising prospects for energy transition and sustainable development.

Keywords: PEMFC, hydrogen, modeling, simulation, intelligent diagnosis, fuzzy logic, renewable energy.

Liste des symboles (corrigée et complétée)

1. Généralités

- **PAC** : Pile à combustible
 - **PEMFC** : Pile à combustible à membrane échangeuse de protons
 - **ANN** : Artificial Neural Network (Réseau de neurones artificiels)
 - **ANFIS** : Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System
-

2. Constantes physiques

- **F** : Constante de Faraday (96485 C/mol)
 - **R** : Constante universelle des gaz (8,314 J·mol⁻¹·K⁻¹)
 - **ΔS** : Variation d'entropie (J/mol·K)
 - **ΔG** : Variation de l'énergie libre de Gibbs (J/mol) (ajout important)
-

3. Paramètres électrochimiques

- **n** : Nombre d'électrons échangés
 - **E₀** : Force électromotrice à l'équilibre (V)
 - **E_{Nernst}** : Tension de Nernst (V)
 - **V_{cell}** : Tension d'une cellule (V)
 - **V_{stack}** : Tension du stack (V) (ajout)
 - **I_{stack}** : Courant du stack (A)
 - **J** : Densité de courant (A/cm²)
 - **J_{max}** : Densité de courant limite (A/cm²)
-

4. Pertes de tension

- **V_{act}** : Polarisation d'activation (V)
 - **V_{ohm}** : Polarisation ohmique (V)
 - **V_{conc}** : Polarisation de concentration (V)
-

5. Paramètres thermodynamiques et opératoires

- **T** : Température de fonctionnement (K)
 - **T_{ref}** : Température de référence (K)
 - **P_{H₂}** : Pression partielle de l'hydrogène (atm)
 - **P_{O₂}** : Pression partielle de l'oxygène (atm)
 - **P_{H₂O}** : Pression partielle de la vapeur d'eau (atm) (ajout ~~مهم~~)
-

6. Paramètres de la membrane

- **R_m** : Résistance de la membrane (Ω)
 - **ρ_m** : Résistivité de la membrane (Ω·cm)
 - **l** : Épaisseur de la membrane (cm)
 - **A** : Surface active (cm²)
-

7. Paramètres de concentration et flux

- **C_{O₂}** : Concentration d'oxygène (mol/cm³)
- **C_{H₂}** : Concentration d'hydrogène (mol/cm³) (ajout)

8. Paramètres du stack

- N : Nombre de cellules
- P_{pile} : Puissance du stack (W)

9. Modèle dynamique (gaz et écoulements)

- V_{an} : Volume de l'anode (cm^3)
- n_{H_2} : Quantité d'hydrogène dans l'anode (mol)
- q_{H_2} : Débit molaire d'hydrogène (kmol/s)
- q_{O_2} : Débit molaire d'oxygène (kmol/s)
- τ_{H_2} : Constante de temps de l'hydrogène (s)
- τ_{O_2} : Constante de temps de l'oxygène (s)
- K_{H_2}, K_{O_2} : Constantes molaires ($kmol \cdot atm^{-1} \cdot s^{-1}$)
- K_r : Constante de réaction ($kmol \cdot s^{-1} \cdot A^{-1}$)
- K_v : Constante de la vanne

10. Paramètres du reformer

- τ_{ref} : Constante de temps du reformer (s)
- q_{CH_4} : Débit molaire du méthane (kmol/s)

11. Paramètres électriques (AC)

- V_{ac} : Tension alternative (V)
- I_L : Courant de charge (A)
- P_{ac} : Puissance active (W)
- Q_{ac} : Puissance réactive (VAR)
- P_L : Puissance active de la charge (W)
- X : Réactance (Ω)
- φ : Angle de phase (rad)

12. Commande et électronique de puissance

- m : Indice de modulation
- V_r : Tension de référence (V)
- K_5, K_6 : Gains du régulateur PI
- U : Facteur d'utilisation

13. Paramètres du modèle empirique

- $\xi_1, \xi_2, \xi_3, \xi_4$: Coefficients empiriques
- B : Constante empirique

Tables des matières

| | |
|--|----|
| Page de Garde | 1 |
| Dédicace..... | 2 |
| Remerciements | 3 |
| المخلص..... | 4 |
| Résumé..... | 4 |
| Abstract..... | 5 |
| Liste des symboles | 6 |
| Liste des figures et des tableaux | 9 |
| Introduction générale..... | 14 |
| Chapitre I: Génération sur la pile à combustible | |
| I.1 Introduction..... | 18 |
| I.2 Historique..... | 18 |
| I.2.1 Débuts de la technologie (années 1960)..... | 18 |
| I.2.2 Développement dans l'espace (années 1980) | 18 |
| I.2.3 Utilisation dans les applications militaires et industrielles (années 1990)..... | 18 |
| I.2.5 Recherche et développement continu Depuis le début des années 2000..... | 19 |
| I.3 Principes de fonctionnement et réactions électrochimiques | 19 |
| I.3.1 Séparation des gaz..... | 19 |
| I.3.2 Transport des protons..... | 20 |
| I.3.3 Réaction à l'anode | 20 |
| I.3.4 Réaction à la cathode | 20 |
| I.4 .Différents type des piles..... | 21 |
| I.4 .1 Pile à combustible à membrane échangeuse de protons (PEMFC) | 21 |

| | |
|--|----|
| I.4 .2 Pile à combustible à oxyde solide (SOFC)..... | 21 |
| I.4 .3 Pile à combustible à carbonate fondu (MCFC)..... | 21 |
| I.4 .4 Pile à combustible à acide phosphorique (PAFC)..... | 22 |
| I.4 .5 Pile à combustible à alcaline (AFC)..... | 22 |
| I.4 .6 Pile à combustible à méthanol direct (DMFC)..... | 22 |
| I.5 Piles à membrane électrolyte polymérique (PEMFC)..... | 22 |
| I.5.1 Voici les principales composantes d'une PEMFC..... | 22 |
| I.5.2 Anode (côté hydrogène)..... | 23 |
| I.5.3 Cathode (côté oxygène)..... | 23 |
| I.5.4 Circuits électriques externes..... | 23 |
| I.5.5 Circuit de retour des ions..... | 23 |
| I.6 constitution d'une pile à combustible (PEMFC)..... | 23 |
| I.6.1 Électrolyte..... | 24 |
| I.6.2 Électrodes..... | 25 |
| I.6.3 Catalyseurs..... | 25 |
| I.6.4 Collecteurs de courant..... | 25 |
| I.6.4.1 Collecteur de courant anodique..... | 25 |
| I.6.4.2 Collecteur de courant cathodique..... | 25 |
| I.6.4.3 Bipolaire ou Plaques de diffusion de gaz..... | 26 |
| I.6.4.4 Plaques de séparation..... | 26 |
| I.6.4.5 Conclusion..... | 26 |

Chapitre II: Modélisation du système de pile PEMFC

| | |
|--|----|
| II.1 Introduction..... | 27 |
| II.2 Système de refroidissement et de gestion thermique..... | 27 |
| II.3 Blocs d'étanchéité..... | 27 |
| II.4 Humidificateur..... | 28 |

| | |
|---|----|
| II.4.1 L'humidification sert à plusieurs fins dans une PEMFC..... | 28 |
| II.4.2 Reformeur..... | 30 |
| II.4.3 Circuit d'alimentation en air | 31 |
| II.4.4 Circuit de refroidissement | 32 |
| II.4.5 Circuit électrique..... | 33 |
| II.4.6 Tension de la pile..... | 34 |
| II.4.7 Efficacité du système de pile à combustible..... | 35 |
| II.5 Les applications des piles à combustible | 37 |
| II.6 Bénéfices et limites des piles à hydrogène..... | 37 |
| II.6 Conclusion..... | 38 |

Chapitre III: Simulation de contrôle de pile à combustible PEM

| | |
|------------------------------------|----|
| III.1 INTRODUCTION..... | 39 |
| III.2 PARTIE EXPÉRIMENTALE..... | 40 |
| III.3 RÉSULTATS ET DISCUSSION..... | 43 |
| III.4 CONCLUSIONS..... | 46 |

Chapitre IV : Commande et diagnostic d'un système à pile combustible PEMFC par

| | |
|---|----|
| IV.1 Introduction | 48 |
| IV.1.1 Historique de la logique floue | 48 |
| IV.1.2 Principes fondamentaux | 48 |

| | |
|--|----|
| IV.1.3 Définition d'un sous-ensemble flou..... | 49 |
| IV.1.4 Structure d'un contrôleur flou..... | 50 |
| IV.2.1 Présentation et structure du graphique d'appartenance floues (MFs) de type triangular | 58 |
| II.7 IV 2.2 Compréhension des résultats (d'appartenance floues (MFs) de type triangular) | 58 |
| IV 2.3 Interprétation et Dédutions (d'appartenance floues (MFs) de type triangular) .. | 59 |
| IV.3.1 Caractéristiques et Structure du Graphique (d'appartenance - Puissance PEMFC) : | 60 |
| IV.3.2 Résultats de l'Évaluation (d'appartenance - Puissance PEMFC): | 61 |
| IV.3.3 Interprétation et Dédutions (d'appartenance - Puissance PEMFC) | 61 |
| IV.4.1 Forme et Structure du Graphique (Demande Puissance vs SOC Batterie) : | 62 |
| IV.4.2 Résultats de l'Analyse (Demande Puissance vs SOC Batterie)..... | 63 |
| IV.4.3 Interprétation et Dédutions (Demande Puissance vs SOC Batterie)..... | 63 |
| IV.5.1 Le graphique montre le lien entre la tension de la cellule et la pression partielle d'hydrogène, à humidité relative constante (50 %). On remarque..... | 64 |
| IV.6.1 Structure et Forme du Graphique (d'appartenance floues trapézoïdales et triangulaires) | 66 |
| IV.6.2 Résultats de l'Évaluation (d'appartenance floues trapézoïdales et triangulaires) | 67 |
| IV.6.3 Interprétation et Dédutions (d'appartenance floues trapézoïdales et triangulaires) | 67 |
| IV.7.1 Forme et Structure du Graphique (d'appartenance - Pression H ₂)..... | 68 |
| IV.7.2 Résultats de l'Analyse (d'appartenance - Pression H ₂) | 69 |
| IV.7.3 Interprétation et Dédutions ((d'appartenance - Pression H ₂)..... | 69 |
| IV.8.1 Forme et Structure du Graphique (d'appartenance floues trapézoïdales et triangulaires) : | 70 |
| IV.8.2 Résultats de l'Analyse (d'appartenance floues trapézoïdales et triangulaires) | 71 |
| IV.8.3 Interprétation et Dédutions (d'appartenance floues trapézoïdales et triangulaires) | 72 |
| IV.9.1 Forme et Structure du Graphique (Fonctions d'appartenance - Niveau Alerte)..... | 73 |
| IV.9.2 Résultats de l'Analyse (Fonctions d'appartenance - Niveau Alerte) | 73 |
| IV.9.3 Interprétation et Dédutions (Fonctions d'appartenance - Niveau Alerte)..... | 74 |
| IV.10.1 Forme et Structure du Graphique (Évolution de la Demande et Puissance PEMFC) | 75 |
| IV.10.2 Résultats de l'Analyse (Évolution de la Demande et Puissance PEMFC) | 76 |
| IV.10.3 Interprétation et déductions (Évolution de la Demande et Puissance PEMFC) | 76 |
| IV.11.1 Forme et Structure du Graphique (Évolution de la Température de la Pile) | 77 |

| | |
|---|----|
| IV.11.2 Résultats de l'Analyse (Évolution de la Température de la Pile) | 78 |
| IV.11.3 Interprétation et Conclusions (Évolution de la Température de la Pile)..... | 78 |
| IV 12. Diagnostic et dépannage des systèmes de piles à combustible | 80 |
| V. Conclusion..... | 86 |
| Références | 87 |

Liste des tableaux (Tableaux) :

| Numéro | Titre du tableau | Page |
|--------------|---|------|
| Tableau IV.1 | Règles de contrôle floue PEMFC (Puissance, Température, SOC, Demande) | 54 |
| Tableau IV.2 | Règles de contrôle floue (Tension, Pression H ₂ , Pression O ₂ , Humidité, Niveau Alerte) | 55 |
| Tableau IV.3 | Variables clés dans une pile à combustible (Tension, Température, Pression H ₂) | 77 |
| Tableau IV.4 | Les conditions nominales du système (Tension, Température, Pression H ₂) | 78 |
| Tableau IV.5 | Récapitulatif des défauts (Normal, Sécheresse membrane, Inondation, Manque H ₂ , Surchauffe) | 79 |

Liste des figures

| Numéro | Titre du figure | Page |
|--------------|--|------|
| Figure I.1 | Illustration d'une pile à combustible PEM pendant l'alimentation | 18 |
| Figure I.2 | Principe de la réaction catalytique dans l'électrode volumique | 20 |
| Figure I.3 | Différentes couches d'une cellule élémentaire de PEMFC | 22 |
| Figure I.4 | Structure d'un empilement de cellule d'une pile combustible PEM | 23 |
| Figure I.5 | Structure chimique d'une membrane de type Nafion | 23 |
| Figure I.6 | Électrodes (Carbone recouvert de platine) | 24 |
| Figure II.1 | Schéma de principe d'un système de pile à combustible intégré à un processeur de combustible | 27 |
| Figure II.2 | Différents constituants d'un système pile à combustible | 28 |
| Figure II.3 | Comportement de la tension d'une cellule en fonction du courant | 33 |
| Figure III.1 | PEMFC Horizon | 39 |
| Figure III.2 | Station d'essai utilisée dans les tests | 40 |
| Figure III.3 | Données de la courbe I-V (gauche: en fonction du temps, droite: courbe I-V toutes données) | 42 |
| Figure III.4 | Données de la courbe I-V – évolution en fonction du temps et courbe I-V (ensemble des données) | 43 |
| Figure III.5 | Données de fonctionnement (gauche: hydrogène sec puis saturé; droite: hydrogène saturé puis sec) | 44 |
| Figure IV.1 | Schéma de principe d'un contrôleur flou | 48 |
| Figure IV.2 | Modèle de pile à combustible PEMFC | 48 |
| Figure IV.3 | Schéma fonctionnel de la logique floue d'une pile à combustible PEMFC | 51 |
| Figure IV.4 | Architecture FLC dans Simulink | 53 |
| Figure IV.5 | Fonctions d'appartenance floues (MFs) de type triangular – Température | 56 |
| Figure IV.6 | Fonctions d'appartenance – Puissance PEMFC | 58 |
| Figure IV.7 | Surface de décision – Demande Puissance vs SOC Batterie | 60 |
| Figure IV.8 | Fonctions d'appartenance – Tension Cellule | 62 |
| Figure IV.9 | Fonctions d'appartenance floues trapézoïdales et triangulaires – Tension | 64 |
| Figure IV.10 | Fonctions d'appartenance – Pression H ₂ | 66 |
| Figure IV.11 | Fonctions d'appartenance floues trapézoïdales et triangulaires – Humidité | 68 |
| Figure IV.12 | Fonctions d'appartenance – Niveau Alerte | 71 |
| Figure IV.13 | Évolution de la Demande et Puissance PEMFC | 73 |
| Figure IV.14 | Évolution de la Température de la Pile | 75 |
| Figure IV.15 | Traitement et mise en œuvre du système de diagnostic pour pile PEMFC | 76 |
| Figure IV.16 | Schéma de diagnostic | 80 |

Introduction générale

Introduction générale

Les systèmes de piles à hydrogène à membrane échangeuse de protons, connues sous le nom de PEM, représentent une technique de conversion d'énergie qui repose sur une réaction entre l'hydrogène et l'oxygène à travers un processus électrochimique. Ces piles, souvent appelées membranes polymères, se distinguent par leur efficacité élevée, leur faible émission de polluants et leur capacité à s'adapter à de nombreuses utilisations. Cela explique pourquoi elles suscitent un intérêt croissant [1]. Cette technologie a ses débuts dans les années 1960, lorsque des recherches sur les électrolytes solides en polymère ont été effectuées pour explorer leur potentiel dans les systèmes électrochimiques [2]. Selon les informations du département américain de l'énergie (DOE), ces recherches initiales ont été fondamentales pour l'avancement des piles PEM modernes [3]. Un moment clé a eu lieu en 1983, lorsque General Electric (GE) a lancé le tout premier système PEM, principalement destiné à des applications spatiales, y compris l'alimentation de satellites et d'engins [4]. Cette avancée a validé la capacité des piles PEM à fournir une source d'énergie fiable dans des conditions difficiles [5]. À partir des années 1990 jusqu'aux débuts des années 2000, la technologie a fait de grands progrès [6]. Les recherches ont alors mis l'accent sur l'amélioration de la durée de vie, de l'efficacité et du coût des systèmes [7]. Une avancée significative a été l'ajout du matériau Nafion®, qui a boosté la performance des piles et est vite devenu une norme dans l'industrie [8], aidant à leur adoption à plus grande échelle [9]. L'intérêt de l'industrie automobile pour les piles PEM a augmenté lorsqu'elles ont été considérées comme une alternative viable pour les véhicules à zéro émission [10]. Leur mode de fonctionnement, qui produit de l'électricité grâce à la réaction entre l'hydrogène et l'oxygène, ne créant que de l'eau, les rend particulièrement attrayantes pour diminuer les gaz à effet de serre [11]. Cela a ouvert la voie à de nouvelles recherches pour améliorer les performances et la maturité des systèmes PEM pour les transports [12]. Actuellement, les piles PEM ont connu des développements importants et sont utilisées dans de nombreux domaines [13]. On les trouve notamment dans des voitures et des bus fonctionnant à l'hydrogène, dans des systèmes d'alimentation de secours pour les infrastructures, et dans des appareils portables pour l'électronique [14]. La recherche continue pour augmenter la durabilité, l'efficacité et la rentabilité de cette technologie [15]. Bien que les piles à hydrogène à membrane échangeuse de protons offrent une opportunité prometteuse pour générer une énergie propre et efficace [16], leur déploiement à grande échelle rencontre encore plusieurs défis techniques [17]. Les principaux problèmes identifiés sont décrits ci-dessous [18].

L'un des principaux défis concerne la dégradation des catalyseurs : les métaux utilisés comme catalyseurs, comme le platine, perdent leur efficacité avec le temps, ce qui affecte la performance du système [19]. Ce déclin peut être causé par des impuretés dans l'hydrogène, la dissolution progressive du catalyseur, ou la corrosion de la base en carbone [20]. Un autre défi important est la durabilité de la membrane échangeuse de protons. Cette membrane peut subir des dommages à cause de contraintes physiques, de cycles répétés de contact avec l'eau, ou de l'exposition à des radicaux chimiques réactifs. Cette dégradation se manifeste notamment par une diminution de la conductivité protonique, un mélange accru des gaz, et une baisse des performances globales de la pile. La gestion de l'eau est cruciale pour assurer un fonctionnement adéquat des piles à combustible PEM. Un excès d'humidité peut inonder la cathode et restreindre l'accès à l'oxygène, tandis qu'un manque d'eau peut causer la déshydratation de la membrane, réduisant ainsi sa capacité à conduire les protons. Par conséquent, il est essentiel de développer des stratégies de régulation efficaces pour maintenir une opération stable. La qualité de l'hydrogène utilisé est également un facteur clé. La présence de contaminants, tels que le monoxyde de carbone ou des composés soufrés, peut sérieusement affecter l'efficacité des piles PEM. Ces substances peuvent en réalité empoisonner le catalyseur et diminuer sa réactivité. Pour cette raison, des méthodes de purification ou de reformage sont souvent appliquées pour garantir que le carburant respecte les normes du système. Le coût et les défis associés à l'échelle de production industrielle constituent un autre obstacle significatif. Bien que les coûts aient diminué progressivement, les dépenses pour les matériaux catalytiques, la fabrication des membranes et l'intégration des différentes pièces demeurent élevées. De plus, passer à une échelle plus grande nécessite de gérer en même temps la qualité et les performances, ce qui engendre des problèmes dans la conception et les procédés de fabrication. Ce projet de recherche se concentre sur une étude détaillée de la modélisation, de l'analyse expérimentale et du contrôle des piles PEMFC destinées aux applications énergétiques résidentielles. La méthode mise en œuvre est divisée en quatre parties principales : une introduction générale à la technologie, la création d'un modèle analytique et fonctionnel, une recherche expérimentale pour observer le comportement réel de la pile, et pour finir, la suggestion d'une stratégie de contrôle avancée basée sur la logique floue. Chaque section se termine par un résumé intermédiaire qui met en avant les points clés et assure la continuité du développement scientifique. Il est essentiel de noter que les recherches actuelles visent à surmonter toutes ces limitations pour améliorer la performance, la fiabilité et la compétitivité économique des piles à combustible PEM.

La gestion de l'eau constitue un élément essentiel pour garantir le bon fonctionnement des piles à combustible PEM [23]. Un excès d'humidité peut provoquer l'inondation de la cathode et limiter l'accès de l'oxygène, tandis qu'un déficit hydrique entraîne la déshydratation de la membrane et une diminution de sa capacité à conduire les protons. Il est donc indispensable de mettre en place des stratégies de régulation adaptées afin de conserver un régime opérationnel stable [24, 25].

La qualité de l'hydrogène utilisé joue également un rôle déterminant. La présence d'espèces indésirables, comme le monoxyde de carbone ou les composés soufrés, peut altérer significativement le rendement des piles PEM [26]. Ces contaminants peuvent en effet empoisonner le catalyseur et réduire sa réactivité. Pour cette raison, des procédés de purification ou de reformage sont souvent mis en œuvre afin d'obtenir un carburant conforme aux exigences du système [27].

Le coût et les défis liés au passage à une production industrielle représentent un autre obstacle majeur. Malgré une baisse progressive des prix, les dépenses associées aux matériaux catalytiques, à la fabrication des membranes et à l'intégration des différents composants restent importantes. De plus, la montée en échelle nécessite de contrôler simultanément la qualité et les performances, ce qui soulève des difficultés en matière de conception et de procédés de fabrication [28-30]. Le présent projet de recherche s'articule autour d'une étude approfondie de la modélisation, de l'analyse expérimentale et du pilotage des piles PEMFC destinées aux usages énergétiques résidentiels. La démarche adoptée se décline en quatre parties principales : une introduction générale à la technologie, l'élaboration d'un modèle analytique et fonctionnel, une investigation expérimentale permettant d'examiner le comportement réel de la pile, et enfin la proposition d'une stratégie de commande avancée fondée sur la logique floue. Chaque section se clôt par une synthèse intermédiaire qui met en évidence les points essentiels et assure la continuité du développement scientifique. Il est important de souligner que les travaux de recherche actuels visent à surmonter l'ensemble de ces limitations afin d'optimiser la performance, la fiabilité et la compétitivité économique des piles à combustible PEM.

Chapitre I

Génération sur la pile à combustible

Introduction

La technologie des piles à hydrogène PEM est l'une des plus avancées dans le domaine de l'électro conversion, car elle transforme l'énergie chimique de l'hydrogène en électricité et en chaleur grâce à une réaction électrochimique bien régulée. Au cœur de son fonctionnement se trouve une membrane échangeuse de protons, qui joue un rôle crucial en permettant le passage sélectif des protons tout en empêchant le contact direct entre les gaz réactifs. En présence d'hydrogène et d'oxygène, l'hydrogène se divise à l'anode en protons et électrons. Les protons traversent la membrane PEM, tandis que les électrons passent par un circuit externe, engendrant ainsi un courant électrique. À la cathode, les protons se combinent avec les électrons et l'oxygène pour former de l'eau, ne produisant aucune émission de carbone. Ce premier chapitre se propose de présenter les principes théoriques sous-jacents aux piles PEMFC, leur conception, leurs caractéristiques fondamentales ainsi que leurs avantages et inconvénients pour générer une énergie propre. Il retrace également le parcours historique de cette technologie, ses divers types et les principales applications dans lesquelles elle est utilisée.

I.1 Historique

I.1.1 Début de la technologie (années 1960) :

Les origines des piles à hydrogène PEM remontent à la fin des années 1960, période où Willard Thomas Grubb et Leonard Niedrach, chercheurs à l'Université de Pennsylvanie, ont créé la première membrane échangeuse de protons capable de produire de l'électricité à partir de l'interaction de l'hydrogène avec l'oxygène. Cette découverte a servi de base au développement ultérieur de cette technologie [37].

I.1.2 Développement dans l'espace (années 1980) :

Dans les années 1980, la NASA a commencé à adopter les piles PEM pour ses missions spatiales. Leur légèreté, leur taille réduite et leur haute efficacité en faisaient une option idéale pour les navettes et les installations en orbite, particulièrement pour le programme américain des navettes spatiales [39].

I.1.3 Utilisation dans les applications militaires et industrielles (années 1990) :

Dans les années 1990, la technologie PEM a trouvé des usages dans les secteurs militaires, industriels et stationnaires.

La transition vers cette technologie a été favorisée par son efficacité énergétique, son fonctionnement silencieux et sa capacité à réduire les émissions polluantes [41].

I.1.4 Véhicules à pile à combustible (années 2000) :

Au début des années 2000, les piles à hydrogène PEM ont commencé à être intégrées dans des véhicules électriques à hydrogène. Plusieurs fabricants automobiles ont alors lancé des prototypes, suivis de modèles commercialisés, favorisant ainsi un mode de transport plus respectueux de l'environnement [43].

I.1.5 Recherche et développement continu Depuis le début des années 2000 :

Depuis cette époque, les recherches se sont intensifiées pour améliorer l'efficacité des piles PEM. Cela inclut la réduction des coûts de fabrication, l'augmentation de leur longévité et le renforcement des membranes échangeuses de protons. À l'heure actuelle, la technologie PEM est considérée comme l'une des meilleures options dans le secteur de l'énergie propre. L'essor de l'hydrogène vert, ainsi que les avancées continues dans les matériaux et la conception des piles, laissent présager un rôle clé de ces systèmes dans la transition vers des énergies plus durables

Principes de fonctionnement et réactions électrochimiques :

Séparation des gaz :

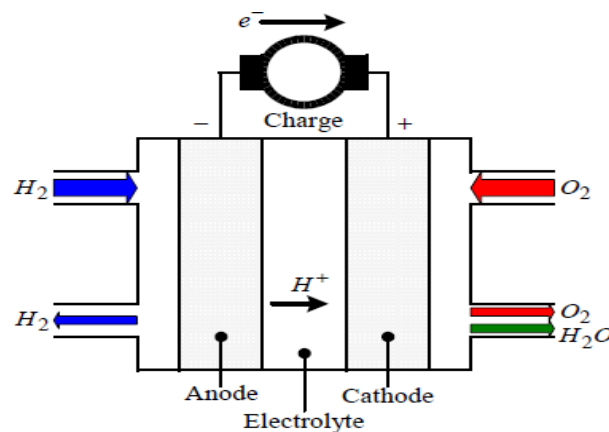


Figure I.1 : Illustration d'une pile à combustible PEM pendant l'alimentation

La membrane PEM joue un rôle essentiel en séparant les zones anodique et cathodique. Elle permet uniquement le passage des protons et empêche celui des électrons, garantissant ainsi la sélectivité du process électrochimique [47].

I.1.6 Transport des protons :

Quand l'hydrogène atteint l'anode, il se décompose en protons (H^+) et en électrons (e^-). Les protons passent à travers la membrane pour atteindre la cathode, tandis que les électrons circulent dans un circuit externe avant de revenir à la pile pour participer à la réaction finale [49].

I.1.7 Réaction à l'anode : [50]

Au niveau de l'anode, l'hydrogène introduit dans la pile est dissocié : il libère des protons et des électrons. Cette étape conduit à la formation d'ions hydrogène (H^+), conformément à la réaction suivante :



I.1.8 Réaction à la cathode :

Du côté de la cathode, les protons ayant traversé la membrane PEM se combinent avec l'oxygène (généralement de l'air) et les électrons qui proviennent du circuit externe. Cette réaction produit de l'eau, souvent sous forme de vapeur :



Cette réaction génère une différence de potentiel d'environ un volt entre les électrodes. Pour obtenir une tension utilisable, les fabricants connectent plusieurs cellules en série, formant un empilement qui assure un rendement électrique adéquat. De plus, la réaction étant exothermique, l'eau produite apparaît à la cathode dans le cas d'une PEM, tandis que dans d'autres systèmes, tels que certaines piles fonctionnant avec un électrolyte anionique à haute température, l'eau peut aussi être produite du côté de l'anode. [51, 52].

Figure I.2 Ce tracé dépeint l'action du platine (Pt) pareille catalyseur au seuil de jonction dans l'électrolyte et le transporteur électronique au sein d'une cuve électrochimique. En exploitant les particules d'hydrogène H^+ logées dans l'électrolyte ainsi que les corpuscules d'électrons e^- émanant du porteur électronique, le platine aiguillonne la réaction d'oxydation réduction suscitant l'élaboration d'hydrogène diatomique. On distingue pareillement la genèse d'eau suivant les modalités d'opération. Ce graphique souligne l'envergure du point de contact catalytique afin d'assurer le passage des charges et la transformation électrochimique pertinente.

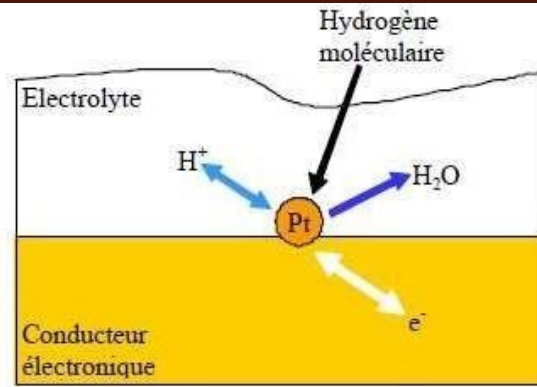


Figure I.2 : Principe de la réaction catalytique dans l'électrode volumique

I.2 Différents types des piles

Il y a de nombreuses sortes de piles à combustible, chacune ayant ses propres caractéristiques et des applications spécifiques. Voici les types les plus courants

I.2.1 Pile à combustible à membrane échangeuse de protons (PEMFC) :

La PEMFC est l'une des technologies les plus courantes et se trouve dans des véhicules à hydrogène, des systèmes stationnaires de puissance faible à moyenne, ainsi que dans certaines solutions portables. Elle fonctionne avec une membrane électrolytique à échange de protons (PEM) et nécessite souvent des catalyseurs à base de platine. Grâce à sa capacité à fonctionner à des températures basses, généralement entre 60 °C et 80 °C, elle permet un démarrage rapide et réagit bien aux changements de charge [53].

I.2.2 Pile à combustible à oxyde solide (SOFC) :

La SOFC utilise un électrolyte en céramique solide, souvent fait d'oxyde de zirconium stabilisé à l'yttrium (YSZ), qui conduit les ions oxyde. Cette pile fonctionne à des températures élevées, allant de 500 à 1000 °C, ce qui permet d'obtenir de bons rendements. Elle est particulièrement adaptée aux installations fixes et aux systèmes de cogénération. Cependant, son utilisation à haute température nécessite une isolation thermique importante et un temps de démarrage plus long. [54].

I.2.3 Pile à combustible à carbonate fondu (MCFC) :

La technologie MCFC utilise un électrolyte fait de carbonates fondus. Fonctionnant vers 650 °C, elle est principalement utilisée dans des applications stationnaires de puissance moyenne et élevée en raison de son rendement élevé.

Cependant, sa température de fonctionnement nécessite des matériaux qui résistent à la corrosion thermique ainsi qu'une gestion thermique précise [55].

I.3 .4 Pile à combustible à acide phosphorique (PAFC)

La PAFC emploie un électrolyte liquide à base d'acide phosphorique. Elle fonctionne à des températures relativement élevées, entre 150 et 200 degrés Celsius, et est surtout utilisée dans des applications stationnaires, telles que la production d'électricité à petite échelle [56].

I.4 .5 Pile à combustible à alcaline (AFC) :

L'AFC utilise un électrolyte liquide alcalin, généralement de l'hydroxyde de potassium (KOH). Elle est utilisée dans certaines applications spatiales et spécifiques à l'industrie, mais son utilisation reste limitée en raison des contraintes relatives aux températures et à l'exigence d'hydrogène pur [57].

I.4 .6 Pile à combustible à méthanol direct (DMFC) :

La DMFC est une variante de la PEMFC qui peut utiliser le méthanol comme combustible sans nécessiter de transformation de l'hydrogène. Elle convient aux applications portables, comme les appareils électroniques fonctionnant avec des piles à combustible. Chaque type de pile à combustible présente ses propres avantages et inconvénients, et le choix dépend des besoins spécifiques de chaque application, comme la puissance, la température de fonctionnement, la durée de vie, la disponibilité du combustible et la facilité d'utilisation. [58].

I.5 Piles à membrane électrolyte polymérique (PEMFC) :

Une cellule à hydrogène à membrane échangeuse de protons (PEMFC), qui signifie "Proton Exchange Membrane Fuel Cell" en anglais, est une sorte de pile à combustible qui produit de l'électricité par le mélange d'hydrogène et d'oxygène. Elle est surtout utilisée pour générer de l'énergie électrique dans diverses situations, comme les automobiles électriques, les systèmes de secours et dans des installations fixes. Le fonctionnement d'une PEMFC dépend de réactions électrochimiques se produisant au sein de la cellule [59].

I.5.1 Voici les principales composantes d'une PEMFC :

La membrane électrolytique : Cette membrane est une couche mince qui permet le passage des ions protons. Elle divise les deux électrodes et facilite le transfert des protons (H^+) de l'anode vers la cathode. Généralement, elle est fabriquée avec des polymères perfluorés comme le Nafion, qui contiennent des groupes acides sulfoniques pour favoriser la conduction des protons [60].

Anode (partie hydrogène):

L'hydrogène est amené du côté de l'anode. Sur la surface de l'anode, le catalyseur, qui est souvent à base de platine, stimule la réaction d'oxydation de l'hydrogène en protons (H^+) et électrons (e^-). Les électrons sont libérés et circulent à travers un circuit électrique externe, produisant de l'électricité, tandis que les protons passent à travers la membrane électrolytique. [61].

I.5.2 Cathode (partie oxygène):

L'oxygène présent dans l'air est introduit du côté de la cathode. Le catalyseur à la cathode favorise la transformation de l'oxygène en eau (H_2O) en utilisant les protons et les électrons venant de l'anode. Cette réaction produit de l'eau et dégage de l'énergie [62].

I.5.3 Circuits électriques externes :

Les électrons créés à l'anode parcourent le circuit électrique externe, générant ainsi un courant utilisable. [63].

I.5.4 Circuit de retour des ions :

Les protons se déplacent vers la cathode via la membrane, complétant ainsi le cycle électrochimique [64].

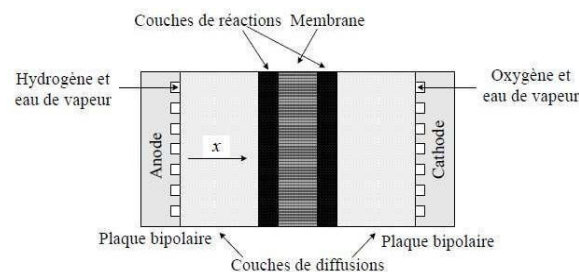


Figure I.3: Différentes couches d'une cellule élémentaire de PEMFC

I.6 Constitution d'une pile à combustible (PEMFC):

Les PEMFC offrent un démarrage rapide, une efficacité élevée à température ambiante et une grande densité énergétique. Leur principal désavantage est l'utilisation de catalyseurs qui sont souvent coûteux, généralement faits de métaux précieux [65].

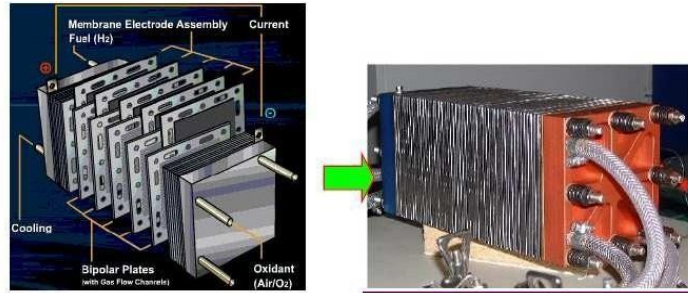


Figure I.4: Structure d'un empilement de cellule d'une Pila combustible PEM

I.6.1 Électrolyte :

L'électrolyte, qui est un élément essentiel de la PEMFC, permet uniquement aux ions de passer. Dans les PEMFC, il se présente sous la forme d'une membrane solide d'environ 100 micromètres d'épaisseur. Le matériau le plus courant est le Nafion® grâce à sa capacité à conduire les protons, sa résistance aux gaz et sa durabilité chimique [66].

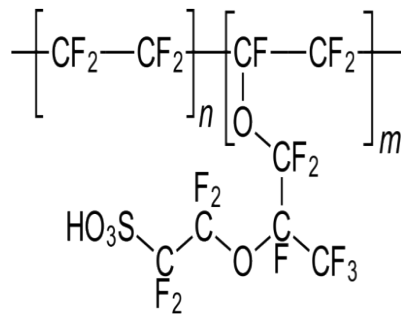


Figure I.5: Structure chimique d'une membrane de type Nafion

I.6.2 Électrodes :

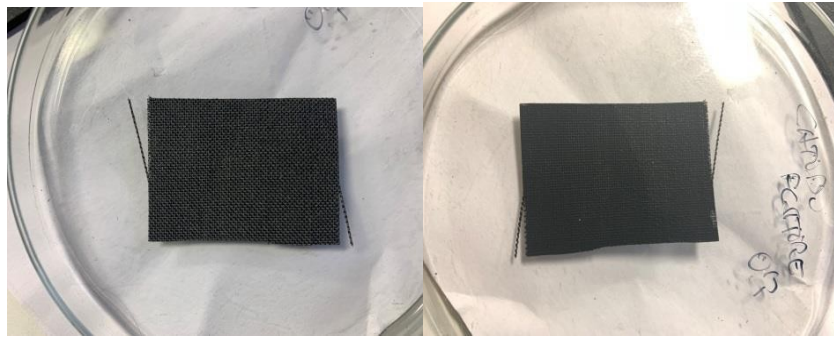


Figure I.6: Électrodes (Carbone recouvert de platine)

La pile possède deux électrodes :

Anode : où se produit l'oxydation de l'hydrogène (H_2) ;

Cathode : où se fait la réduction de l'oxygène (O_2) et la création d'eau (H_2O).

En général, ces électrodes sont fabriquées à partir de carbone recouvert de platine [67].

I.4.1 Catalyseurs :

Les réactions d'oxydation à l'anode et de réduction à la cathode sont accélérées par des catalyseurs principalement composés de platine [68].

I.4.2 Collecteurs de courant :

Leur fonction est de recueillir les électrons générés à l'anode, de les acheminer vers le circuit externe, puis de les redistribuer à la cathode. Ils doivent avoir une faible résistance électrique et supporter les conditions de fonctionnement de la pile [69].

Voici comment ils fonctionnent :

I.4.2.1 Collecteur de courant anodique :

Il reçoit les électrons provenant de l'hydrogène oxydé. Fabriqué avec du graphite, du carbone ou des métaux, il peut également être recouvert de catalyseur pour favoriser la réaction [70].

I.4.2.2 Collecteur de courant cathodique :

Il délivre les électrons nécessaires pour réduire l'oxygène. Sa fabrication est semblable à celle du collecteur anodique [71].

I.4.2.3 Bipolaire ou Plaques de diffusion de gaz :

Ces plaques en carbone ou graphite assurent une répartition égale des gaz et facilitent le passage du courant [72].

I.4.2.4 Plaques de séparation :

Celles-ci empêchent le mélange des gaz et aident à la gestion de l'humidité dans la pile [73].

Conclusion

Ce chapitre a abordé les bases historiques, les mécanismes de fonctionnement et la structure interne des piles à combustible, en mettant particulièrement l'accent sur les PEMFC. Après avoir examiné leur évolution et expliqué leurs réactions électrochimiques, les divers éléments – membrane, électrodes, catalyseurs et collecteurs – ont été décrits pour permettre une pleine compréhension de l'agencement du système. Pour finir, la comparaison entre les principaux types de piles à combustible a clarifié la position des PEMFC parmi les technologies les plus adaptées aux utilisations mobiles et fixes. Cette base théorique prépare la discussion sur la modélisation, le contrôle et le diagnostic dans les chapitres suivants.

Chapitre II

Modélisation du système de

pile PEMFC

Introduction

Ce deuxième chapitre traite de la modélisation mathématique, thermodynamique et électrique des piles à hydrogène PEMFC. Ici, nous détaillons les équations essentielles, les phénomènes internes et les paramètres physiques qui impactent les performances, dans le but de créer un modèle utilisable pour l'analyse et le contrôle

II.1 Système de refroidissement et de gestion thermique :

Pour prévenir la surchauffe, il est crucial d'avoir une gestion thermique adéquate. Des systèmes de refroidissement sont intégrés à la pile afin de garder une température de fonctionnement idéale. [70].

II.2 Blocs d'étanchéité :

Les blocs d'étanchéité offrent une isolation électrique entre les différentes couches de la pile, tout en prévenant les fuites de gaz et d'eau. La conception de la PEMFC vise à maximiser l'efficacité des réactions électrochimiques, à faciliter le mouvement des réactifs et des produits, et à garantir une fiabilité avec une durabilité prolongée. Lorsqu'elle reçoit de l'hydrogène et de l'oxygène ou de l'air, la PEMFC génère de l'électricité, produisant uniquement de l'eau et de la chaleur comme sous-produits. Ceci en fait une option énergétique propre et écologique. [74].

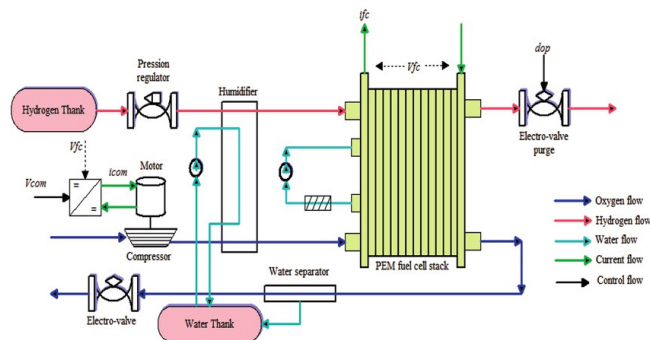


Figure III: Schéma de principe d'un système de pile à combustible intégré à un processeur de combustible

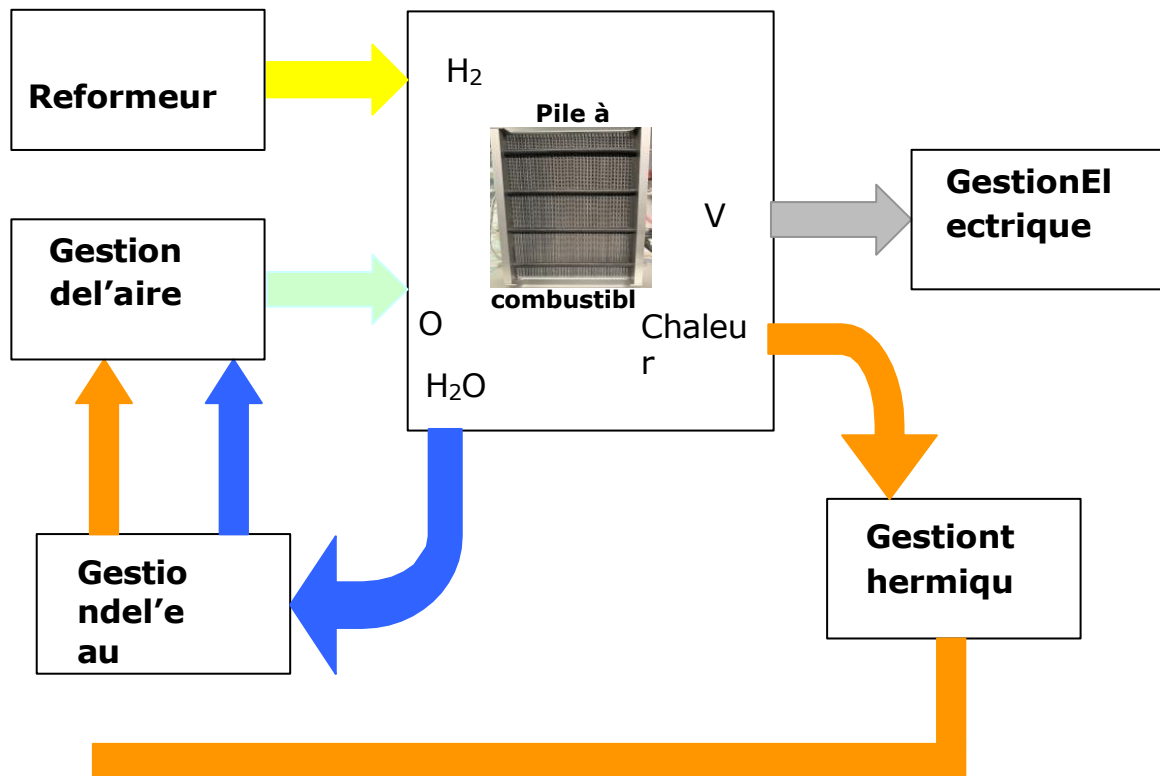


Figure II2: Différents constituants d'un système pile à combustible

II.3 Humidificateur :

Dans une PEMFC, il est crucial de maintenir un taux d'humidité adéquat pour une efficacité opérationnelle. Le processus d'humidification consiste à réguler l'humidité des gaz réactifs, habituellement de l'hydrogène et de l'oxygène ou de l'air, qui pénètrent dans la pile à combustible. Cela est essentiel car la membrane échangeuse de protons a besoin d'être suffisamment hydratée pour que les réactions chimiques se déroulent de manière optimale [13].

II.3.1 L'humidification sert à plusieurs fins dans une PEMFC :

- Prévenir le dessèchement : si les gaz réactifs sont trop secs, cela peut entraîner une déshydratation de la membrane polymère, ce qui réduit la conductivité protonique et affecte la performance de la cellule.

- Régulation de la vitesse des réactions : des niveaux d'humidité adéquats influencent la rapidité des réactions au sein de la pile à combustible. Optimiser ces niveaux est vital pour conserver l'efficacité.

- Gestion de la chaleur : humidifier les gaz entrants aide aussi à maîtriser la température de fonctionnement de la pile, car la vapeur d'eau capte l'excès de chaleur émis durant les réactions électrochimiques. Plusieurs méthodes existent pour humidifier les gaz entrant dans une PEMFC ::
 - a) Bullage : Une méthode populaire consiste à faire passer les gaz dans de l'eau ou une chambre d'humidification pour accroître leur humidité.
 - b) Humidification par membrane : Une autre option est d'utiliser une membrane qui permet à la vapeur d'eau de passer, mais pas aux gaz eux-mêmes. Cela aide à transférer la vapeur d'eau vers les gaz réactifs.
 - c) Humidification externe : Dans certaines situations, un dispositif humidificateur externe est employé pour préparer les gaz avant leur entrée dans la pile à combustible. Cette approche permet de maîtriser précisément les niveaux d'humidité.
 - d) Recirculation : Un certain nombre de systèmes de piles à combustible font circuler une partie de l'eau créée à la cathode vers l'anode afin de conserver le niveau d'humidité désiré.

Le degré d'humidification nécessaire dépend de plusieurs éléments, tels que la température de fonctionnement de la pile à combustible, le matériau de la membrane, le catalyseur de l'électrode et la configuration des cellules. Il est essentiel de trouver un juste milieu entre humidité et sécheresse pour améliorer les performances et la durabilité des systèmes PEMFC [25].

II.3.2 Reformeur :

Un reformeur, dans le cadre des PEMFC (Piles à Hydrogène à Membrane Échangeuse de Protons), est un appareil qui produit de l'hydrogène à partir de matières premières comme les hydrocarbures ou d'autres sources d'hydrogène telles que le méthanol, le gaz naturel, le propane ou même l'ammoniac. Cet appareil est une partie essentielle du système PEMFC, car il offre le carburant nécessaire à la pile à combustible [45].

Les PEMFC fonctionnent en transformant l'hydrogène en électricité par le biais de réactions électrochimiques. Toutefois, l'hydrogène en tant que substance pure n'est pas toujours simplement accessible et peut être compliqué à stocker et à transporter. C'est là que le reformeur entre en jeu, car il extrait l'hydrogène de diverses sources d'hydrocarbures via une réaction de reformage [33].

Il existe principalement deux catégories de reformeurs utilisés dans les systèmes PEMFC :

- C'est la méthode de reformage la plus couramment adoptée. Lors de ce processus, un hydrocarbure comme le gaz naturel est chauffé avec de la vapeur d'eau et un catalyseur à haute température. Cela décompose l'hydrocarbure en hydrogène et dioxyde de carbone. Le gaz de synthèse résultant est ensuite purifié pour générer de l'hydrogène de haute pureté destiné à la PEMFC.
- Reformage auto-thermique ou catalytique: Ce processus associe le reformage à la vapeur à une petite quantité d'oxygène pour produire de la chaleur, ce qui permet de mieux contrôler la réaction et la température tout en générant de l'hydrogène [21].

Ainsi, le reformeur se révèle être un élément essentiel du système PEMFC dans son ensemble, car il fournit l'hydrogène indispensable à la réaction électrochimique au sein de la pile à combustible pour produire de l'électricité. La conception et le fonctionnement du reformeur doivent être soigneusement considérés pour garantir un approvisionnement en hydrogène constant, de qualité élevée et en quantité adéquate pour la pile à combustible [15].

II.3.3 Circuit d'alimentation en air :

Le circuit d'alimentation en air d'une PEMFC (Pile à hydrogène à membrane échangeuse de protons) joue un rôle majeur dans l'ensemble du système de la pile à combustible. Il a pour mission d'offrir l'oxygène (ou l'air) requis pour la réaction électrochimique qui se déroule à l'anode de la PEMFC. Voici le fonctionnement habituel du circuit d'alimentation en air d'une PEMFC :

. Admission d'air : L'air extérieur est aspiré par le système d'alimentation en air. Cet air contient l'oxygène nécessaire à la réaction chimique à la cathode de la pile à combustible:

- Filtration : Avant que l'air puisse entrer dans la pile à combustible, il doit être purifié pour éliminer les particules et les contaminants. Cela permet de s'assurer que l'air utilisé dans la pile est propre et ne nuit pas aux réactions électrochimiques.
- Compression (si nécessaire) : Dans certaines situations, il est nécessaire de compresser l'air pour augmenter sa pression avant qu'il n'atteigne la pile à combustible. Cela peut être essentiel pour améliorer le fonctionnement de la PEMFC.
- Humidification : Comme déjà mentionné, il est crucial d'humidifier l'air avant qu'il n'atteigne la pile à combustible. Cette humidification est importante pour garder la membrane électrolytique hydratée et pour soutenir les réactions électrochimiques.
- Distribution à la cathode : Une fois l'air filtré, comprimé et humidifié, il est dirigé vers la cathode de la PEMFC. À cet endroit, l'oxygène présent dans l'air interagit avec les protons et les électrons qui passent à travers la membrane électrolytique depuis l'anode, produisant ainsi de l'eau et générant de l'électricité
- Contrôle de débit et de pression : Le système d'alimentation en air doit maintenir un flux d'air constant et une pression adéquate pour garantir le bon fonctionnement et l'efficacité de la pile à combustible
- Rejet de gaz d'échappement : Une fois la réaction électrochimique terminée à la cathode, l'air qui quitte la pile peut contenir de la vapeur d'eau et d'autres résidus.
-

Ces gaz d'échappement sont généralement évacués du système. Le circuit d'alimentation en air est conçu pour s'assurer que la pile à combustible dispose d'une quantité

suffisante d'oxygène pour réaliser les réactions chimiques tout en maintenant les conditions requises pour optimiser les performances et la durabilité de la PEMFC [20].

II.3.4 Circuit de refroidissement :

Un fluide de refroidissement circule dans des canaux proches des cellules afin de capter la chaleur produite et d'éviter tout problème de surchauffe. Après avoir traversé la pile, le fluide chaud est rafraîchi dans un échangeur thermique avant d'être renvoyé. Ce circuit fermé permet de maintenir une température uniforme, ce qui est essentiel pour protéger la membrane et assurer un rendement constant.

- Circulation du liquide de refroidissement : Un liquide de refroidissement, souvent de l'eau mélangée à des additifs pour améliorer ses capacités thermiques, est pompé dans le circuit. Ce liquide absorbe la chaleur créée par les réactions électrochimiques ainsi que les pertes internes dans la pile à combustible.
- Circulation près des cellules de la pile à combustible : Le liquide de refroidissement parcourt des canaux ou des tubes situés près des cellules de la pile. Ces canaux ou tubes sont souvent intégrés à la structure de la pile. La chaleur générée par les réactions électrochimiques est transmise au liquide de refroidissement, permettant ainsi de maintenir une température adéquate dans la pile.
- Échange thermique : Le liquide de refroidissement qui circule prend la chaleur des cellules de la pile à combustible. En continuant son chemin, le liquide chauffé est éloigné de la pile, où il libère sa chaleur à un échangeur thermique ou à un radiateur.
- Interaction thermique avec l'extérieur : Après avoir été transférée à l'échangeur de chaleur ou au radiateur, le fluide de refroidissement se refroidit par contact thermique avec l'air extérieur. Dans certains cas, cela peut signifier que la chaleur est émise directement dans l'air ambiant, tandis que d'autres situations peuvent nécessiter un système de refroidissement plus sophistiqué.

- **Circuit fermé :** Le système de refroidissement fonctionne généralement en boucle fermée, ce qui implique que le liquide de refroidissement est constamment remis en circulation dans le système. Cela aide à garder la température de la pile à hydrogène stable et à éviter de grands écarts de température. La gestion du refroidissement est essentielle pour prévenir une surchauffe de la pile à hydrogène, ce qui pourrait endommager la membrane électrolytique et altérer l'efficacité globale. Il doit être soigneusement développé pour équilibrer les températures de fonctionnement, l'efficacité thermique, ainsi que les besoins de performance de la pile à hydrogène.

II.3.5 Circuit électrique :

La pile à hydrogène à membrane échangeuse de protons produit un courant continu qui doit être collecté, préparé et distribué. Le circuit électrique se compose de :

- **Pile à hydrogène :** Elle constitue l'élément clé du circuit électrique. La PEMFC transforme l'hydrogène et l'oxygène (ou l'air) en électricité grâce à des réactions chimiques qui se produisent sur ses électrodes (anode et cathode) et à travers une membrane électrolytique.
- **Collecteurs d'électrodes :** Les électrons générés par les réactions dans la pile à hydrogène sont captés par les électrodes et dirigés vers les câbles de connexion.
- **Câbles de connexion :** Ces câbles transportent les électrons produits par la pile à hydrogène vers le circuit de conversion de l'énergie.
- **Convertisseur DC/DC (si nécessaire) :** Dans certaines configurations, un convertisseur DC/DC est intégré pour modifier la tension produite par la pile à hydrogène à un niveau spécifique requis pour une certaine application. Par exemple, cela peut être nécessaire pour alimenter des appareils électroniques ayant besoin d'une tension différente de celle fournie par la pile.
- **Inversion (si nécessaire) :** Parfois, un processus d'inversion de courant est nécessaire pour changer le courant continu (DC) issu de la pile à hydrogène en courant alternatif (AC) qui peut alimenter des appareils électriques traditionnels.

- Système de stockage d'énergie (si nécessaire) : Afin d'assurer une alimentation constante, des dispositifs comme des batteries ou des super condensateurs peuvent être intégré dans le circuit électrique. Ils aident à stocker l'énergie excédentaire produite et à la libérer en cas de besoin accru.
- Distribution de l'électricité : L'électricité générée par la pile à hydrogène peut être envoyée à divers dispositifs ou systèmes, par exemple des voitures électriques, des bâtiments, des appareils électroniques, etc
- Système de contrôle et de surveillance : Un système de contrôle est crucial pour suivre le fonctionnement de la pile à hydrogène, ajuster la production d'énergie en fonction des besoins et garantir la sécurité de son utilisation..

Le circuit électrique d'une PEMFC doit être planifié avec soin pour assurer une conversion d'énergie efficace, une distribution fiable, ainsi qu'un contrôle précis de la production et de la consommation d'énergie.

II.3.6 Tension de la pile :

La tension totale d'une pile à combustible est influencée par le nombre de cellules connectées en série, et la taille de la surface active détermine le courant produit. La description de la caractéristique électrique d'une cellule de pile à combustible à basse température (PEMFC) est présentée sur la Figure. Cette caractéristique est divisée en trois zones. La première zone montre les pertes d'activation, où la tension à vide, connue comme la tension de Nernst (environ 1,23 V), diminue rapidement. L'augmentation du courant engendre des pertes supplémentaires, connues sous le nom de pertes ohmiques, ce qui entraîne une diminution linéaire de la tension dans la deuxième zone. Dans la troisième zone, avec des courants élevés, la tension chute rapidement, ce qui est dû aux pertes de concentration. On a alors

$$V = ENerst - pertes.....II.1 [12].$$

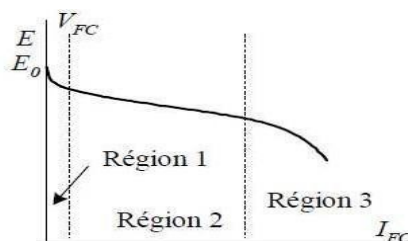


Figure II.3 : Comportement de la tension d’une cellule en fonction du courant

Tension de Nernst : En circuit ouvert, dans des conditions standards, la différence théorique de potentiel entre une électrode à hydrogène et une électrode à oxygène est d'environ 1. 23 V

lorsque l'eau se forme comme liquide, et de 1.18 V lorsqu'elle se transforme en vapeur. Cette valeur de potentiel est appelée tension de Nernst. Les piles à hydrogène avec membrane échangeuse de protons (PEMFC) subissent plusieurs pertes de tension qui influencent leur efficacité générale. Les trois types principaux de pertes de tension dans une PEMFC sont: a) **Pertes d'activation** : Ces pertes résultent de la résistance aux réactions électrochimiques aux électrodes. Les réactions d'oxydation de l'hydrogène à l'anode et de réduction de l'oxygène à la cathode nécessitent des sites actifs sur les catalyseurs des électrodes. Les pertes d'activation se produisent quand ces réactions exigent un surplus d'énergie en raison des résistances aux réactions électrochimiques à l'interface entre l'électrode et l'électrolyte. L'utilisation de catalyseurs efficaces et l'optimisation des conditions opérationnelles peuvent réduire cette perte.

b) Pertes ohmiques : Ces pertes proviennent de la résistance électrique des matériaux de la pile à combustible, comme l'électrolyte à échange de protons, les électrodes et les collecteurs de courant. La résistance ohmique cause une chute de tension à travers ces matériaux, ce qui réduit l'efficacité de la pile. Pour diminuer cette perte, il est crucial d'utiliser des matériaux conducteurs et de minimiser les distances que doivent parcourir les charges électriques [13].

c) Perte de diffusion massive (ou perte de concentration) : Cette perte survient à cause de la diffusion restreinte des réactifs, qui sont l'hydrogène et l'oxygène, vers les électrodes. Si les réactifs n'atteignent pas rapidement les zones actives sur les électrodes, cela limite les réactions électrochimiques et provoque une chute de tension. Il est essentiel que les PEMFC maintiennent un flux régulier de réactifs vers les électrodes pour réduire cette perte [25].

Ces trois types de perte de tension sont directement liés aux propriétés des matériaux des PEMFC, aux dynamiques des réactions électrochimiques, et aux conditions de fonctionnement de la pile. Pour améliorer l'efficacité globale d'une PEMFC, il est nécessaire d'optimiser ces divers éléments afin de diminuer ces pertes de tension et d'accroître l'efficacité énergétique de la pile.

II.3.7 Efficacité du système de pile à combustible:

À la différence des moteurs thermiques qui sont limités par le rendement de Carnot (souvent en dessous de 30 %, rarement supérieur à 40 %), une pile à combustible peut réaliser un rendement plus élevé grâce à la conversion directe de l'énergie chimique en électricité

$$\eta_{\text{moteur}} = \frac{W_r}{-\Delta H} = 1 - \frac{T_2}{T_1} \dots \dots \dots \text{II.2}$$

Paramètres :

Wr : Travail mécanique réversible fourni (J)

H : Enthalpie de réaction (-ΔH chaleur de réaction à pression constante) (J)

T1/T2 : Températures absolues auxquelles la machine opère (K)

Ce rendement ne dépasse pas 40 % pour les meilleures machines (par exemple, une turbine à gaz), et il est généralement en dessous de 30 % pour les moteurs à combustion interne.

L'efficacité d'une pile fonctionnant sous des températures et des pressions constantes dans des conditions réversibles, c'est-à-dire en équilibre, s'exprime ainsi :

$$\eta_{pile} = \frac{we}{-\Delta H} = \frac{\Delta G}{\Delta H} = 1 - \frac{T\Delta S}{\Delta H} \dots \dots \dots \text{II.3}$$

L'énergie électrique maximale générée dans une pile à combustible équivaut à l'enthalpie libre, soit ΔG de la réaction mentionnée ci-dessus :

$$W_e = -\Delta G \dots \dots \dots \text{II.4}$$

Le potentiel théorique d'une pile à combustible, E0, est donc :

$$E_0 = \frac{-\Delta G}{nF} = 1.23V \dots \dots \dots \text{II.5}$$

Transformation directe : énergie de combustion vers énergie électrique. Néanmoins, le rendement réel d'une pile, qui fournit de l'énergie à une charge extérieure avec une densité de courant J, est inférieur à ce rendement réversible, en raison des surtensions (notamment à la cathode pour les piles à hydrogène/oxygène) et des pertes ohmiques causées par la résistance Rm de l'électrolyte entre les deux électrodes et les résistances de contact.

II.4 Les applications des piles à combustible :

Les piles à hydrogène à membrane échangeuse de protons (PEMFC) trouvent de nombreuses utilisations grâce à leur efficacité, leurs faibles émissions, leur taille réduite et leur réactivité rapide. Voici quelques-unes des utilisations principales des PEMFC :

- Véhicules électriques propulsés par hydrogène,
- Sources d'alimentation de secours,
- Appareils électroniques portables,
- Application militaire,
- Génération d'énergie stationnaire et cogénération,
- Robots, drones et technologies nouvelles,
- Solutions d'intégration au réseau pour la stabilisation de l'énergie.

Elles se caractérisent par leur rapidité de réaction, leur format compact et leur absence de pollution.

II.5 Bénéfices et limites des piles à hydrogène :

Les piles à hydrogène à membrane échangeuse de protons (PEMFC) ont plusieurs bénéfices et limites, qui influencent leur utilisation dans différents contextes. Voici les principaux avantages et désavantages des PEMFC:

1. Bénéfices des PEMFC [13]. :

- Efficacité énergétique élevée,
- Émissions réduites (principalement de l'eau et de la chaleur),
- Mise en marche rapide,
- Design compact,
- Fonctionnement silencieux,
- Potentiellement longue durée de vie.

2 Limitations des PEMFC :

- Problèmes de production et de stockage d'hydrogène,
- Sensibilité aux contaminants,
- Manque d'infrastructure de recharge,
- Difficultés de gestion thermique.

Conclusion

Ce chapitre a présenté les différents phénomènes et sous-systèmes d'une PEMFC : humidification, apport d'air, refroidissement, circuit électrique et pertes internes. Malgré les défis liés aux coûts, la pureté du combustible et l'infrastructure, les PEMFC demeurent une technologie prometteuse, efficace et écologique. Le modèle théorique développé ici servira de fondement pour comparer avec des données expérimentales d'une pile commerciale, qui seront exposées dans le prochain chapitre.

Chapitre

III

Expérience de
performance réelle des
piles à combustible PEM

INTRODUCTION

Ce chapitre présente une recherche expérimentale menée sur une pile à hydrogène de type PEMFC. Nous allons aborder les outils utilisés, la méthode expérimentale, les conditions de tests ainsi que la collecte des données pour analyser l'effet de divers paramètres opérationnels. Les piles à hydrogène à membrane échangeuse de protons (PEM) constituent une technologie avancée dans le secteur des énergies renouvelables, offrant de bonnes perspectives pour faire face aux défis pressants de la durabilité énergétique et de la protection de l'environnement. Ces dispositifs fonctionnent selon un processus électrochimique où l'hydrogène et l'oxygène se combinent pour générer de l'électricité, ne produisant que de l'eau et de la chaleur, ce qui leur confère un caractère propre et écologique. Un des principaux atouts des piles PEM est leur grande efficacité et leur fonctionnement à des températures relativement basses, ce qui les rend idéales pour divers usages allant de la propulsion de véhicules à la production d'électricité fixe. Leur taille réduite, leur rapidité de démarrage et leur aptitude à fonctionner sous différentes charges accentuent leur attrait pour de multiples situations d'utilisation. Toutefois, malgré ces nombreux avantages, les piles PEM présentent certaines limitations. L'une des principales étant leur dépendance vis-à-vis de matériaux catalyseurs onéreux, comme le platine, ce qui peut alourdir considérablement les coûts de fabrication. En outre, leur sensibilité aux impuretés présentes dans l'hydrogène et l'exigence d'un contrôle rigoureux de l'eau représentent des défis importants à leur adoption généralisée. Pour surmonter ces obstacles et exploiter pleinement le potentiel des piles PEM, des chercheurs ont réalisé des études approfondies pour optimiser leur performance, augmenter leur longévité et diminuer leurs coûts. Ces recherches portent sur divers domaines, tels que le développement de nouveaux catalyseurs, l'ingénierie des membranes, la gestion de l'eau et l'intégration des systèmes. De nombreux articles scientifiques ont contribué à améliorer la connaissance et le développement des piles PEM. À titre d'exemple, les travaux de H. Wang et al. se sont penchés sur la création et la synthèse de catalyseurs afin d'augmenter l'efficacité et la durabilité des piles PEM. De même, les investigations de S. Mukerjee et J. McBreen ont examiné des stratégies novatrices pour réduire la détérioration des catalyseurs et l'amélioration de la durabilité à long terme des systèmes de piles PEM sont des enjeux majeurs. En résumé, les piles à hydrogène PEM représentent une innovation qui pourrait changer profondément les systèmes énergétiques et diminuer leur impact écologique. Bien qu'elles présentent des bénéfices considérables en termes d'efficacité, de propreté et de flexibilité, des recherches continues sont nécessaires pour surmonter leurs limites et favoriser une adoption plus large. Depuis plusieurs années, l'Unité

des Piles à Combustible et Intégration des Systèmes du CIEMAT collabore avec différentes piles à combustible à électrolyte polymère (PEMFC) provenant de plusieurs fabricants. Il a été constaté que les propriétés de ces piles sont affectées par divers facteurs, tels que les conditions de fonctionnement, les compositions du carburant et de l'oxydant, ainsi que la température et la pression de fonctionnement, et que l'humidité ambiante joue également un rôle. Des expérimentations ont été menées sur une pile à combustible commerciale pour analyser comment les conditions de fonctionnement, en particulier l'humidité des gaz, influencent son comportement sous diverses situations opérationnelles.

III.1 PARTIE EXPÉRIMENTALE

La pile à combustible Horizon H-300 fonctionne en continu pour produire de l'énergie et intègre un système de contrôle interne intelligent qui effectue deux opérations périodiques cruciales pour maintenir ses performances :

1) Ouverture de la vanne de purge : L'hydrogène utilisé dans la pile n'est pas totalement pur et, pendant son fonctionnement, certains gaz ou impuretés (comme la vapeur d'eau ou des sous-produits) s'accumulent dans les canaux.

L'unité de contrôle ouvre donc brièvement la vanne de purge pour expulser ces impuretés. Ceci entraîne une chute soudaine et temporaire de la tension ou du courant, car le débit de combustible est momentanément modifié.

2) Activation du court-circuit : Simultanément à la purge, un court-circuit interne est parfois activé brièvement.

Son objectif est de :

Nettoyer les électrodes des dépôts accumulés

Améliorer la répartition de la réaction au sein de la pile, Maintenir l'efficacité de la pile à long terme, Ceci provoque également une distorsion momentanée du signal électrique (comme une chute rapide ou une impulsion anormale).

Quel est l'impact sur les données ?

Lors de l'enregistrement de données de tension ou de courant, ces phénomènes se manifestent par :

Des pics ou des chutes de tension Des variations soudaines et abruptes qui ne reflètent pas les performances réelles et stables de la cellule. Ces pics ne reflètent pas le comportement

de la cellule en fonctionnement normal, mais uniquement ses processus d'auto-maintenance. Ces deux actions entraînent l'apparition de certaines données dans les enregistrements correspondant à ces moments, qui ont été supprimées des données globales pour minimiser le bruit produit dans les signaux. Les essais ont été réalisés sur une station d'essai capable de faire fonctionner des PEMFC jusqu'à 1 kW de puissance, avec la possibilité d'alimenter les dispositifs et de contrôler les débits d'hydrogène pur ou d'un mélange gazeux, et de travailler sous différentes conditions de pression.

La station est contrôlée par un programme développé en Labview dans notre laboratoire, permettant de définir différentes variables de fonctionnement et de stocker les données pour toutes ces variables et leur évolution tout au long des essais. Ces essais n'ont pas utilisé de mélanges, et seul l'hydrogène a été utilisé comme carburant, fourni à partir d'une bouteille (grade N48) fournie par Air Liquide, avec le débit mesuré à l'aide d'un débitmètre (Bronkhorst), et l'air ambiant comme oxydant, fourni automatiquement par les ventilateurs du stack de la pile à combustible. Pour réguler la consommation de la pile à combustible, une charge électronique HH PL1000 a été utilisée, également contrôlée par le programme. Les essais réalisés étaient de deux types.

Le premier consistait à obtenir les courbes caractéristiques I-V à travers des étapes où l'intensité du courant est d'abord fixée à des valeurs croissantes, puis décroissantes, avec les données de tension du stack et de l'énergie générée, ainsi que les paramètres de la station, stockées. Dans différents essais, l'humidité de l'hydrogène fourni a été variée en le faisant buller à travers un humidificateur avec de l'eau à différentes températures.

FIGURE III.1: PEMFC Horizon

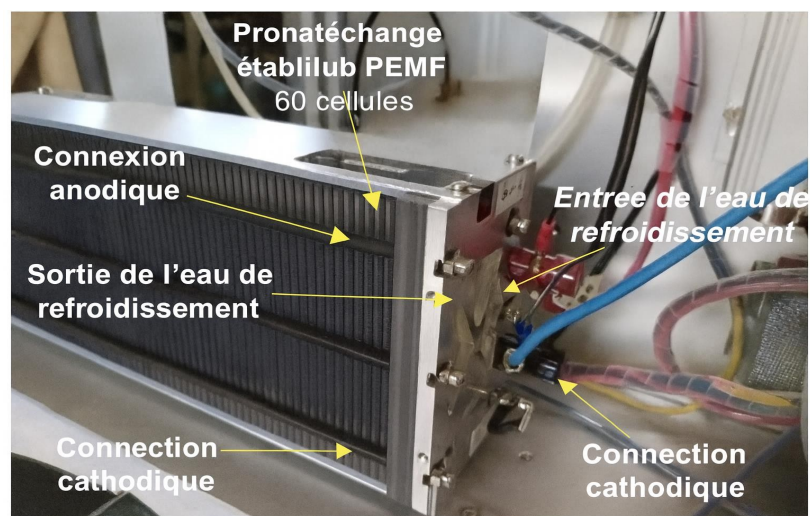


FIGURE III.1: PEMFC Horizon

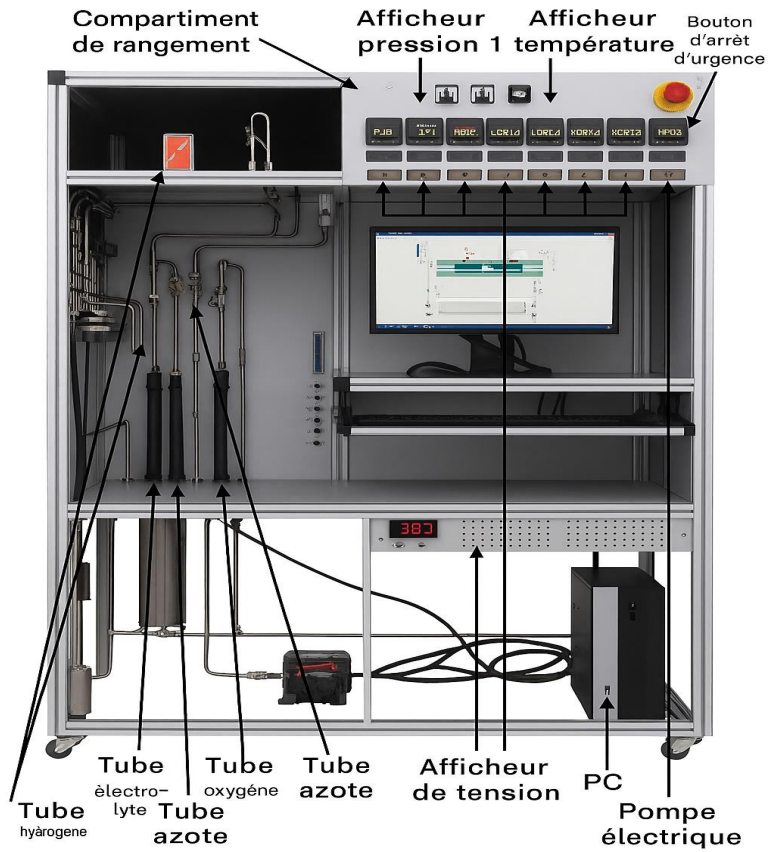
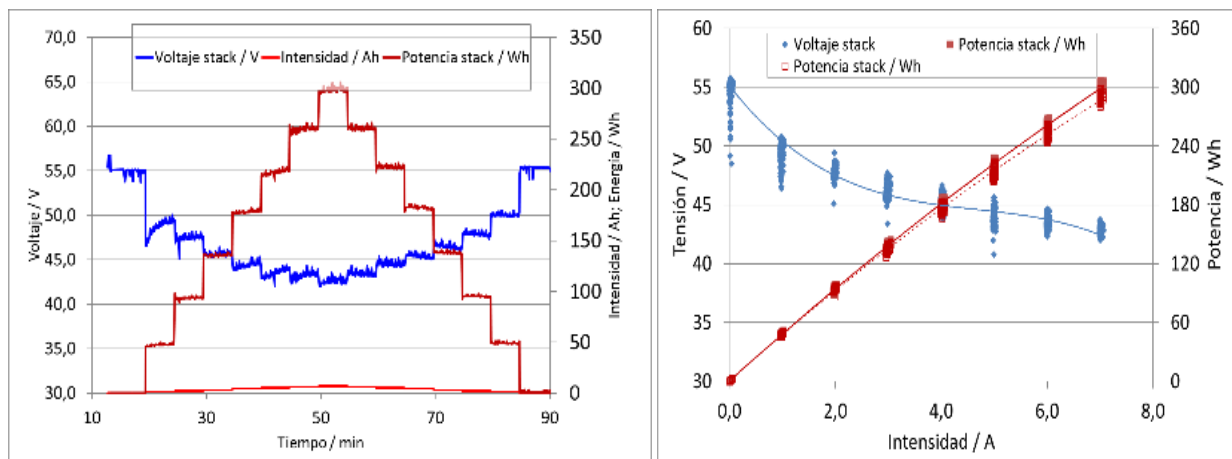


FIGURE III.2 : station d'essai utilisées dans les tests.

III.3 RÉSULTATS ET DISCUSSION :

Courbes obtenues en fonctionnement sous différentes conditions.

Les courbes ont été créées en faisant fonctionner la pile dans diverses situations. Les premières conditions étaient celles fournies par le fabricant : hydrogène sec à l'anode à pression constante (0,5 bar) et air ambiant automatiquement fourni à la cathode. Comme pour les autres courbes, l'effet de l'humidité est particulièrement visible au début. La pile n'avait pas fonctionné pendant plusieurs jours, ce qui a fait baisser l'humidité de la membrane, selon la température et l'humidité ambiantes. Lors du lancement des mesures pour établir la courbe et de l'augmentation de l'intensité du courant, une chute brutale de la tension a été remarquée en raison de la montée des polarisations dépendantes du courant, surtout celle d'activation. Ensuite, la tension a lentement augmenté lorsque les composants, en particulier la membrane, ont atteint un bon niveau d'humidité, optimisant ainsi leurs performances. Avec une humidité croissante, la résistance interne de l'assemblage membrane-électrode (MEA) a légèrement diminué, conséquemment à une diminution de la polarisation ohmique et à une hausse de la tension de la pile. Lors des étapes suivantes, le point de départ a démontré une membrane déjà humidifiée, maintenant une tension stable ou légèrement croissante à chaque niveau d'intensité de courant enregistré.



. **Figure III3** : Données de la courbe I-V. À gauche : en fonction du temps de fonctionnement. À droite : courbe I-V (toutes les données).

Dans le graphique, les informations ont été recueillies au fil du temps, illustrant la courbe représentative avec les données de tension du système et d'énergie produite en rapport avec l'intensité du courant. Une distinction claire apparaît entre les données relevées dans la première section de la courbe et celles relevées dans la seconde section (intensité en baisse)

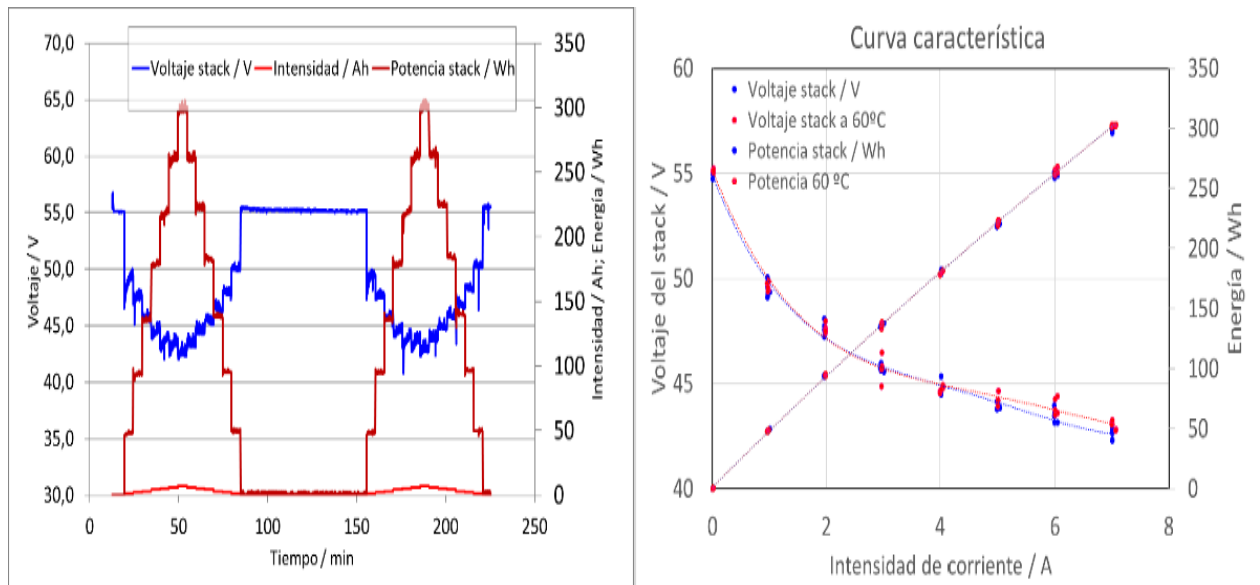


Figure III 4. Données de la courbe I-V. À gauche : évolution en fonction du temps de fonctionnement. À droite : courbe I-V (ensemble des données).

Dans les deux situations, on remarque une montée de la tension au commencement de chaque niveau de courant. Pendant la phase de baisse, la tension subit une légère diminution durant la stabilisation. Cette fluctuation est liée au taux d'humidité de la membrane. D'un côté, la quantité d'eau générée est en rapport direct avec le courant fourni par la cellule ; de l'autre, le flux d'air traversant la cathode est influencé par la température de la pile. Quand le flux d'air est élevé, le phénomène d'entraînement d'eau augmente, ce qui diminue l'humidité de la membrane. Cela provoque une légère augmentation de la résistance interne et, par conséquent, une hausse de la tension de la cellule. L'évolution de la tension de l'empilement dans un régime stable, sur une durée prolongée, a également été examinée. La pile a été stabilisée à un courant constant de 5 A, d'abord en conditions normales de fonctionnement, c'est-à-dire que l'anode était fermée et que l'hydrogène sec était introduit à une pression d'entrée de 0,5 bar, avec un contrôle automatique de la température. Ensuite, elle a été alimentée avec de l'hydrogène saturé à 80 °C. Le comportement observé ressemble à celui des courbes caractéristiques : lorsque le courant est maintenu à 5 A, une forte chute de la tension se produit, causée par les polarisations d'activation et ohmique. Par la suite, la tension remonte partiellement grâce à l'absorption progressive de l'eau produite par la

membrane, ce qui abaisse la résistance interne. Après cette première phase à courant constant, la pile à combustible est mise en pause sans imposer de courant.

Au cours de cette période, bien qu'il n'y ait pas de production d'eau et qu'un flux d'air soit maintenu, une partie de l'eau présente dans les composants est entraînée par l'air qui circule dans la pile. Cela entraîne une légère augmentation de la résistance interne et, par conséquent, une petite baisse de la tension de l'accumulateur. Ensuite, au cours de la troisième phase de l'essai, une intensité de 5 A est appliquée à nouveau, mais de l'hydrogène humidifié grâce à un saturateur réglé à 80 °C alimente la pile cette fois-ci. Le comportement de la cellule reste semblable à celui de la première phase, bien que l'humidification y soit plus rapide. La hausse de tension notée est également un peu plus élevée, ce qui montre que la membrane atteint son niveau optimal d'humidité plus rapidement grâce à l'eau excédentaire introduite à l'anode. De plus, il semble que la saturation soit plus complète, car la tension mesurée est légèrement supérieure à celle observée avec de l'hydrogène non humidifié. Dans la dernière partie de l'essai, un effet dû à cette eau supplémentaire se manifeste : après quelques minutes, la tension de la pile commence à diminuer, réduisant ainsi progressivement le bénéfice initial. Cette fluctuation est due à l'accumulation d'eau sur le côté anode, entraînant une saturation locale de la membrane et un dépôt d'eau sur la surface de réaction. Cela cause une augmentation de la résistance interne et une chute de la tension de la pile. Un autre essai a également été réalisé, cette fois-ci en changeant l'ordre des précédents : la pile a d'abord fonctionné pendant environ 50 minutes avec de l'hydrogène saturé à 80 °C, puis l'hydrogène sec a remplacé l'alimentation. L'évolution observée est comparable à celle du cas précédent, mais il n'y a pas cette fois-ci de baisse significative de la tension due à une sursaturation d'eau du côté anode. Pendant cette phase de fonctionnement, la tension demeure stable une fois l'équilibre atteint. Lorsque l'apport en eau s'arrête, seul un léger changement se produit : une petite augmentation de la tension, indiquant qu'il restait une certaine sursaturation. L'introduction de l'hydrogène sec permet à cet excès d'eau de disparaître et la résistance interne diminue légèrement, entraînant une petite hausse de la tension de l'accumulateur.

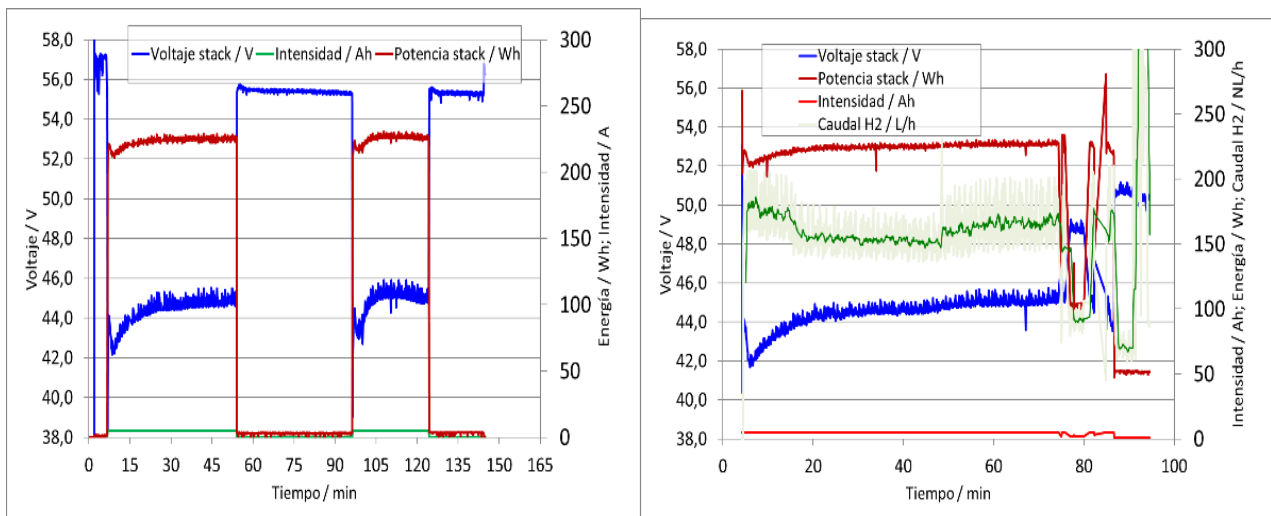


Figure III 5 : Données de fonctionnement. À gauche : alimentation d’abord en hydrogène sec, puis en hydrogène saturé. À droite : alimentation d’abord en hydrogène saturé, puis en hydrogène sec.

De nombreux essais supplémentaires ont été effectués pour analyser comment le taux d'humidité affecte les performances de cette pile à combustible. Des analyses ont été réalisées pour identifier les diverses contributions à la polarisation et leur relation avec le niveau d'humidité de l'hydrogène utilisé.

III.4 CONCLUSIONS :

Diverses expérimentations ont été effectuées pour évaluer l'impact de l'humidité sur l'efficacité d'une pile à combustible en polymère commerciale. De l'hydrogène sec est fourni, et de l'air ambiant est employé, tout en maintenant le taux d'humidité relative de l'air constant. Lorsque la pile fonctionne normalement, l'eau produite est absorbée par la membrane jusqu'à atteindre un niveau maximal, qui représente sa saturation. L'apport d'air au niveau de la cathode, en plus de fournir l'oxygène nécessaire pour la réaction, élimine l'excès de chaleur généré par la réaction et l'eau créée à la cathode, assurant ainsi que la pile demeure à un taux d'humidité adéquat pour fonctionner. Les résultats obtenus ont permis de confronter le fonctionnement réel de la pile avec les prévisions théoriques issues du modèle. Ces constatations forment une Fondation pour élaborer une stratégie de contrôle optimale adaptée aux variations dynamiques du système, ce qui est l'objectif du prochain chapitre

Chapitre IV

**Commande et diagnostic d'un système
à pile combustible PEMFC par logique
floue**

Introduction

Ce dernier chapitre aborde la création, l'exécution et la simulation d'une stratégie de commande basée sur la logique floue, visant à stabiliser la tension fournie par une pile à hydrogène PEMFC. Le processus complet – la définition des paramètres, la création des règles floues et l'examen des résultats numériques – est expliqué en détail. La logique floue est une extension de la logique traditionnelle. Contrairement à cette dernière, qui repose sur une appartenance binaire (vrai ou faux), la logique floue prend en compte des degrés continus allant de 0 à 1, ce qui permet de représenter de manière plus précise les phénomènes imprécis ou incertains. Ce cadre conceptuel est particulièrement utile pour décrire le comportement de systèmes complexes tels que les piles à combustible, où de nombreuses variables changent simultanément et de manière non linéaire [82].

IV.1.1 Historique de la logique floue :

Lotfi A. Zadeh a proposé la logique floue en 1965 dans son article fondamental intitulé "Fuzzy Sets". Cette publication établit les bases des ensembles flous, où un élément peut appartenir à un ensemble à un degré intermédiaire au lieu d'une manière absolue. Au fil des ans, Zadeh et d'autres chercheurs ont élargi cette théorie en développant :

- ✓ des opérateurs flous (intersection, union, complément),
- ✓ des relations floues,
- ✓ des systèmes de commande flous.

Ces progrès ont ouvert la voie à de nombreuses utilisations dans les domaines de l'automatique, de la robotique, de l'intelligence artificielle et de la prise de décision. Par la suite, des méthodes hybrides qui mélangent réseaux de neurones et logique floue ont renforcé l'importance de cette théorie dans les systèmes intelligents contemporains [82].

IV.1.2 Principes fondamentaux :

1. Représentation floue :

À l'inverse de la logique booléenne, la logique floue ne contraint pas une variable à être uniquement vraie ou fausse. Elle accepte des états intermédiaires, tels que :

- « plutôt élevé »,
- « presque vrai »,
- « un peu froid ».

Chaque notion est décrite à l'aide d'une fonction d'appartenance qui attribue à une valeur numérique un degré entre 0 et 1.

2. Opérations floues essentielles :

- ET flou (min) : prend le degré d'appartenance le plus bas.
- OU flou (max) : prend le degré le plus élevé.
- NON flou ($1 - \mu$) : calcule le complément.

Les règles floues sont formulées en langage courant selon la structure :
SI condition ALORS action.

IV.1.3 Définition d'un sous-ensemble flou :

Un sous-ensemble flou A d'un ensemble universel X est décrit par une fonction d'appartenance $\mu_A(x)$ qui attribue à chaque élément x de X un niveau d'appartenance allant de 0 à 1, ce qui montre à quel point x appartient à A.

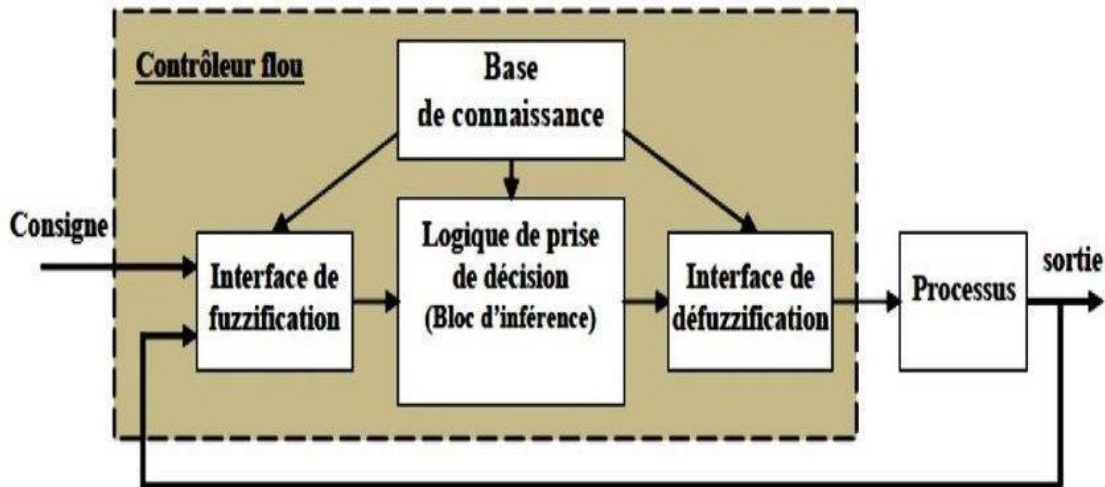


Figure IV 1 : Schéma de principe d'un contrôleur flou

IV.1.4 Structure d'un contrôleur flou :

Structure d'un contrôleur flou :

Un contrôleur flou standard se compose de :

1. Entrées : valeurs mesurées (ex. tension, température, erreur de régulation).
2. Fuzzification : transformation des chiffres en niveaux flous.
3. Base de règles floues : collection de règles du type SI... ALORS...
4. Moteur d'inférence : activation et combinaison des règles.
5. Agrégation : union des sorties floues.
6. Défuzzification : transformation en une commande numérique utilisable.

Ce processus permet d'imiter le raisonnement humain. Source : Lee (1990) [83].

Utile pour les systèmes compliqués qui ne se laissent pas décrire par des équations précises.

Utile pour les systèmes complexes non modélisables par équations précises.

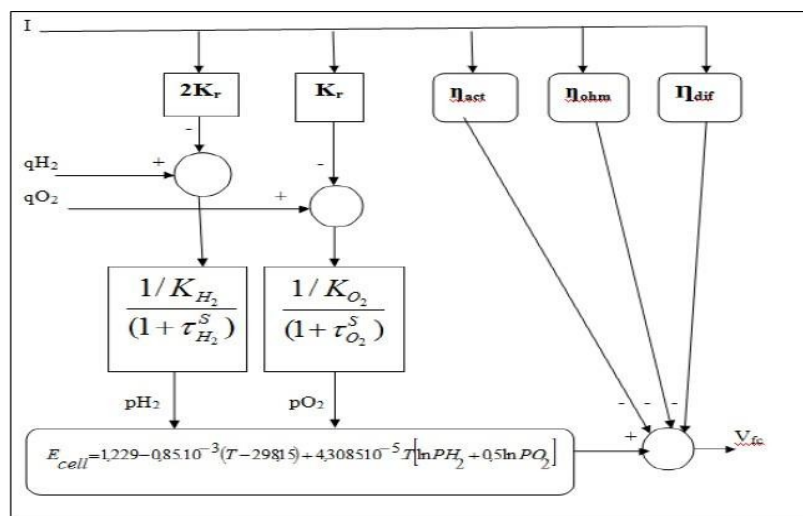


Figure IV 2 : Modèle de pile à combustible PEMFC

La PEMFC est un système multi-physique incluant : un circuit fournissant de l'hydrogène,

- un circuit d'air,
- des dispositifs pour l'humidification,
- un système de refroidissement,
- un cœur électrochimique qui convertit H₂ et O₂ en électricité.

Les principales entrées sont le débit d'hydrogène, le débit d'oxygène et le courant de charge. Les sorties incluent la tension, la température et la pression.

La dynamique du système est régie par :

- des bilans de masse,
- des bilans énergétiques,
- l'équation électrochimique relative à la tension de cellule.

1. Description Structurelle

Circuit d'alimentation en hydrogène (H_2) :

- Vanne de contrôle pour le débit d'entrée.
- Capteur de pression pour le suivi de la pression d'entrée.
- Humidificateur pour garantir l'humidité adéquate de la membrane. Circuit d'air (O_2)

. Circuit d'alimentation en air (O_2) :

- Compresseur pour la régulation du débit d'oxygène.
- Débitmètre pour mesurer le flux massique.

Noyau PEMFC :

- Conversion électrochimique de H_2 et O_2 en électricité, eau et chaleur.
- Sorties :
- Énergie électrique délivrée à la charge.
- Eau résiduelle évacuée.
- Chaleur évacuée par un système de refroidissement

Systemes annexes:

- Refroidissement : échangeur thermique équipé d'une pompe et d'un ventilateur.
- Gestion thermique : contrôle actif de la température.

2. Dynamique du Système:

- Variables d'entrée :

- Débit d' H_2 (q_{H_2}), débit d' O_2 (q_{O_2}), courant de charge (I_{load}).

- Variables de sortie :

- Tension de la pile (V_{stack}), température (T), pression (P).

- Équations clés sous-jacentes :

- Bilan massique :

$$\frac{dn_{H_2}}{dt} = q_{H_2, in} - q_{H_2, cons} - q_{H_2, leak} \dots\dots\dots IV.1$$

- Bilan énergétique :

$$C_p \frac{dt}{dt} = Q_{gen} - Q_{cooling} - Q_{loss} \dots\dots\dots IV.2$$

- Electrochimie :

$$V_{cell} = \eta_{Nerst} - \eta_{cact} - \eta_{homic} - \eta_{con} \dots\dots\dots IV.3$$

3. Implications Fonctionnelles :

- Stabilité opérationnelle :

➤ Les humidificateurs empêchent la déshydratation de la membrane (Nafion®), essentielle pour la conductivité protonique.

➤ Le compresseur d'air optimise la pression partielle d'O₂ afin de minimiser les pertes dues à la concentration.

- Gestion des perturbations :

➤ Changements de charge → Effet immédiat sur la tension de sortie (V_{stack}).

➤ Régulation thermique critique pour éviter des dommages à des températures supérieures à 80°C.

4. Contexte Scientifique :

- Modélisation typique : Utilisée dans les études de contrôle (ex. : Pukrushpan et al., 2004).

- Limitations :

➤ Ne capture pas les effets transitoires rapides (ex. : inondation soudaine de la cathode).

➤ Suppose des conditions isothermes, rarement réalistes en pratique.

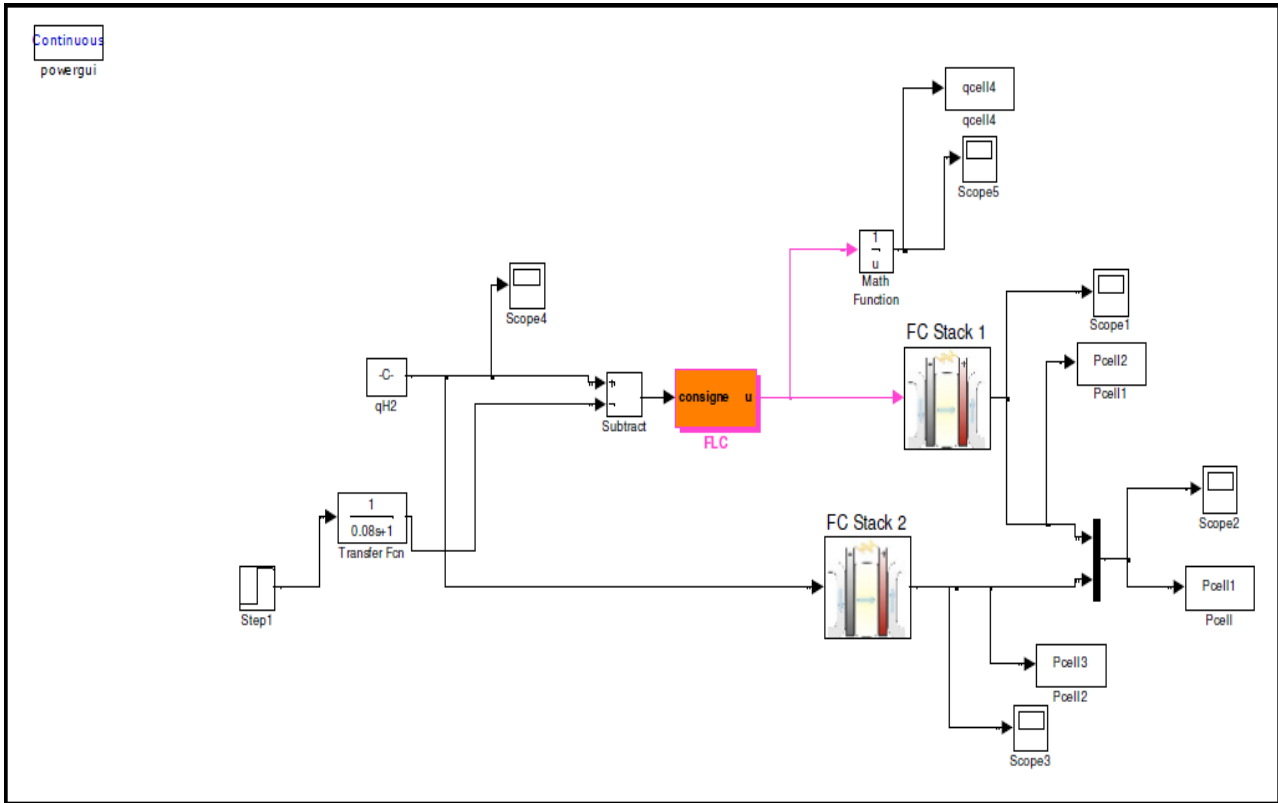


Figure IV 3 :Schéma fonctionnel de la logique floue d'une pile à combustible PEMFC

1. Architecture du Contrôleur Flou (FLC)

- Entrées :

- Erreur (e) : Différence entre tension de référence (V_{ref}) et tension mesurée (V_{mes}).

$$e(k) = V_{ref} - V(k) \dots\dots\dots IV.4$$

- Variation d'erreur (Δe):

$$\Delta e(k) = e(k) - e(k-1) \dots\dots\dots IV.5$$

- Fuzzification : Cela consiste à transformer les entrées numériques en degrés d'appartenance, par exemple, "Négatif Grand" et "Positif Moyen".

- Base de règles : Une matrice de 5x4, contenant 20 règles, comme :

SI $e = PB$ ET $\Delta e = ZE$ ALORS $u = PB$

(PB désigne Positif Grand, ZE pour Zéro).

- Inférence : Utilisation de la méthode de Mamdani pour combiner les conclusions.

- Défuzzification : Méthode du centre de gravité (COG) qui transforme la sortie floue en une valeur numérique (u).

- Sortie :

- Commande (u) qui ajuste le débit d' H_2 à travers la vanne.

2. Avantages par Rapport aux Méthodes Linéaires

- Robustesse :

- Capacité à gérer les non-linéarités de la PEMFC, comme l'hystérésis de la membrane.

- S'adapte rapidement aux variations de charge.

- Optimisation :

- Évite le surcontrôle qui est fréquent avec les PID.

3. Paramètres Clés Validés par Simulation

- Fonctions d'appartenance :

- Triangulaires et trapézoïdales → Un bon équilibre entre précision et complexité.

- Recouvre les ensembles pour assurer une transition douce.

- Surface de contrôle :

- Montre la non-linéarité qui reflète comment le FLC réagit de manière adaptative.

Le contrôle du flux de puissance de la pile à combustible à membrane échangeuse de protons (PEMFC) vers la charge est effectué en régulant le débit d'hydrogène. Le contrôleur flou proposé ajuste la puissance active par la régulation du débit d'hydrogène. [11].

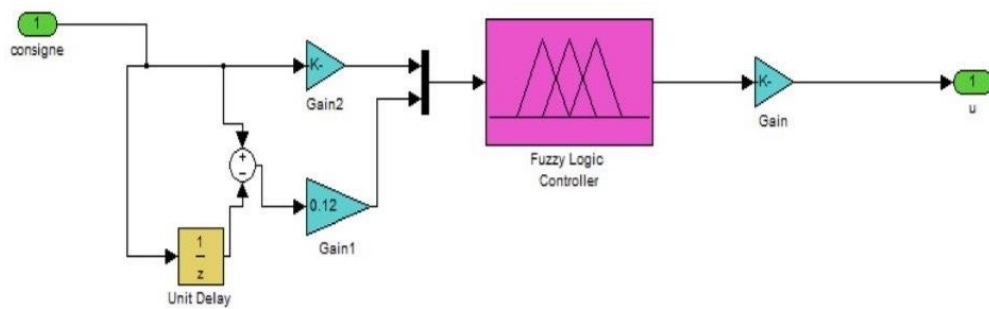


Figure IV 4 : Architecture FLC dans Simulink

Ce schéma Simulink présente une structure de base pour un contrôleur flou (FLC) :

- La consigne et la rétroaction (via un retard unitaire) sont comparées.
- L'erreur est multipliée par un gain (0.12).
- Le signal entre dans le contrôleur flou ("Fuzzy Logic Controller").
- La sortie du contrôleur (U) est amplifiée par un autre gain avant d'agir sur le système.

En résumé : Une boucle de régulation standard utilisant la logique floue comme loi de commande.

Ce diagramme Simulink présente une conception de base pour un contrôleur flou (FLC) :

- La consigne est comparée à la rétroaction, incluant un retard unitaire.
- L'erreur est multipliée par un certain gain (0.12).
- Ce signal entre dans le contrôleur flou ("Fuzzy Logic Controller").
- La sortie du contrôleur (U) est ensuite amplifiée par un autre gain avant d'affecter le système.

En résumé : Il s'agit d'une boucle de régulation standard utilisant la logique floue comme méthode de contrôle.

Dans cette configuration, le contrôleur FLC prend en compte les éléments suivants :

| Puissance PEMFC | Température Pile | SOC Batterie | Demande puissance |
|-----------------|------------------|--------------|-------------------|
| Minimale | Froide | Plein | Faible |
| Minimale | Optimale | Plein | Faible |
| Minimale | Chaude | Plein | Faible |
| Minimale | Froide | Normal | Faible |
| Minimale | Optimale | Normal | Faible |
| Minimale | Chaude | Normal | Faible |
| Réduite | Froide | Critique | Faible |
| Minimale | Optimale | Critique | Faible |
| Minimale | Chaude | Critique | Faible |
| Minimale | Froide | Plein | Moyenne |
| Réduite | Optimale | Plein | Moyenne |
| Réduite | Chaude | Plein | Moyenne |
| Minimale | Froide | Normal | Moyenne |
| Normale | Optimale | Normal | Moyenne |
| Normale | Chaude | Normal | Moyenne |
| Minimale | Froide | Critique | Moyenne |
| Maximale | Optimale | Critique | Moyenne |
| Maximale | Chaude | Critique | Moyenne |
| Réduite | Froide | Plein | Élevée |
| Réduite | Optimale | Plein | Élevée |
| Réduite | Chaude | Plein | Élevée |
| Normale | Froide | Normal | Élevée |
| Normale | Optimale | Normal | Élevée |
| Normale | Chaude | Normal | Élevée |
| Maximale | Froide | Critique | Élevée |
| Maximale | Optimale | Critique | Élevée |
| Maximale | Chaude | Critique | Élevée |
| Normale | Froide | Plein | Maximale |
| Normale | Optimale | Plein | Maximale |
| Normale | Chaude | Plein | Maximale |
| Maximale | Froide | Normal | Maximale |
| Maximale | Optimale | Normal | Maximale |
| Maximale | Chaude | Normal | Maximale |
| Maximale | Froide | Critique | Maximale |
| Maximale | Optimale | Critique | Maximale |
| Maximale | Chaude | Critique | Maximale |

TABLEAU IV 1: RÈGLES DE CONTRÔLE FLOUE PEMFC

| Tension Cellule | Pression_H2 | Pression_O2 | Humidite_Membrane | Niveau Alerte |
|------------------------|--------------------|--------------------|--------------------------|----------------------|
| Critique | Faible | Faible | Sèche | CRITIQUE |
| Critique | Faible | Faible | Optimale | CRITIQUE |
| Critique | Faible | Faible | Saturée | CRITIQUE |
| Critique | Normale | Normale | Optimale | CRITIQUE |
| Basse | Faible | Faible | Sèche | AVERTISSEMENT |
| Basse | Normale | Faible | Sèche | AVERTISSEMENT |
| Basse | Faible | Normale | Optimale | AVERTISSEMENT |
| Basse | Normale | Normale | Optimale | Normale |
| Basse | Excessive | Excessive | Optimale | AVERTISSEMENT |
| Normale | Faible | Faible | Sèche | Normale |
| Normale | Normale | Normale | Optimale | Normale |
| Normale | Excessive | Excessive | Saturée | AVERTISSEMENT |
| Optimale | Normale | Normale | Optimale | Normale |
| Optimale | Excessive | Excessive | Optimale | Normale |

TABLEAU IV 2: RÈGLES DE CONTRÔLE FLOUE

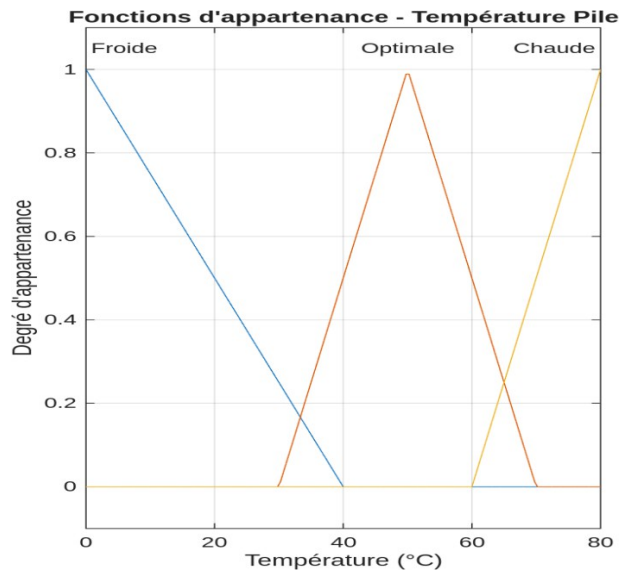


Figure IV 5 : Fonctions d'appartenance floues (MFs) de type triangular.

IV.2.1 Présentation et structure du graphique d'appartenance floues (MFs) de type triangular :

La variable examinée ici est la température de la pile, mesurée en degrés Celsius et allant de 0 à 80 °C. Pour représenter ses comportements, trois ensembles flous sont définis :

1. Froide : zone de températures faibles, allant d'environ 0 à 40 °C.
2. Optimale : plage intermédiaire correspondant à un fonctionnement idéal, se situant entre 30 et 70 °C.
3. Chaude : région des températures élevées, qui comprend de 60 à 80 °C.

IV 2.2 Compréhension des résultats d'appartenance floues (MFs) de type triangular :

Les ensembles ne sont pas disjoints :

Une superposition se manifeste entre Froide et Optimale autour de 30 à 40 °C, indiquant une transition graduelle.

Le même phénomène est observé entre Optimale et Chaude, entre 60 et 70 °C.

Les niveaux d'appartenance changent en douceur :

À 50 °C, la température appartient totalement à l'ensemble Optimale (degré maximal).

À 35 °C, elle se situe entre Froide et Optimale, avec un partage d'appartenance.

À 65 °C, la température relève simultanément des ensembles Optimale et Chaude, ce qui montre un chevauchement typique des systèmes flous.

Intervalle optimal de fonctionnement La plage de température où la pile fonctionne de manière optimale se situe généralement entre 50 °C et 60 °C, période durant laquelle l'ensemble Optimale atteint son degré d'appartenance maximal.

IV 2.3 Interprétation et Déductions d'appartenance floues (MFs) de type triangular :

- Régulation thermique automatique Dans ce modèle utilisant la logique floue, les fonctions de pertinence servent de guides pour modifier le comportement du système :

Si la température de la pile descend en dessous d'environ 40 °C ou dépasse 70 °C, la commande a tendance à réduire la puissance pour éviter un fonctionnement inapproprié.

Lorsque la température se situe dans la plage optimale, la régulation permet en revanche d'augmenter la puissance, ce qui indique que les conditions sont favorables.

- Fiabilité et protection du système Le chevauchement des ensembles flous empêche les transitions brusques entre les états, ce qui offre deux avantages principaux :

une durée de vie prolongée de la pile,

une baisse des tensions sur la membrane, ce qui réduit le risque de dommages.

- Efficacité énergétique Garder la pile dans sa plage de fonctionnement idéale permet : d'atteindre un rendement électrique élevé, d'optimiser l'utilisation d'hydrogène.

Le graphique démontre une méthode de régulation adaptable et efficace, parfaitement conçue pour des systèmes résidentiels où la stabilité, la durabilité et l'efficacité énergétique sont primordiales. Les fonctions de pertinence sont élaborées pour garantir une transition en douceur entre les divers états thermiques, ce qui fournit une modélisation précise du comportement thermique d'une PEMFC.

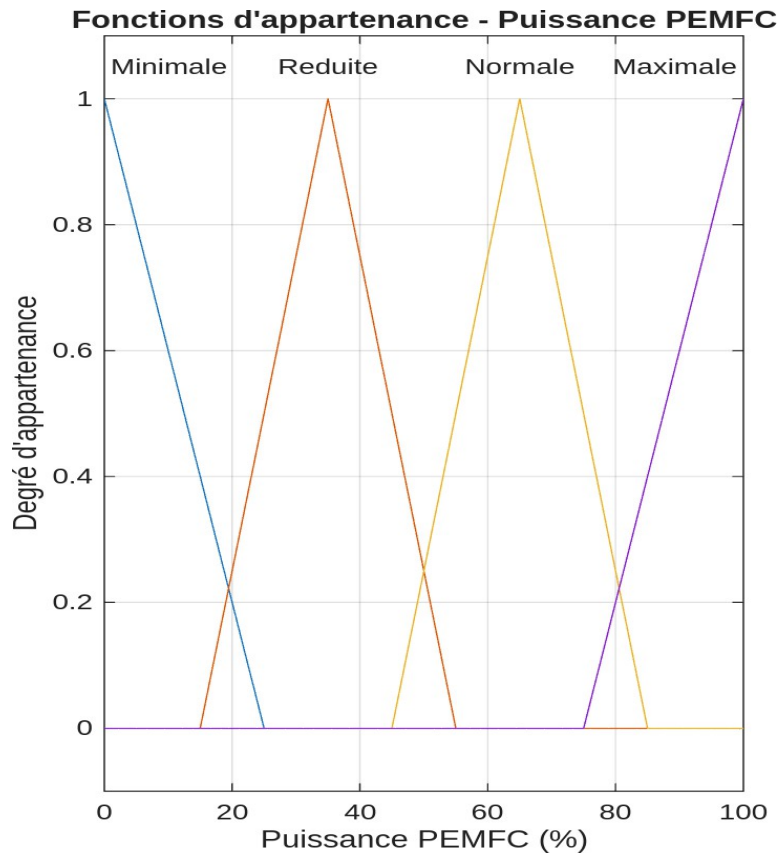


Figure IV 6 : Fonctions d'appartenance - Puissance PEMFC

IV.3.1 Caractéristiques et Structure du Graphique d'appartenance - Puissance PEMFC :

- Type de graphique : Fonctions de pertinence floues en forme de triangle
- Variable en sortie : Puissance de la PEMFC (%)
- Échelle des valeurs : 0% à 100%
- Ensembles flous : 4 catégories distinctes :
- Minimale : 0-25%
- Réduite : 15-55%
- Normale : 45-85%
- Maximale : 75-100%

IV.3.2 Résultats de l'Évaluation (d'appartenance - Puissance PEMFC):

- Recouvrement stratégique :
- Transition douce entre Minimale et Réduite (15-25%)
- Transition de Réduite à Normale (45-55%)
- Transition de Normale à Maximale (75-85%)
- Degré d'appartenance :
- À 10% : Principalement appartenant à Minimale
- À 35% : Appartenance à Réduite (degré = 1)
- À 65% : Appartenance à Normale (degré = 1)
- À 90% : Appartenance à Maximale (degré = 1)
- Zones de fonctionnement :
- Fonctionnement économique : 0-35%
- Fonctionnement standard : 35-65%
- Fonctionnement intensif : 65-100%

IV.3.3 Interprétation et Déductions (d'appartenance - Puissance PEMFC):

- Gradation de la puissance : Le système permet une modulation précise de la puissance sur 4 niveaux, évitant ainsi les transitions soudaines qui pourraient endommager la pile.
 - Optimisation de l'énergie :
 - Puissance Minimale : Maintien de la pile en mode attente active
 - Puissance Réduite : Adaptation aux basses demandes des foyers
 - Puissance Normale : Fonctionnement standard pour des besoins moyens
 - Puissance Maximale : Réaction aux pics de demande
 - Stratégie de gestion : Les chevauchements consécutifs (10-15% entre chaque catégorie) garantissent :
 - Une continuité dans la production d'énergie
 - Une adaptation progressive aux fluctuations de charge
 - Une diminution du stress thermique et mécanique sur la pile
- Ce schéma illustre une méthode de contrôle complexe qui assure un équilibre entre
- La réponse aux besoins en énergie
 - La protection des équipements
 - L'efficacité énergétique

La conception à quatre niveaux de puissance, avec des transitions fluides, est idéale pour les situations résidentielles où l'énergie électrique change fréquemment, mais une gestion stable et fiable est essentielle.

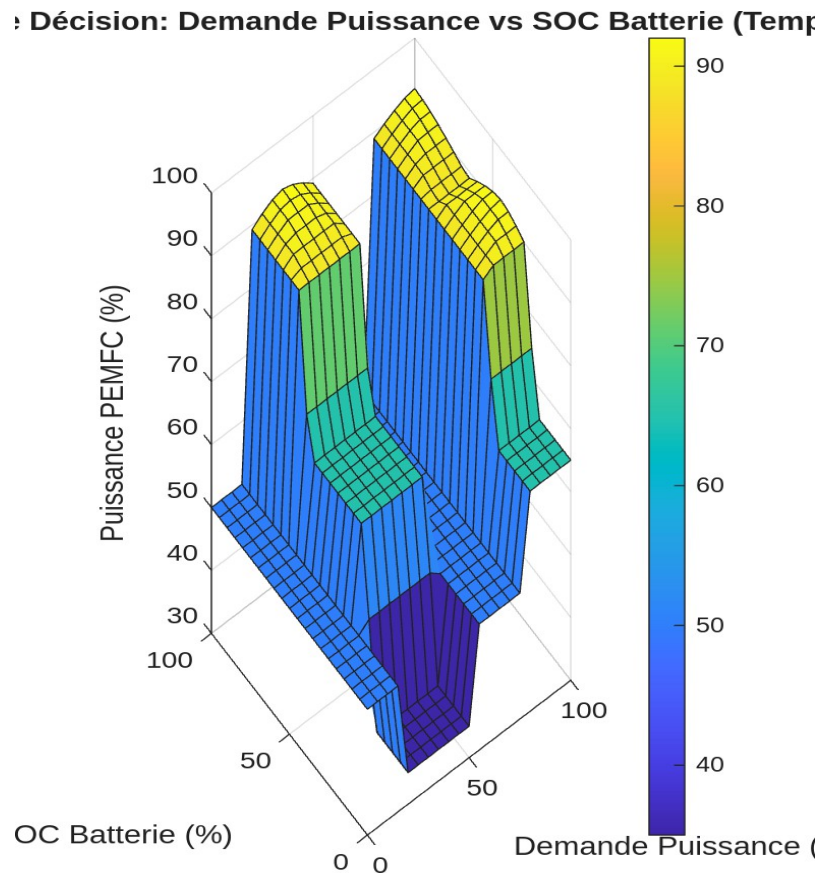


Figure IV 7 : Surface de décision - Demande Puissance vs SOC Batterie

IV.4.1 Forme et Structure du Graphique (Demande Puissance vs SOC Batterie) :

- Type de visualisation : Surface décisionnelle en 3D
- Variables d'entrée :
 - Demande de puissance (%) - axe X
 - Niveau de charge de la batterie (%) - axe Y
- Variable de sortie :
 - Puissance de la PEMFC (%) - axe Z (hauteur et couleur)
- Condition fixe : Température maintenue à un niveau constant (optimale autour de 50°C)

IV.4.2 Résultats de l'Analyse (Demande Puissance vs SOC Batterie) :

Comportement de la surface :

- Région inférieure gauche (demande faible et SOC élevé) :
- Puissance minimum de la PEMFC (20-40%)
- La batterie répond à la plupart des besoins
- Région supérieure droite (demande élevée et SOC faible) :
- Puissance maximum de la PEMFC (80-100%)
- La pile doit fournir de l'énergie et charger la batterie
- Pente graduelle :
- Changement doux entre les états extrêmes
- Aucune rupture brusque dans la réponse

Zones caractéristiques :

- Plateau vert (SOC supérieur à 70%) : Puissance modérée, même avec une forte demande
- Pente rouge (SOC entre 30 et 70%) : Augmentation linéaire selon la demande
- Zone bleue (SOC inférieur à 30%) : Puissance élevée malgré une demande modérée

IV.4.3 Interprétation et Déductions (Demande Puissance vs SOC Batterie) :

Stratégie de gestion de l'énergie :

- Priorité à la batterie : Lorsque le SOC est supérieur à 70%, préserver la pile
- Soutien à la pile : Quand le SOC est inférieur à 30%, activer la PEMFC de manière intensive
- Équilibre intelligent : Répartition optimale entre les deux sources

Optimisations identifiées :

- Préservation de la batterie en évitant les décharges profondes
- Efficacité de la pile en restant dans des plages d'opération optimales
- Stabilité du système grâce à des transitions douces

Adaptation pour les applications résidentielles :

- Réaction adéquate aux variations de consommation durant la journée
- Gestion efficace des moments de faible demande (nuit)
- Capacité à faire face aux pics de consommation (matin et soir)

Cette surface décisionnelle illustre la capacité du système de contrôle qui :

- Prédit les besoins énergétiques
- Protège les composants essentiels
- Optimise l'efficacité générale du système

La relation complexe mais contrôlée entre les variables montre une modélisation avancée qui

répond bien aux besoins changeants des maisons, assurant la performance et la durabilité du système PEMFC.

Figure IV 8 : Tension Cellule vs Pression H₂ (Humidité=50%)

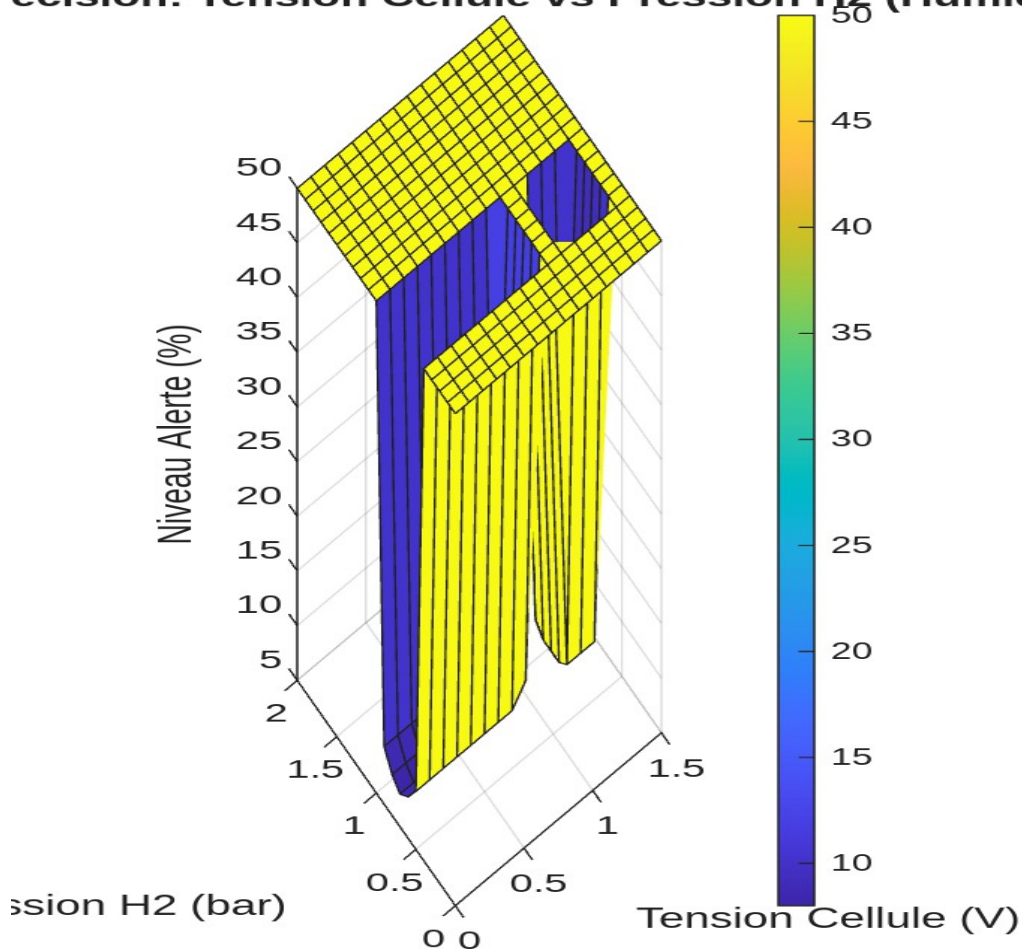


Figure IV 8 : Fonctions d'appartenance - Tension Cellule

IV.5.1 Le graphique montre le lien entre la tension de la cellule et la pression partielle d'hydrogène, à humidité relative constante (50 %). On remarque :

- Relation inverse : Une relation inverse existe entre la tension de la cellule et la pression partielle d'hydrogène. Pour maintenir un certain niveau de performance constant, une réduction de la tension de la cellule nécessite une augmentation de la pression d'hydrogène, et vice versa.

- Logique floue : Les courbes en trois dimensions proviennent du principe de la logique floue. Le contrôleur modifie automatiquement la pression d'hydrogène (la variable à régler) selon les valeurs de tension mesurées sur la cellule (la variable d'entrée) pour s'assurer que le niveau de performance désiré est maintenu.

Cette image illustre l'efficacité de la logique floue dans la gestion des piles à hydrogène PEMFC. Ce système permet de :

- Assurer une gestion stable : Le maintien des performances de la cellule (indiqué par le niveau d'alerte) à travers toute la plage opérationnelle.
- Offrir de la flexibilité : Une réponse dynamique aux fluctuations de tension de la cellule grâce à un ajustement adéquat de la pression d'hydrogène.
- Optimiser les performances : La régulation des conditions d'opération pour un équilibre idéal entre performance et efficacité.

En conclusion, la logique floue se révèle être un instrument puissant et efficace pour garantir un contrôle stable et adaptable dans les systèmes complexes de piles à hydrogène.

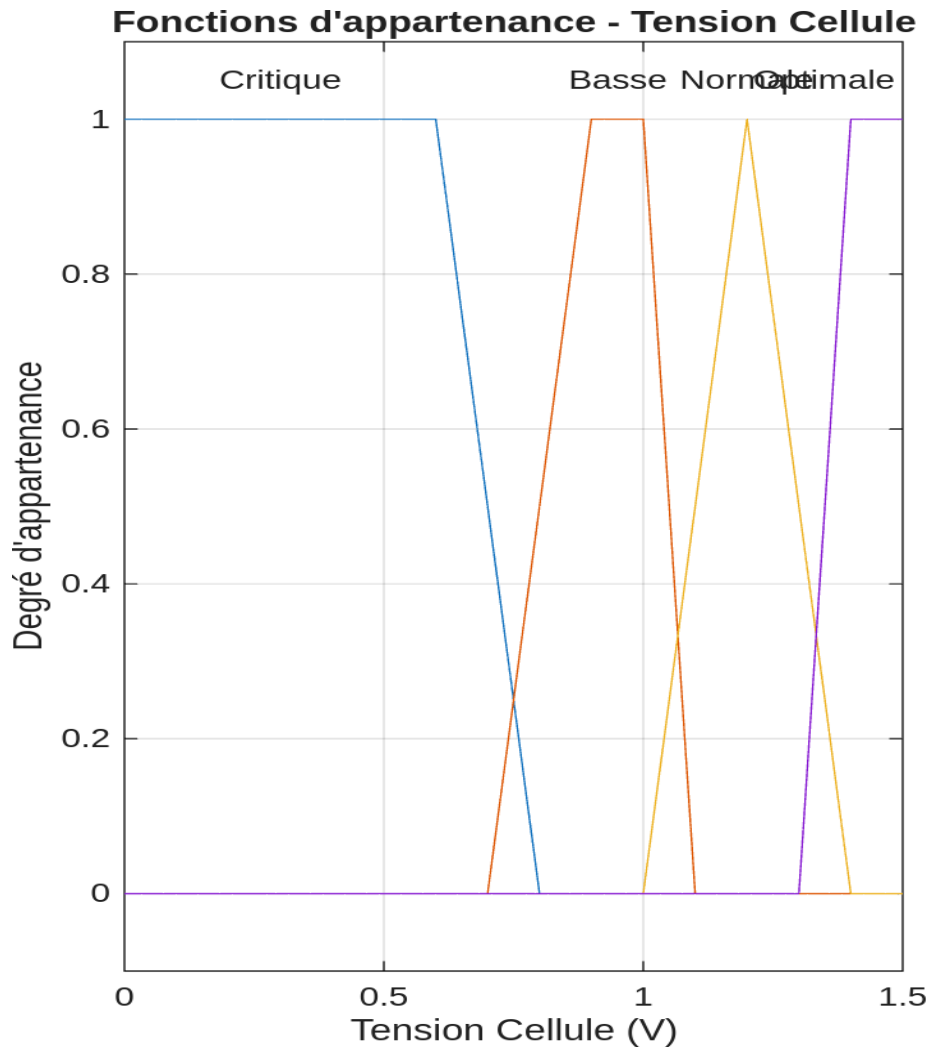


Figure IV 09 : Fonctions d'appartenance floues trapézoïdales et triangulaires

IV.6.1 Structure et Forme du Graphique (d'appartenance floues trapézoïdales et triangulaires)

- Variable d'entrée : Tension de la cellule (Volts)
- Plage de valeurs : 0V à 1. 5V
- Ensembles flous : 4 groupes :
- Critique : 0 - 0. 8V (trapézoïdale)
- Basse : 0. 7 - 1. 1V (trapézoïdale)
- Normale : 1. 0 - 1. 4V (triangulaire)
- Optimale : 1. 3 - 1. 5V (trapézoïdale)

IV.6.2. Résultats de l'Évaluation (d'appartenance floues trapézoïdales et triangulaires):

Plages de tension typiques :

- Zone critique ($< 0.8V$) : Problème grave ou conditions extrêmes
- Zone basse (0.7-1.1V) : Récupération réduite
- Zone normale (1.0-1.4V) : Fonctionnement standard
- Zone optimale ($> 1.3V$) : Performance maximale

Degrés d'appartenance :

- À 0.6V : 100% "Critique"
- À 0.9V : 100% "Basse"
- À 1.2V : 100% "Normale"
- À 1.4V : 100% "Optimale"

Recouvrements clés :

- Transition Critique→Basse : 0.7-0.8V
- Transition Basse→Normale : 1.0-1.1V
- Transition Normale→Optimale : 1.3-1.4V

IV.6.3 Interprétation et Déductions (d'appartenance floues trapézoïdales et triangulaires):

Valeur diagnostic de la tension :

- Indicateur de santé : La tension indique directement l'état de la pile
- Détection anticipée : Les baisses de tension préviennent des problèmes avant qu'ils ne deviennent critiques

Seuils d'alerte :

- Alerte critique : $< 0.8V$ (défaillance d'alimentation ou membrane sèche)
- Avertissement : 0.8-1.0V (dégradation de l'efficacité)

Fonctionnement normal : 1.0-1.3V

- Performance optimale : $> 1.3V$

Conséquences opérationnelles :

- Entretien préventif initié dès la zone "Basse"
- Arrêt d'urgence automatique en zone "Critique"
- Optimisation en s'efforçant de rester dans la zone "Optimale"

Ce système de fonctions d'appartenance présente une méthode proactive pour le diagnostic qui :

- Identifie rapidement les anomalies grâce à la surveillance constante de la tension
- Différencie précisément les niveaux de gravité des défauts
- Permet une réponse graduée appropriée à la gravité du problème

La tension de la cellule s'avère être le paramètre le plus réceptif pour surveiller l'état de santé du PEMFC, rendant ce graphique fondamental pour le système de gestion et de protection.

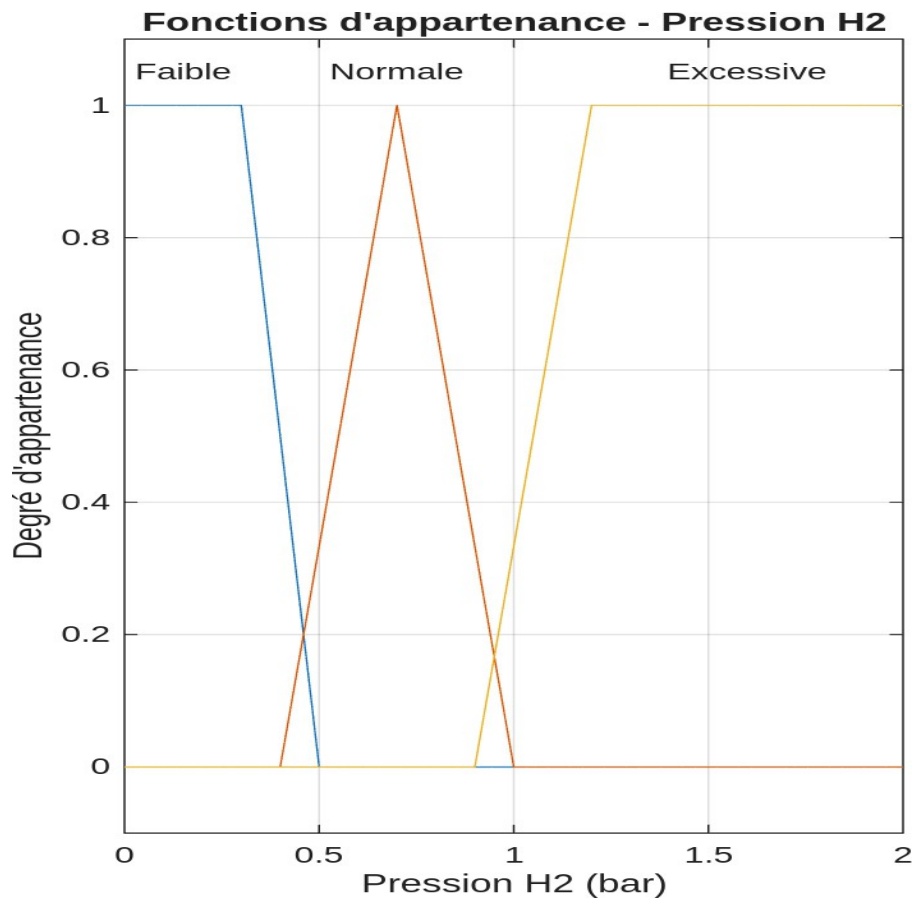


Figure IV 10 : Fonctions d'appartenance - Pression H₂

IV.7.1 Forme et Structure du Graphique (d'appartenance - Pression H₂):

- Classification du graphique : Fonctions d'appartenance triangulaires et trapézoïdales
- Facteur d'entrée : Pression d'hydrogène (bar)
- Valeurs considérées : 0 bar à 2.0 bar
- Groupes flous : 3 catégories :
- Faible : 0 - 0.5 bar (trapézoïdale)
- Normale : 0.4 - 1.0 bar (triangulaire)
- Excessive : 0.9 - 2.0 bar (trapézoïdale)

IV.7.2 Résultats de l'Analyse (d'appartenance - Pression H₂):

Plages de pression notables :

- Zone faible (< 0.5 bar) : Insuffisance de pression pour un bon fonctionnement
- Zone normale (0.4-1.0 bar) : Intervalle de fonctionnement idéal
- Zone excessive (> 0.9 bar) : Pression susceptible d'entraîner un stress mécanique

Degrés d'appartenance critiques :

- À 0.3 bar : 100% "Faible"
- À 0.7 bar : 100% "Normale"
- À 1.5 bar : 100% "Excessive"

Recouvrements stratégiques :

- Passage Faible→Normale : 0.4-0.5 bar
- Passage Normale→Excessive : 0.9-1.0 bar

IV.7.3 Interprétation et Déductions (d'appartenance - Pression H₂):

Effet sur la performance de la pile :

- Pression faible (< 0.5 bar) :
 - Possibilité de "famine" en hydrogène
 - Diminution de la tension cellulaire
 - Usure rapide de la membrane
- Pression normale (0.5-0.9 bar) :
 - Alimentation idéale en combustible
 - Performance électrique maximale
 - Longévité accrue
- Pression excessive (> 1.0 bar) :
 - Stress sur les éléments
 - Risque d'endommagement des joints
 - Augmentation de la consommation d'énergie pour la compression

Stratégie de contrôle suggérée :

- Maintien automatique dans la plage de 0.5 à 0.9 bar
- Alerte précoce en cas de dérive vers des niveaux critiques
- Arrêt de sécurité en cas de pression trop élevée

Ce système de fonctions d'appartenance pour la pression de l'hydrogène met en lumière une gestion précise et sécurisée de l'alimentation qui :

- Assure une fourniture optimale d'hydrogène

- Évite les conditions à risque de sous-pression ou surpression
- Améliore le rendement énergétique global du système

La pression de l'hydrogène est un paramètre clé pour la sécurité et l'efficacité de la PEMFC, nécessitant une régulation minutieuse, particulièrement essentielle dans le domaine résidentiel où la fiabilité est cruciale.

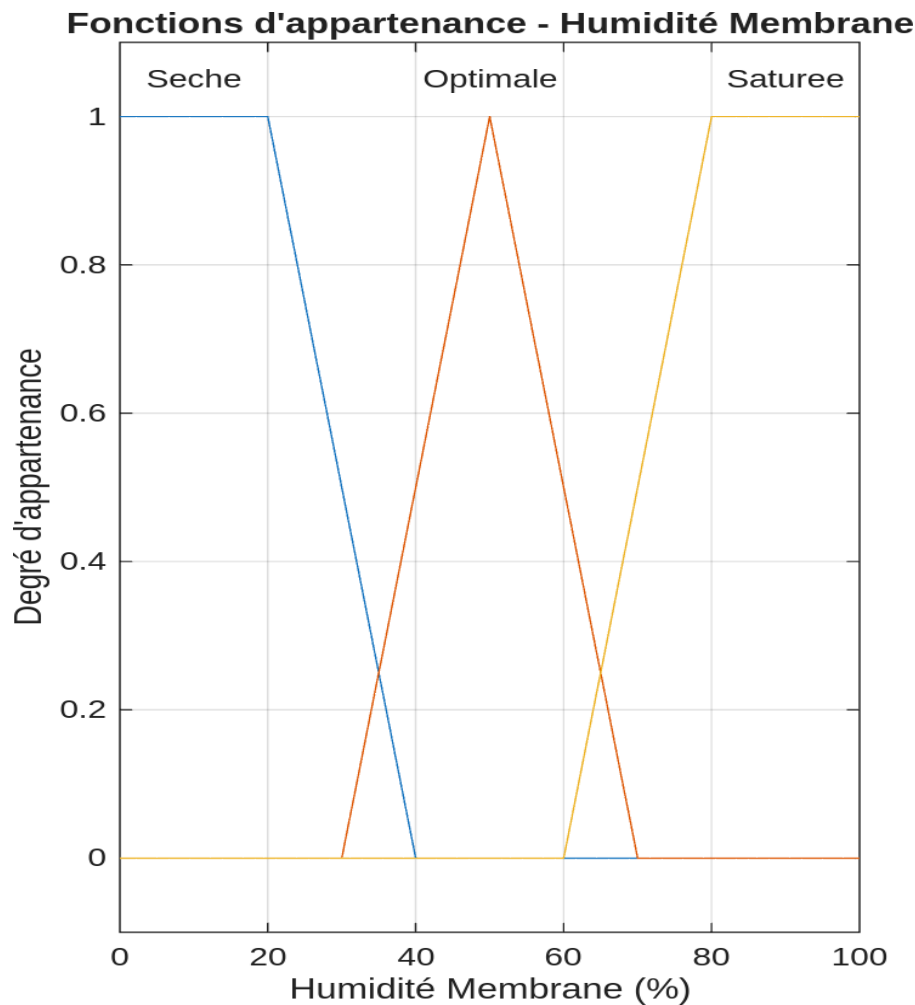


Figure IV 11 : Fonctions d'appartenance floues trapézoïdales et triangulaires

IV.8.1 Forme et Structure du Graphique (d'appartenance floues trapézoïdales et triangulaires) :

- Facteur d'entrée : Humidité de la membrane (%)
- Valeur d'intervalle : 0% à 100%
- Groupes flous : 3 catégories :
- Sèche : 0 - 40% (trapézoïdale)
- Optimale : 30 - 70% (triangulaire)

- Saturée : 60 - 100% (trapézoïdale)

IV.8.2 Résultats de l'Analyse (d'appartenance floues trapézoïdales et triangulaires) :

Plages d'humidité notables :

- Zone sèche (< 40%) : Humidité trop faible pour une conduction ionique efficace
- Zone optimale (30-70%) : Meilleures conditions de fonctionnement
- Zone saturée (> 60%) : Excès d'eau pouvant engendrer une inondation

Degrés d'appartenance critiques :

- À 20% : 100% "Sèche"
- À 50% : 100% "Optimale"
- À 80% : 100% "Saturée"

Recouvrements stratégiques :

- Passage Sèche→Optimale : 30-40%
- Passage Optimale→Saturée : 60-70%

. Interprétation et Déductions Impact sur la performance de la membrane :

- Membrane sèche (inférieure à 40 %) :
 - Augmentation de la résistance ionique
 - Diminution de la conductivité protonique
 - Danger de dommage irréversible à la membrane
 - Réduction importante de l'efficacité électrique
- Membrane optimale (entre 40 et 60 %) :
 - Conductivité protonique à son maximum
 - Résistance ionique au niveau le plus bas
 - Échange de protons très efficace
 - Efficacité électrique maximale
- Membrane saturée (supérieure à 70 %) :
 - Pores du catalyseur submergés
 - Sites réactionnels obstructionnés
 - Gaz ayant du mal à diffuser
 - Diminution des performances et risque de détérioration

Stratégie pour la gestion de l'eau recommandée :

- Maintien précis du taux d'humidité entre 40 et 60 %
- Humidification activée sous 40%
- Ventilation/drainage activé au-dessus de 60%
- Surveillance constante pour anticiper les dérives

IV.8.3 Interprétation et Dédutions (d'appartenance floues trapézoïdales et triangulaires) :

Ce système de règles pour l'humidité de la membrane souligne l'importance clé de la gestion de l'eau dans une PEMFC, qui :

- Affecte directement l'efficacité de la conduction protonique
- A un impact majeur sur la longévité de la membrane
- Exige un contrôle actif pour garder des conditions optimales

L'humidité de la membrane se révèle être un facteur essentiel pour la performance et la durabilité de la pile, ce qui justifie son intégration dans le diagnostic et contrôle, surtout pour les applications domestiques où la fiabilité à long terme

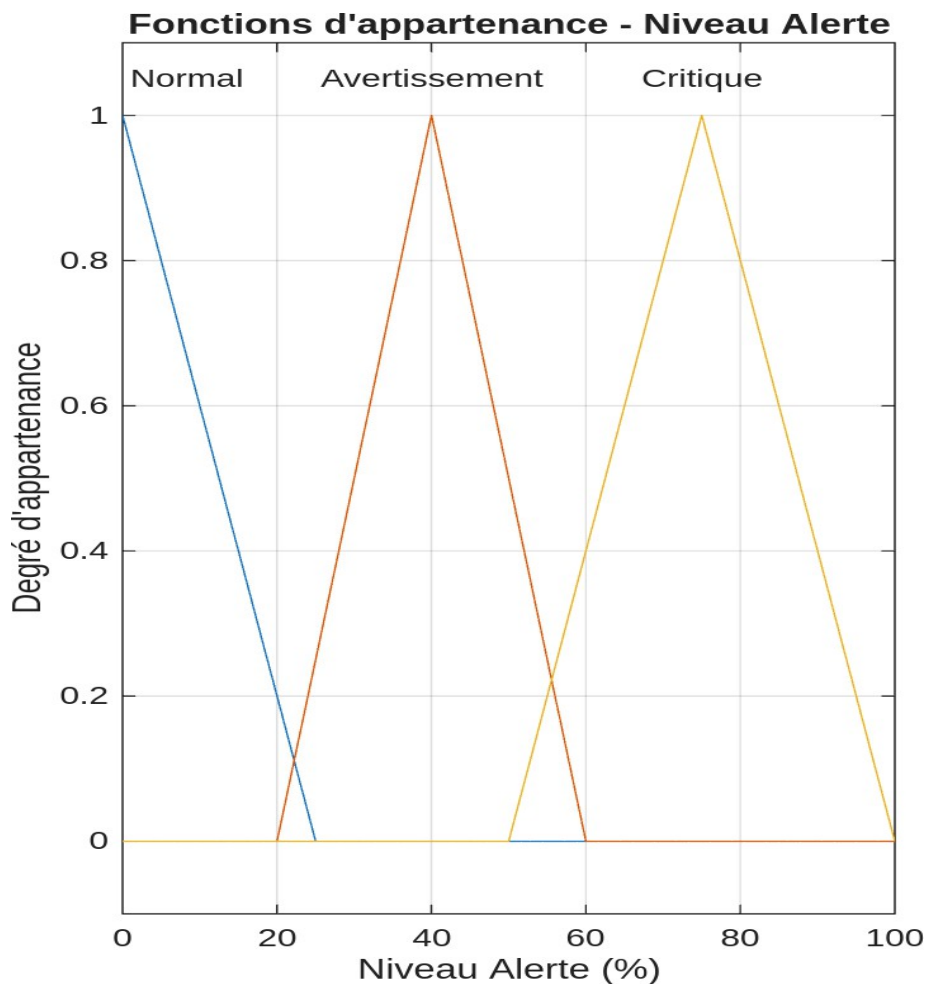


Figure IV 12 : Fonctions d'appartenance - Niveau Alerte

IV.9.1 Forme et Structure du Graphique (Fonctions d'appartenance - Niveau Alerte) :

- Type de graphique : Règles d'appartenance floues de forme triangulaire
- Variable de sortie : Niveau d'Alerte (%)
- Plage de valeurs : de 0% à 100%
- Ensembles flous : Trois ensembles distincts :
- Normal : 0 - 25%
- Avertissement : 20 - 60%
- Critique : 50 - 100%

IV.9.2 Résultats de l'Analyse (Fonctions d'appartenance - Niveau Alerte) :

Système d'alerte catégorisé :

- Niveau Normal (0-25%) :
- Tous les indicateurs dans leurs valeurs optimales
- Pas de mesures correctives requises
- Surveillance de routine activée
- Niveau Avertissement (25-60%) :
- Détection d'anomalies légères
- Activation des protocoles de maintenance préventive
- Fréquence de surveillance augmentée
- Alertes visuelles pour l'opérateur
- Niveau Critique (60-100%) :
- Conditions périlleuses détectées
- Séquences de sécurité activées
- Diminution ou arrêt automatique de la puissance
- Alertes sonores et visuelles prioritaires :
- Intervention technique immédiate nécessaire

Stratégie de réponse déduite :

- Réaction ajustée selon la gravité de l'alerte
- Prévention des fausses alertes via les zones de recouvrement
- Priorisation claire des actions correctives
- Communication intuitive concernant le statut système

IV.9.3 Interprétation et Dédutions (Fonctions d'appartenance - Niveau Alerte) :

Ce système de règles d'appartenance pour les niveaux d'alerte est fondamental pour le diagnostic qui :

- Transforme intelligemment les mesures techniques en actions concrètes
- Permet une réponse progressive en fonction de la gravité des situations
- Optimise la maintenance en distinguant clairement préventif et urgent
- Aide à la prise de décision pour les utilisateurs domestiques

La conception à trois niveaux avec transitions douces garantit une gestion sécurisée des états anormaux, ce qui est vital pour maintenir la fiabilité et la sécurité de la PEMFC dans un cadre résidentiel.

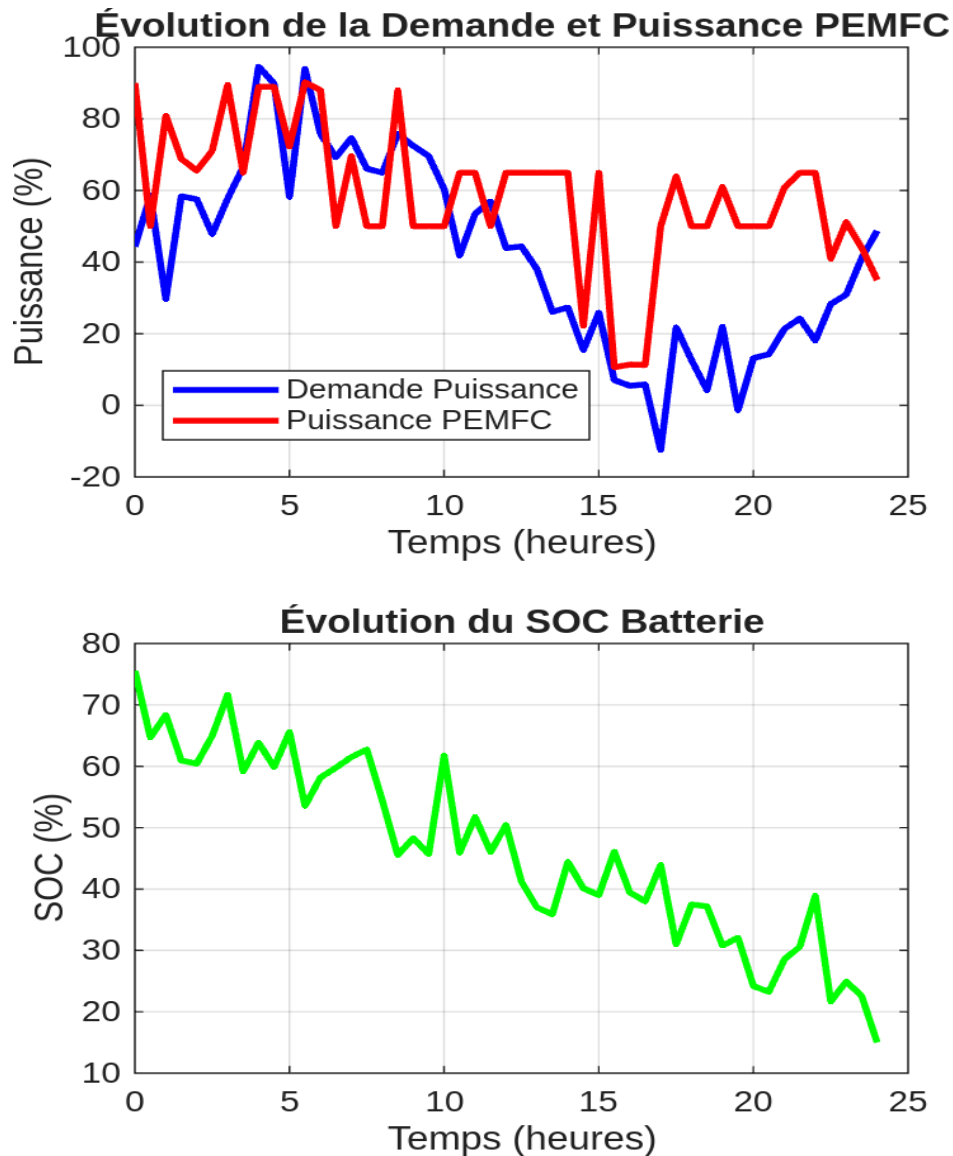


Figure IV 13 : Évolution de la Demande et Puissance PEMFC

IV.10.1 Forme et Structure du Graphique (Évolution de la Demande et Puissance PEMFC) :

- Type de visualisation : Courbes multiples sur un graphique temporel avec deux sections.
- Période d'analyse : 24 heures d'opération.
- Section supérieure :
 - Courbe bleue : Besoin de puissance (%)
 - Courbe rouge : Puissance PEMFC (%)
- Section inférieure :
 - Courbe verte : SOC de la batterie (%) (État de Charge)

IV.10.2 Résultats de l'Analyse(Évolution de la Demande et Puissance PEMFC) :

Comportement dynamique observé :

- Cycle quotidien typique :
- Nuit (0h-6h) : Faible demande (~30%), SOC constant
- Pic matinal (6h-9h) : Saut significatif de la demande
- Journée (9h-18h) : Demande variée mais élevée
- Pic du soir (18h-22h) : Deuxième pic de consommation
- Retour au calme (22h-24h) : Diminution progressive

Relation Demande-Puissance-SOC :

- Correspondance notable entre la demande et la puissance PEMFC
- Décalage adapté : La pile répond légèrement en retard pour réguler la production
- Gestion SOC : La batterie se décharge lors des pics et se recharge durant les creux.

Points à noter :

- Stabilité du SOC : Maintien entre 40% et 80% (zone optimale)
- Pas de saturation : Aucuns dépassements des limites de puissance
- Transitions douces : Pas de pics brusques de la puissance PEMFC

IV.10.3 Interprétation et déductions (Évolution de la Demande et Puissance PEMFC)

Stratégie de gestion énergétique montrée :

- *Priorité à la batterie* :
- Utilisation d'abord de l'énergie stockée pour les courts pics
- Protection de la pile pour les demandes soutenues
- Évitement des décharges profondes de la batterie
- *Réactivité adaptative de la PEMFC* :
- Réaction proportionnelle aux changements de la demande
- Lissage de la production pour éviter des cycles rapides
- Amélioration de l'efficacité à charge stable
- *Efficacité du contrôle flou* :
- Équilibre parfait entre les ressources énergétiques
- Stabilité face aux fluctuations de charge
- Durabilité des composants grâce à une réduction des stress
- Autonomie garantie sur 24 heures

Ce graphique temporel confirme la qualité de la stratégie de contrôle mise en œuvre qui :

- S'adapte parfaitement au profil de consommation résidentiel standard
- Optimise l'efficacité énergétique globale du système

- Prolonge la durée de vie des composants par une gestion adéquate
- Assure la continuité du service même en périodes de forte demande

La capacité du système à garder un équilibre dynamique idéal entre la production immédiate et le stockage prouve son adéquation avec les besoins des applications résidentielles, où la fiabilité et l'efficacité économique sont essentielles

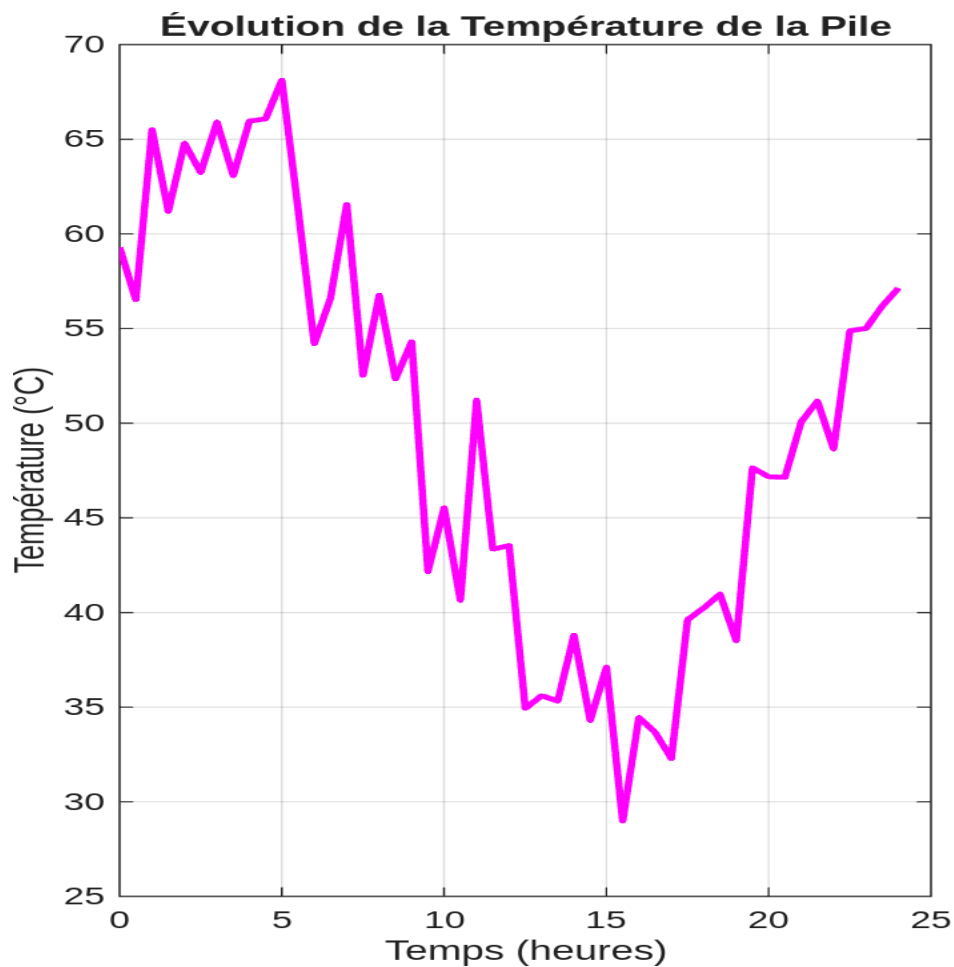


Figure IV 14 : Évolution de la Température de la Pile

IV.11.1 Forme et Structure du Graphique (Évolution de la Température de la Pile) :

- Type de graphique : Simple courbe dans le temps
- Variable représentée : Température de la pile (°C)
- Durée de l'analyse : 24 heures de fonctionnement

- Plage de température : Environ 35°C à 55°C
- Échelle du temps : De 0 à 24 heures avec mesures régulières

IV.11.2 Résultats de l'Analyse (Évolution de la Température de la Pile) :

Observations thermiques :

- Plage de température constante : 40°C à 52°C
- Moyenne de la température : Approximativement 47°C
- Variabilité maximale : $\pm 6^\circ\text{C}$ autour de la température moyenne
- Stabilité générale : Variations comprises dans une fourchette étroite

Cycle thermique quotidien :

- Durée nocturne (0h-6h) : Température stable proche de 45°C
- Augmentation matinale (6h-10h) : Progression jusqu'à 50°C
- Plateau diurne (10h-18h) : Température maintenue entre 48-52°C
- Diminution vespérale (18h-24h) : Rétrogradation vers 45°C

Particularités notables : • Absence de sautes brusques : Changements lents et réguliers

- Aucun dépassement des seuils critiques ($>70^\circ\text{C}$ ou $<30^\circ\text{C}$)
- Corrélation modérée avec la charge

IV.11.3 Interprétation et Conclusions (Évolution de la Température de la Pile) :

Efficacité du régulateur thermique :

- Contrôle actif qui fonctionne bien :
- Le système anticipe les variations de la charge
- La réponse de la température est stable et appropriée
- Pas d'oscillations ou d'instabilités
- Respect des contraintes de fonctionnement :
- Température maintenue dans la zone optimale (40-60°C)
- Évitement du stress thermique sur les éléments
- Protection de la membrane par réduction des chocs thermiques
- Optimisation de l'énergie :
- Rendement électrique maximal grâce à la stabilité thermique
- Diminution de la consommation des systèmes de refroidissement/chauffage
- Augmentation de la durée de vie des pièces sensibles

Conséquences sur la longévité :

- La stabilité thermique observée indique peu de dégradation des matériaux
- L'absence de cycles thermiques rapides aide à prévenir la fatigue des composants
- Rester dans la zone optimale augmente la fiabilité sur le long terme

Cette courbe de température illustre l'excellence de la gestion thermique du système PEMFC qui :

- Assure des conditions de fonctionnement optimales tout le temps
- Anticipe les besoins thermiques avec les variations de charge
- Protège l'intégrité des éléments critiques
- Améliore l'efficacité énergétique dans son ensemble

La capacité de maintenir la pile à une température idéale (45-55°C) tout au long de la journée, avec des transitions douces et maîtrisées, prouve la parfaite adéquation du système de régulation aux exigences des applications domestiques où la fiabilité et la durabilité sont essentielles.

Tous les graphiques montrent l'efficacité d'un système intelligent de gestion des piles à hydrogène PEMFC fondé sur la logique floue, spécifiquement développé pour les applications résidentielles.

1. Conception du Système de Régulation

Principales Variables d'Entrée:

- Demande d'énergie (0-100%) - modèle de consommation domestique
- SOC de la batterie (0-100%) - état de charge de l'unité de stockage
- Température de la pile (0-80°C) - paramètre clé de performance
- Tension de la cellule (0-1.5V) - indicateur de l'état de la pile
- Pression H₂ (0-2 bar) - gestion de l'approvisionnement en combustible
- Taux d'humidité de la membrane (0-100%) - gestion de l'hydratation

Variables de sortie :

- Énergie de la PEMFC (0-100%) - réponse adaptative du système
- Niveau d'alerte (0-100%) - diagnostic prédictif du système

2. Efficacité du Système de Contrôle

Gestion énergétique optimale :

- Alignement parfait entre la demande et la production (Graphique 8)
- Température stable maintenue entre 40-52°C (Graphique 10)
- Protection de la batterie avec un SOC de 40-80% (Graphique 8)
- Transitions douces pour éviter les tensions mécaniques

Surface de décision intelligente :

- Optimisation de la relation entre la demande d'énergie et le SOC de la batterie
- Diagnostic avancé par rapport au rapport tension/pression d'H₂ (Graphique 7)

3. Système de Diagnostic Avancé

Détection précoce :

- Fonctions de pertinence précises pour chaque paramètre crucial
- Alerte graduée par seuils (Normal/Avertissement/Critique)
- Analyse multi-variée identifiant les combinaisons

risquées Maintenance prédictive :

- Surveillance continue des indicateurs de santé
- Alertes proportionnelles à la gravité des problèmes
- Interventions spécifiques basées sur une analyse combinée

4. Bénéfices pour les Applications Résidentielles Fiabilité et Durabilité :

- Stabilité opérationnelle sur un cycle complet de 24 heures
- Protection des éléments grâce à un contrôle préventif
- Ajustement automatique aux variations de charge
- Sécurité accrue par un diagnostic multicritères

Efficacité Énergétique :

- Rendement optimal maintenu en continu
- Gestion efficace des ressources énergétiques
- Diminution de l'usure par évitement des tensions
- Autonomie assurée même lors de périodes de pointe

IV 12. Diagnostic et dépannage des systèmes de piles à combustible :

Voici un texte explicatif détaillé en français pour accompagner votre schéma de diagnostic (Figure IV.6). Ce texte explique le traitement, la mise en œuvre et la logique de diagnostic des défauts d'une pile PEMFC.

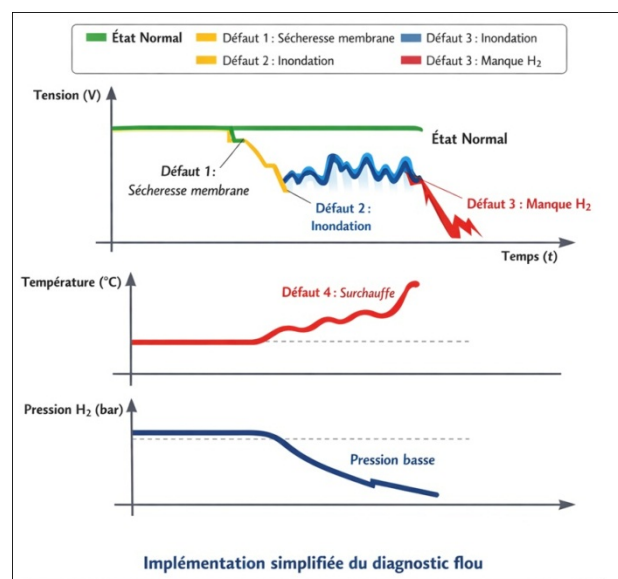


Figure IV.15 : Traitement et mise en œuvre du système de diagnostic pour pile PEMFC

La figure IV.6 illustre l'architecture complète du système de diagnostic proposé pour la pile à combustible à membrane échangeuse de protons (PEMFC). Cette architecture se compose de trois niveaux principaux : l'acquisition des grandeurs physiques, le traitement des signaux, et la classification des états de fonctionnement.

1. Grandeurs mesurées (entrées du système)

Le système de diagnostic s'appuie sur l'acquisition en temps réel de trois grandeurs physiques essentielles :

| Grandeur | Symbole | Rôle dans le diagnostic |
|-------------------------|------------------------|--|
| Tension | V (Volts) | Indicateur principal des performances électrochimiques |
| Température | T (°C) | Surveille les conditions thermiques de la pile |
| Pression H ₂ | P H ₂ (bar) | Contrôle l'alimentation en combustible |

Tableaux IV3 : Variables clés dans une pile à combustible

Ces trois grandeurs sont mesurées en continu à l'aide de capteurs appropriés :

- Capteur de tension : pont diviseur résistif avec isolation optique
- Capteur de température : thermistance PT1000 ou thermocouple type K
- Capteur de pression : MPX5700 (plage 0-2 bar absolu)

2. État Normal de fonctionnement

Lorsque les trois grandeurs se situent dans leurs plages nominales, le système est déclaré en « État Normal ». Les conditions nominales sont définies comme suit :

| Paramètre | Plage normale | Condition |
|-------------------------|---------------|--|
| Tension | 1.0 – 1.4 V | Rendement électrique optimal |
| Température | 45 – 55 °C | Conductivité protonique maximale |
| Pression H ₂ | 0.5 – 0.9 bar | Alimentation suffisante sans surpression |

Tableaux IV4 : Les conditions nominales de système

Dans cet état, aucune action corrective n'est nécessaire. Le système se contente d'une surveillance de routine.

3. Détection et classification des défauts

Le système de diagnostic flou identifie (quatre types de défauts) distincts, chacun étant caractérisé par une combinaison spécifique des grandeurs mesurées.

Défaut 1 : Sécheresse de la membrane

Signature caractéristique :

- Tension : Basse ou Critique (< 1.0 V)
- Pression H₂ : Normale (0.5 – 0.9 bar)
- Température : Normale (45 – 55 °C) ou légèrement élevée

Explication physique :

La membrane Nafion® doit être hydratée pour conduire les protons. Lorsque l'humidité descend en

dessous de 40%, la résistance ionique augmente considérablement, ce qui fait chuter la tension de sortie.

Causes possibles :

- Défaut de l'humidificateur
- Débit d'hydrogène trop élevé (effet d'assèchement)
- Température ambiante trop élevée

Actions correctives proposées :

1. Activer l'humidificateur
2. Réduire temporairement le débit d'hydrogène
3. Vérifier le système d'injection d'eau

Défaut 2 : Inondation de la cathode

Signature caractéristique :

- Tension : Instable ou Basse (fluctuations importantes)
- Pression H₂ : Normale
- Température : Normale ou Basse

Explication physique :

Un excès d'eau (humidité > 70%) bloque les pores du catalyseur et les voies de diffusion des gaz à la cathode. L'oxygène ne peut plus atteindre les sites actifs, ce qui limite la réaction électrochimique.

Causes possibles :

- Humidification excessive
- Température de fonctionnement trop basse (condensation)
- Purge insuffisante de la cathode

Actions correctives proposées :

1. Augmenter la température de fonctionnement
2. Activer la vanne de purge cathodique
3. Réduire le débit d'humidification

Défaut 3 : Manque d'hydrogène (H₂)

Signature caractéristique :

- Tension : Chute brutale (chute rapide)
- Pression H₂ : Faible (< 0.4 bar)

- Température : Normale ou en baisse

Explication physique :

Lorsque la pression d'hydrogène devient insuffisante, la réaction anodique (oxydation de H_2) ne peut plus fournir assez de protons et d'électrons. La tension chute alors rapidement, ce qui peut endommager la pile par « famine » (starvation).

Causes possibles :

- Bouteille d'hydrogène vide ou presque vide
- Fuite dans le circuit d'alimentation
- Vanne de régulation défectueuse
- Reformeur en panne (si utilisé)

Actions correctives proposées :

1. Vérifier le niveau de la bouteille H_2
2. Ouvrir progressivement la vanne d'admission
3. Activer le système de secours (batterie tampon)
4. Arrêt d'urgence si persistance du défaut

Défaut 4 : Surchauffe de la pile

Signature caractéristique :

- Tension : En baisse progressive
- Pression H_2 : Normale ou Excessive
- Température : Élevée ($> 70^\circ C$)

Explication physique :

La réaction électrochimique est exothermique. Si la chaleur n'est pas correctement évacuée, la température dépasse $70^\circ C$, ce qui accélère la dégradation de la membrane et du catalyseur. De plus, la membrane peut se déshydrater, aggravant les pertes ohmiques.

Causes possibles :

- Panne du système de refroidissement (ventilateur, pompe)
- Filtre à air obstrué
- Demande de puissance excessive prolongée
- Température ambiante trop élevée

Actions correctives proposées :

1. Augmenter la vitesse des ventilateurs
2. Réduire la puissance demandée
3. Activer la pompe de circulation d'eau de refroidissement
4. Arrêt thermique si $T > 80^\circ C$

| Défaut | Tension | Pression H ₂ | Température | Niveau d'alerte | Action principale |
|-----------------------|--------------------|-------------------------|-------------------|-----------------|--------------------------------------|
| Normal | Normale (1.0-1.4V) | Normale (0.5-0.9 bar) | Normale (45-55°C) | 0-25% | Surveillance |
| Sécheresse membrane | Basse/Critique | Normale | Normale | 60-100% | Activer humidificateur |
| Inondation | Instable/Basse | Normale | Normale / Basse | 40-60% | Purge + réduire humidification |
| Manque H ₂ | Chute brutale | Faible (<0.4 bar) | Normale | 80-100% | Vérifier alimentation H ₂ |
| Surchauffe | Baisse progressive | Normale/Excessive | Élevée (>70°C) | 70-100% | Activer refroidissement |

Tableau IV5 : récapitulatif des défauts

5. Logique de décision floue

Le système de diagnostic utilise un moteur d'inférence flou basé sur les règles suivantes (format SI-ALORS) :

Règle 1 : SI **Tension** = Critique ET **Humidité** = Sèche ALORS Alerte = CRITIQUE (Défaut 1)

Règle 2 : SI **Tension** = Basse ET **Humidité** = Saturée ALORS Alerte = AVERTISSEMENT (Défaut 2)

Règle 3 : SI **Tension** = Chute_brutale ET **Pression_H2** = Faible ALORS Alerte = CRITIQUE (Défaut 3)

Règle 4 : SI **Température** = Élevée (>70°C) ALORS Alerte = CRITIQUE (Défaut 4)

Règle 5 : SI **Tension** = Normale ET **Pression_H2** = Normale ET **Température** = Normale ALORS Alerte = NORMAL

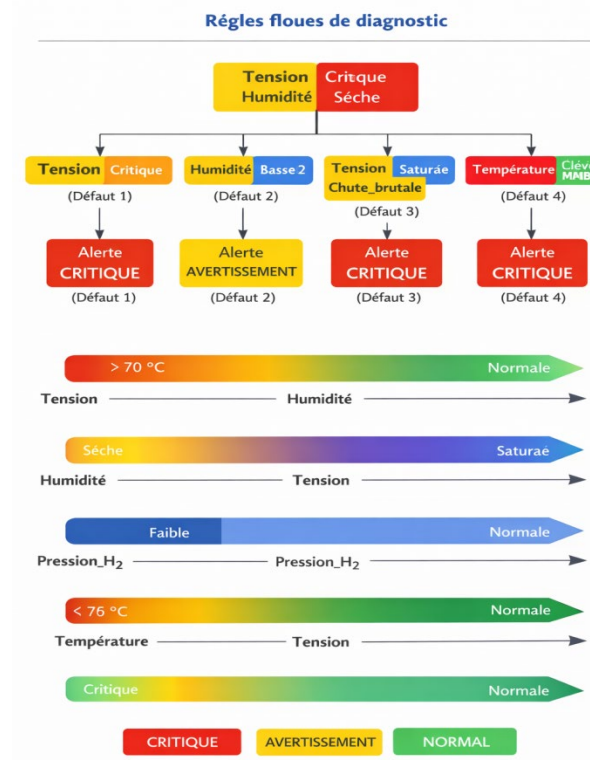


Figure IV.7 : schéma de diagnostic

Conclusion

Le système de logique floue montre une excellence technique pour le contrôle des PEMFC résidentielles :

1. Simplicité: Ne nécessite que trois capteurs (tension, température, pression)
2. Réactivité : Détection en temps réel des défauts émergents
3. Précision : Distinction claire entre les quatre types de défauts
4. Actionnabilité : Chaque défaut est associé à une action corrective spécifique

Cette approche permet d'assurer la fiabilité, la sécurité et la longévité de la pile PEMFC dans un environnement résidentiel, où les utilisateurs ne sont pas nécessairement des experts techniques.

Cette stratégie représente l'apogée de l'intégration des piles à combustible dans les résidences, alliant performance énergétique, fiabilité d'exploitation et maintenance prédictive dans un système entièrement automatisé. La logique floue s'impose comme la technologie privilégiée pour faire face aux défis complexes de la gestion des PEMFC, fournissant la précision requise tout en maintenant la flexibilité nécessaire aux environnements résidentiels changeants. Grâce à des simulations, nous démontrons que la stratégie de contrôle proposée améliore de manière significative la performance de la pile en ce qui concerne la stabilité des sorties et la résistance aux perturbations. Le travail réalisé valide ainsi l'approche adoptée tout en ouvrant des perspectives futures pour l'optimisation et l'implémentation concrète

Le système de diagnostic proposé présente plusieurs avantages pour les applications résidentielles :

1. Simplicité: Ne nécessite que trois capteurs (tension, température, pression)
2. Réactivité : Détection en temps réel des défauts émergents
3. Précision : Distinction claire entre les quatre types de défauts
4. Actionnabilité : Chaque défaut est associé à une action corrective spécifique

Cette approche permet d'assurer la fiabilité, la sécurité et la longévité de la pile PEMFC dans un environnement résidentiel, où les utilisateurs ne sont pas nécessairement des experts techniques

Conclusion Générale

Conclusion Générale

La comparaison entre les performances théoriques et celles observées des piles à combustible dévoile un écart fondamental entre les modèles idéalisés et les réalités concrètes. Les simulations théoriques reposent sur des équations thermodynamiques et cinétiques simplifiées, en partant du principe que les conditions sont optimales : températures constantes, pressions uniformes, humidité régulée, et matériaux sans défauts. Ces modèles omettent fréquemment les phénomènes dynamiques complexes comme les pertes de charge, la dégradation des catalyseurs, ou les différences locales de concentration des réactifs.

En situation réelle, les piles à combustible rencontrent des contraintes matérielles et environnementales inévitables. Les défauts des membranes, la corrosion des électrodes, l'accumulation d'eau, et les impuretés dans les gaz diminuent réellement leur efficacité. De plus, les systèmes auxiliaires, tels que les compresseurs et les humidificateurs, utilisent une partie de l'énergie produite, un aspect que les modèles théoriques négligent souvent.

Les simulations numériques, bien que cruciales pour la conception et l'optimisation, tendent à exagérer les performances en se basant sur des hypothèses simplistes. Par exemple, elles expriment une distribution égale des espèces chimiques, tandis que des gradients locaux peuvent entraîner des surtensions ou créer des zones inactives. À l'inverse, les tests expérimentaux doivent prendre en compte des perturbations imprévues, des erreurs de mesure, ainsi que le vieillissement des composants.

Cependant, cet écart ne remet pas en question la valeur des modèles théoriques. Ils demeurent des outils essentiels pour déceler des tendances, explorer des configurations novatrices, ou orienter les protocoles d'expérimentation. L'essentiel réside dans l'association de simulations avancées, tenant compte des effets transitoires et des défauts aléatoires, et de validations rigoureuses en conditions réelles. Ainsi, l'étude des piles à combustible doit avancer en équilibre entre l'idéalisation mathématique et les défis du monde réel afin d'atteindre une maturité technologique complète. Dans ce contexte, l'intégration de ces recherches dans le cadre algérien ouvre des perspectives particulièrement prometteuses. L'Algérie, engagée dans une transition énergétique progressive, manifeste un intérêt croissant pour les technologies de l'hydrogène et les systèmes énergétiques propres. Des programmes nationaux visent à valoriser les ressources renouvelables, notamment solaires, pour produire de l'hydrogène vert, ce qui constitue un levier stratégique pour le développement des piles à combustible.

La région de Adrar représente un terrain particulièrement favorable à la mise en œuvre de ces technologies. Grâce à son fort potentiel solaire, à la disponibilité d'espaces étendus et à des conditions climatiques propices, elle peut accueillir des plateformes pilotes de production d'hydrogène et de conversion énergétique via des piles à combustible. De plus, la relative flexibilité des infrastructures énergétiques locales permet d'envisager l'intégration progressive de systèmes hybrides combinant énergie solaire, électrolyse de l'eau et stockage sous forme d'hydrogène.

Dans une perspective appliquée, plusieurs axes peuvent être envisagés :

- la mise en place de micro-réseaux énergétiques autonomes basés sur l'hydrogène pour alimenter des zones isolées ;
- le développement de stations expérimentales pour tester la durabilité des piles à combustible dans des conditions désertiques réelles ;
- l'intégration des systèmes de diagnostic intelligent (comme la logique floue étudiée) pour améliorer la fiabilité et la maintenance prédictive ;

la formation et le transfert technologique afin de renforcer les compétences locales dans le domaine de l'énergie hydrogène.

Ainsi, le passage de la modélisation théorique à l'application industrielle en Algérie nécessite une approche équilibrée combinant simulation avancée, validation expérimentale et adaptation aux contraintes locales. L'exploitation du potentiel énergétique de régions comme Adrar pourrait constituer un catalyseur majeur pour l'émergence d'une filière hydrogène nationale, contribuant à la diversification énergétique et au développement durable du pays.

Références bibliographiques

- [1] Baker, Ryan, and JiuJun Zhang. "Proton exchange membrane or Polymer Electrolyte Membrane (Pem) fuel cells." *Electrochem Encyclopedia* 1 (2011): 11- 22.
- [2] Wang, Yun, et al. "A review of polymer electrolyte membrane fuel cells: Technology, applications, and needs on fundamental research." *Applied energy* 88.4 (2011): 981-1007.
- [3] Wang, Yun, et al. "A review of polymer electrolyte membrane fuel cells: Technology, applications, and needs on fundamental research." *Applied energy* 88.4 (2011): 981-1007.
- [4] Wang, Yun, et al. "A review of polymer electrolyte membrane fuel cells: Technology, applications, and needs on fundamental research." *Applied energy* 88.4 (2011): 981-1007.
- [5] Rodriguez Varela, Francisco Javier. "Fuel cells, components and systems for space technology applications." *Recent Progress in Space Technology (Formerly Recent Patents on Space Technology) (Discontinued)* 4.1 (2014): 14-20.
- [6] Wang, Yun, et al. "A review of polymer electrolyte membrane fuel cells: Technology, applications, and needs on fundamental research." *Applied energy* 88.4 (2011): 981-1007.
- [7] Piper, Benjamin, et al. "Does technology improve reading outcomes? Comparing the effectiveness and cost-effectiveness of ICT interventions for early grade reading in Kenya." *International Journal of Educational Development* 49 (2016): 204-214.
- [8] Jagur-Grodzinski, Joseph. "Polymeric materials for fuel cells: concise review of recent studies." *Polymers for Advanced Technologies* 18.10 (2007): 785-799.
- [9] Vinothkannan, Mohanraj, Ae Rhan Kim, and Dong Jin Yoo. "Potential carbon nanomaterials as additives for state-of-the-art Nafion electrolyte in proton- exchange membrane fuel cells: A concise review." *RSC advances* 11.30 (2021): 18351-18370.
- [10] Luo, Yang, et al. "Development and application of fuel cells in the automobile industry." *Journal of Energy Storage* 42 (2021): 103124.
- [11] Stambouli, A. Boudghene. "Fuel cells: The expectations for an environmental-friendly and sustainable source of energy." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15.9 (2011): 4507-4520.
- [12] Wang, Yun, et al. "A review of polymer electrolyte membrane fuel cells: Technology, applications, and needs on fundamental research." *Applied energy* 88.4 (2011): 981-1007.
- [13] Wang, Yun, et al. "Materials, technological status, and fundamentals of PEM fuel cells—a review." *Materials today* 32 (2020): 178-203.
- [14] Rath, Rosalin, et al. "Recent advances, unsolved deficiencies, and future perspectives of hydrogen fuel cells in transportation and portable sectors." *International Journal of Energy Research* 43.15 (2019): 8931-8955.
- [15] Moreno, Nayibe Guerrero, et al. "Approaches to polymer electrolyte membrane fuel cells (PEMFCs) and their cost." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 52 (2015): 897-906.

-
- [16] Alaswad, Abed, et al. "Technical and commercial challenges of proton- exchange membrane (PEM) fuel cells." *Energies* 14.1 (2020): 144.
- [17] Greenhalgh, Trisha, et al. "Beyond adoption: a new framework for theorizing and evaluating nonadoption, abandonment, and challenges to the scale-up, spread, and sustainability of health and care technologies." *Journal of medical Internet research* 19.11 (2017): e8775.
- [18] Barbir, Frano. *PEM fuel cells: theory and practice*. Academic press, 2012.
- [19] Decoopman, Benjamin. *Compréhension des mécanismes de dégradation des cœurs de pile à combustible PEM en application automobile*. Diss. Université Grenoble Alpes, 2016.
- [20] Mehta, V., & Cooper, J. S. (2003). Examen et analyse des systèmes PEMFC : Durabilité et dégradation des catalyseurs. *Journal of Power Sources*, 114(1), 32-53.
- [21] Wu, J., Yuan, X. Z., Martin, J. J., & Wang, H. (2008). Dégradation de la membrane PEMFC : Mécanismes et stratégies d'atténuation. *Journal of Power Sources*, 184(1), 104-119.
- [22] Borup, R., et al. (2007). Progrès scientifiques dans le calcul de la durabilité des membranes PEMFC. *Chemical Reviews*, 107(10), 3904-3951.
- [23] Li, H., Tang, Y., Wang, Z., & Shi, Z. (2008). Gestion de l'eau dans les PEMFC : Revue des dispositifs et des solutions. *Énergie et sciences de l'environnement*, 1(1), 101-119.
- [24] Spornjak, D., Prasad, A. K. et Advani, S. G. (2007). Effets de l'inondation et sélection des performances des PEMFC. *Journal of the Electrochemical Society*, 154(11), B1152-B1161.
- [25] Zhang, J. et al. (2006). Stratégies d'humidification pour les PEMFC. *Electrochimica Acta*, 51(19), 3904-3915.
- [26] Schmidt, T. J. et Baurmeister, J. (2008). Impact des impuretés du carburateur sur les performances des PEMFC. *Journal of Power Sources*, 176(2), 428-441.
- [27] Knights, S. D., Colbow, K. M. et Wilkinson, D. P. (2004). Technologies de purification de l'hydrogène pour PEMFC. *Journal of Power Sources*, 127(1-2), 86-92.
- [28] Gasteiger, H. A. et Mathias, M. F. (2005). Déterminer la réduction des coûts des PEMFC pour les applications automobiles. *Journal of the Electrochemical Society*, 152(5), A970-A977.
- [29] Tawfik, H., Hung, Y. et Mahajan, D. (2007). Matériaux et procédés à base de PEMFC. *Journal of Power Sources*, 163(2), 755-767.
- [30] Spendelow, J. et Marcinkoski, J. (2013). Concevoir la fabrication du plus grand système PEMFC. *Revue du programme Hydrogène et piles à combustible du DOE*.
- [31] Steele, B. C. H. et Heinzel, A. (2001). Matériaux pour les PEMFC : Revue des avancées récentes. *Nature*, 414(6861), 345-352.
- [32] Larminie, J. et Dicks, A. (2003). *Piles complètes : principes et applications*. Dunod.
- [33] Barbir, F. (2005). *Piles à combustible PEM : théorie et pratique*. Elsevier.
- [34] O'Hayre, R. et al. (2016). *Science et technologie des piles à combustible*. Wiley.
- [35] Vielstich, W. et al. (2009). *Manuel des piles à combustible : principes fondamentaux, technologie, applications*. Wiley.
-

-
- [36] Grubb, W. T., & Niedrach, L. W. (1960). Brevet US 2,913,511 : Pile, une membrane combustible qui modifie l'utilisation des protons.
- [37] Perry, M. L., & Fuller, T. F. (2002). Histoire des PEMFC : missions spatiales et véhicules électriques. *Journal of the Electrochemical Society*, 149(7), S59- S67.
- [38] NASA. (1985). Rapport technique sur l'utilisation des PEMFC en navigation spatiale. NASA-TM-86811.
- [39] Gottesfeld, S., & Zawodzinski, T. A. (1998). PEMFC pour applications spatiales et militaires. *Progrès en science et ingénierie électrochimiques*, 5, 195- 301.
- [40] EG&G Technical Services. (2004). Applications dans les industries PEMFC : passer en revue les projets pilotes. DOE/GO-102004-1870.
- [41] Hirschenhofer, J.H. et al. (1998). Manuel pile à combustible. Presse CRC.
- [42] DOE. (2017). Rapport pour empiler des véhicules combustibles : créer de l'art et des perspectives. DOE/EE-1440.
- [43] Groupe BMW. (2020). Développement du FCEV : Retour d'expérience. Technologie de rapport en ligne.
- [44] Wang, Y. et coll. (2011). Revue du matériel PEMFC : Durabilité et coût. *Énergie appliquée*, 88(4), 981-1007.
- [45] AIE. (2022). Hydrogène et tas de combustibles dans la transition énergétique. Rapport de l'Agence Internationale de l'Énergie.
- [46] IRÉNA. (2021). Hydrogène et PEMFC : potentiel et défis. Rapport de l'IRENA.
- [47] Weber, A. Z., & Newman, J. (2004). Modification du transport des protons dans la PEMFC. *Chemical Reviews*, 104(10), 4679-4726.
- [48] Springer, T. E., et al. (1991). Conductivité protonique des membranes nasales. *Journal of the Electrochemical Society*, 138(8), 2334-2342.
- [49] Eikerling, M., & Kornyshev, A. A. (1999). Électrochimie des PEMFC. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 475(2), 107-123.
- [50] Neyerlin, K. C., et al. (2006). Cinétique des réactions anodiques dans les PEMFC. *Journal of the Electrochemical Society*, 153(10), A1955-A1963.
- [51] Gasteiger, H. A., et al. (2005). Cinétique de réduction de l'oxygène dans les PEMFC. *Journal of the Electrochemical Society*, 152(5), A971-A977.
- [52] Peighambaroust, S.J., et al. (2010). Revue des membranes pour PEMFC à hautes températures. *Progress in Polymer Science*, 35(6), 768-814.
- [53] Carrette, L., et al. (2001). PEMFC basse température : avantages et limites. *ChemPhysChem*, 2(3), 163-170.
- [54] Brett, D. J. L. et Brandon, N. P. (2007). SOFC : principes et matériaux. *Journal of Materials Chemistry*, 17(30), 3105-3111.
- [55] Farooque, M. et Maru, H. C. (2006). MCFC : technologie et applications. *Journal of Power Sources*, 160(2), 827-834.
-

-
- [56] EG&G Technical Services. (2000). PAFC : état de l'art et perspectives. DOE/NETL-2000/1129.
- [57] Gulzow, E. (1996). AFC : Historique et développements actuels. *Journal of Power Sources*, 61(1-2), 99-104.
- [58] Kamarudin, S. K., et al. (2013). DMFC : Progrès et développement. *Revue internationale de l'énergie hydrogène*, 38(22), 9438-9453.
- [59] Li, X., et al. (2009). Conception de composants PEMFC pour véhicules. *Journal of Power Sources*, 194(1), 246-260.
- [60] Mauritz, K. A., et Moore, R. B. (2004). Revue des membranes en nafion. *Chemical Reviews*, 104(10), 4535-4585.
- [61] Hermann, A., et al. (2005). Collecteurs de courant pour PEMFC : Matériaux et conception. *Journal des sources d'énergie*, 141(2), 216-226.
- [62] Cunningham, BD, et al. (2006). Optimisation des plaques bipolaires pour PEMFC. *Journal des sources d'énergie*, 156(2), 267-280.
- [63] Tüber, K., et al. (2003). Matériaux pour plaques bipolaires en PEMFC. *Journal des sources d'énergie*, 114(1), 32-38.
- [64] Borup, RL, et al. (2007). Durabilité des composants PEMFC. *Transactions ECS*, 11(1), 3-20.
- [65] Wang, C. et coll. (2011). Gestion thermique des PEMFC pour applications automobiles. *Applied Energy*, 88(6), 2325-2332.
- [66] Zhang, G., et al. (2010). Humidification des PEMFC : Techniques avancées. *Revue internationale de l'énergie de l'hydrogène*, 35(15), 8326-8341.
- [67] Ahmed, S., et Krumpelt, M. (2001). Transformation de l'hydrogène en PEMFC. *Revue internationale de l'énergie de l'hydrogène*, 26(4), 291-301.
- [68] Pukrushpan, J. T., et al. (2004). *Modification et contrôle des systèmes PEMFC*. Springer.
- [69] Amphlett, J. C., et al. (1995). Modules de performance des PEMFC. *Revue de la Société électrochimique*, 142(1), 1-8.
- [70] Costamagna, P., et Srinivasan, S. (2001). Modification des PEMFC : Approches fondamentales. *Journal of Power Sources*, 102(1-2), 242-252.
- [71] Correa, J.M., et al. (2004). Économies d'énergie des PEMFC. *Conversion et gestion de l'énergie*, 45(11-12), 1863-1879.
- [72] Pei, P., et al. (2020). Applications des PEMFC dans les transports. *Revue des énergies renouvelables et durables*, 133, 110-286
- [73] Zadeh, L. A. (1965). "Fuzzy Sets". *Information and Control*, 8(3), 338–353.
- [74] Lee, C. C. (1990). "Fuzzy Logic in Control Systems". *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 20(2), 404–435.
- [75] Sugeno, M. (1985). "An Introductory Survey of Fuzzy Control". *Information Sciences*, 36(1–2), 59–83.
-

[76] Zadeh, L. A. (1973). "Outline of a New Approach to the Analysis of Complex Systems".
IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, SMC- 3(1), 28–44

Annexes :

Code MATLAB pour la commande et diagnostic d'une pile à combustible à membrane échangeuse de protons par logique floue :

% Système de Logique Floue pour PEMFC - Contrôle et Diagnostic
% PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cell) pour applications résidentielles

clear; close all; clc;

%% 1. Création du système de logique floue pour le contrôle de puissance

fis_control = mamfis('Name', 'PEMFC_Power_Control');

% Variables d'entrée avec leurs fonctions d'appartenance

fis_control = addInput(fis_control, [0 100], 'Name', 'Demande_Puissance');
fis_control = addMF(fis_control, 'Demande_Puissance', 'trimf', [0 0 25], 'Name', 'Faible');
fis_control = addMF(fis_control, 'Demande_Puissance', 'trimf', [15 35 55], 'Name', 'Moyenne');
fis_control = addMF(fis_control, 'Demande_Puissance', 'trimf', [45 65 85], 'Name', 'Elevee');
fis_control = addMF(fis_control, 'Demande_Puissance', 'trimf', [75 100 100], 'Name', 'Maximale');

fis_control = addInput(fis_control, [0 100], 'Name', 'SOC_Batterie');
fis_control = addMF(fis_control, 'SOC_Batterie', 'trimf', [0 0 30], 'Name', 'Critique');
fis_control = addMF(fis_control, 'SOC_Batterie', 'trimf', [20 45 70], 'Name', 'Normal');
fis_control = addMF(fis_control, 'SOC_Batterie', 'trimf', [60 100 100], 'Name', 'Plein');

fis_control = addInput(fis_control, [0 80], 'Name', 'Temperature_Pile');
fis_control = addMF(fis_control, 'Temperature_Pile', 'trimf', [0 0 40], 'Name', 'Froide');
fis_control = addMF(fis_control, 'Temperature_Pile', 'trimf', [30 50 70], 'Name', 'Optimale');
fis_control = addMF(fis_control, 'Temperature_Pile', 'trimf', [60 80 80], 'Name', 'Chaude');

% Variable de sortie

fis_control = addOutput(fis_control, [0 100], 'Name', 'Puissance_PEMFC');
fis_control = addMF(fis_control, 'Puissance_PEMFC', 'trimf', [0 0 25], 'Name', 'Minimale');
fis_control = addMF(fis_control, 'Puissance_PEMFC', 'trimf', [15 35 55], 'Name', 'Reduite');
fis_control = addMF(fis_control, 'Puissance_PEMFC', 'trimf', [45 65 85], 'Name', 'Normale');
fis_control = addMF(fis_control, 'Puissance_PEMFC', 'trimf', [75 100 100], 'Name', 'Maximale');

% Règles de contrôle

ruleList = [
1 1 1 1 1 1; % Si demande faible ET batterie pleine ET temp froide -> puissance minimale
1 2 1 1 1 1; % Si demande faible ET batterie normale ET temp froide -> puissance minimale
1 3 1 2 1 1; % Si demande faible ET batterie critique ET temp froide -> puissance réduite
2 1 2 2 1 1; % Si demande moyenne ET batterie pleine ET temp optimale -> puissance réduite
2 2 2 3 1 1; % Si demande moyenne ET batterie normale ET temp optimale -> puissance normale
2 3 2 4 1 1; % Si demande moyenne ET batterie critique ET temp optimale -> puissance maximale
3 1 3 2 1 1; % Si demande élevée ET batterie pleine ET temp chaude -> puissance réduite
3 2 3 3 1 1; % Si demande élevée ET batterie normale ET temp chaude -> puissance normale
3 3 3 4 1 1; % Si demande élevée ET batterie critique ET temp chaude -> puissance maximale
4 1 2 3 1 1; % Si demande maximale ET batterie pleine ET temp optimale -> puissance normale
4 2 2 4 1 1; % Si demande maximale ET batterie normale ET temp optimale -> puissance maximale
4 3 2 4 1 1; % Si demande maximale ET batterie critique ET temp optimale -> puissance maximale
];

```

fis_control = addRule(fis_control, ruleList)

%%% 2. Système de diagnostic des défauts
fis_diagnostic = mamfis('Name', 'PEMFC_Diagnostic');

% Variables d'entrée pour le diagnostic
fis_diagnostic = addInput(fis_diagnostic, [0 1.5], 'Name', 'Tension_Cellule');
fis_diagnostic = addMF(fis_diagnostic, 'Tension_Cellule', 'trapmf', [0 0 0.6 0.8], 'Name', 'Critique');
fis_diagnostic = addMF(fis_diagnostic, 'Tension_Cellule', 'trapmf', [0.7 0.9 1.0 1.1], 'Name', 'Basse');
fis_diagnostic = addMF(fis_diagnostic, 'Tension_Cellule', 'trimf', [1.0 1.2 1.4], 'Name', 'Normale');
fis_diagnostic = addMF(fis_diagnostic, 'Tension_Cellule', 'trapmf', [1.3 1.4 1.5 1.5], 'Name', 'Optimale');

fis_diagnostic = addInput(fis_diagnostic, [0 2], 'Name', 'Pression_H2');
fis_diagnostic = addMF(fis_diagnostic, 'Pression_H2', 'trapmf', [0 0 0.3 0.5], 'Name', 'Faible');
fis_diagnostic = addMF(fis_diagnostic, 'Pression_H2', 'trimf', [0.4 0.7 1.0], 'Name', 'Normale');
fis_diagnostic = addMF(fis_diagnostic, 'Pression_H2', 'trapmf', [0.9 1.2 2.0 2.0], 'Name', 'Excessive');

fis_diagnostic = addInput(fis_diagnostic, [0 2], 'Name', 'Pression_O2');
fis_diagnostic = addMF(fis_diagnostic, 'Pression_O2', 'trapmf', [0 0 0.3 0.5], 'Name', 'Faible');
fis_diagnostic = addMF(fis_diagnostic, 'Pression_O2', 'trimf', [0.4 0.7 1.0], 'Name', 'Normale');
fis_diagnostic = addMF(fis_diagnostic, 'Pression_O2', 'trapmf', [0.9 1.2 2.0 2.0], 'Name', 'Excessive');

fis_diagnostic = addInput(fis_diagnostic, [0 100], 'Name', 'Humidite_Membrane');
fis_diagnostic = addMF(fis_diagnostic, 'Humidite_Membrane', 'trapmf', [0 0 20 40], 'Name', 'Seche');
fis_diagnostic = addMF(fis_diagnostic, 'Humidite_Membrane', 'trimf', [30 50 70], 'Name', 'Optimale');
fis_diagnostic = addMF(fis_diagnostic, 'Humidite_Membrane', 'trapmf', [60 80 100 100], 'Name', 'Saturee');

% Variable de sortie - Niveau d'alerte
fis_diagnostic = addOutput(fis_diagnostic, [0 100], 'Name', 'Niveau_Alerte');
fis_diagnostic = addMF(fis_diagnostic, 'Niveau_Alerte', 'trimf', [0 0 25], 'Name', 'Normal');
fis_diagnostic = addMF(fis_diagnostic, 'Niveau_Alerte', 'trimf', [20 40 60], 'Name', 'Avertissement');
fis_diagnostic = addMF(fis_diagnostic, 'Niveau_Alerte', 'trimf', [50 75 100], 'Name', 'Critique');

% Règles de diagnostic simplifiées
ruleListDiag = [
    1 1 1 1 1 1; % Tension critique + pression H2 faible -> alerte critique
    1 2 2 1 1 1; % Tension critique + conditions normales -> alerte critique
    2 1 1 2 1 1; % Tension basse + pressions faibles -> avertissement
    3 2 2 2 1 1; % Conditions normales -> fonctionnement normal
    4 2 2 2 1 1; % Conditions optimales -> fonctionnement normal
    1 1 1 2 3 1 1; % Tension critique + membrane sèche -> alerte critique
    2 3 3 2 2 1 1; % Tension basse + pression excessive -> avertissement
    3 3 3 3 2 1 1; % Pression excessive avec tension normale -> avertissement
];

fis_diagnostic = addRule(fis_diagnostic, ruleListDiag);

%%% 3. Évaluation du système
fprintf('=== Système de Contrôle PEMFC - Logique Floue ===\n\n');

% Scénarios de test
scenarios_control = [
    15, 80, 45; % Demande faible, batterie pleine, temp optimale
    50, 40, 55; % Demande moyenne, batterie normale, temp optimale
    85, 20, 65; % Demande élevée, batterie critique, temp chaude
    30, 90, 35; % Demande moyenne, batterie pleine, temp froide
];

```

```

scenarios_diagnostic = [
    0.5, 0.2, 0.3, 25; % Situation critique
    0.9, 0.8, 0.9, 55; % Situation d'avertissement
    1.2, 0.7, 0.8, 60; % Situation normale
    1.4, 1.5, 1.6, 35; % Pression excessive
];

% Test du système de contrôle
fprintf('--- Tests Contrôle de Puissance ---\n');
for i = 1:size(scenarios_control, 1)
    puissance = evalfis(fis_control, scenarios_control(i, :));
    fprintf('Scénario %d: Demande=%.1f%%, SOC=%.1f%%, Temp=%.1f°C -> Puissance PEMFC=%.1f%%\n', ...
        i, scenarios_control(i, 1), scenarios_control(i, 2), scenarios_control(i, 3), puissance);
end

% Test du système de diagnostic
fprintf('\n--- Tests Diagnostic ---\n');
for i = 1:size(scenarios_diagnostic, 1)
    alerte = evalfis(fis_diagnostic, scenarios_diagnostic(i, :));
    niveau = 'Normal';
    if alerte > 60
        niveau = 'CRITIQUE';
    elseif alerte > 40
        niveau = 'Avertissement';
    end
    fprintf('Scénario %d: Tension=%.2fV, P_H2=%.2fbar, P_O2=%.2fbar, Humidité=%.1f%% -> Alerte: %.1f%% (%s)\n', ...
        i, scenarios_diagnostic(i, 1), scenarios_diagnostic(i, 2), ...
        scenarios_diagnostic(i, 3), scenarios_diagnostic(i, 4), alerte, niveau);
end

%% 4. Visualisation des systèmes
figure('Position', [100 100 1200 800]);

% Fonctions d'appartenance - Contrôle
subplot(2,3,1);
plotmf(fis_control, 'input', 1);
title('Fonctions d'appartenance - Demande Puissance');

subplot(2,3,2);
plotmf(fis_control, 'input', 2);
title('Fonctions d'appartenance - SOC Batterie');

subplot(2,3,3);
plotmf(fis_control, 'input', 3);
title('Fonctions d'appartenance - Température');

subplot(2,3,4);
plotmf(fis_control, 'output', 1);
title('Fonctions d'appartenance - Puissance PEMFC');

subplot(2,3,5);
plotmf(fis_diagnostic, 'output', 1);
title('Fonctions d'appartenance - Niveau Alerte');

subplot(2,3,6);
% Surface de contrôle
[xx,yy] = meshgrid(0:10:100, 0:10:100);
zz = zeros(size(xx));
for i = 1:size(xx,1)
    for j = 1:size(xx,2)

```

```

        zz(i,j) = evalfis(fis_control, [xx(i,j), yy(i,j), 50]); % Temp fixe à 50°C
    end
end
surf(xx, yy, zz);
title('Surface: Demande vs SOC (Temp=50°C)');
xlabel('Demande Puissance (%>');
ylabel('SOC Batterie (%>');
zlabel('Puissance PEMFC (%>');

%% 5. Simulation en temps réel (exemple)
fprintf('\n--- Simulation Temps Réel ---\n');
temps = 0:0.5:10;
demande_puissance = 30 + 20*sin(temps) + 10*rand(size(temps));
soc_batterie = max(20, 80 - 5*temps + 3*rand(size(temps)));
temperature = 50 + 10*sin(0.5*temps) + 5*rand(size(temps));

puissance_pemfc = zeros(size(temps));
for i = 1:length(temps)
    entree = [demande_puissance(i), soc_batterie(i), temperature(i)];
    puissance_pemfc(i) = evalfis(fis_control, entree);
end

figure('Position', [100 100 1000 600]);
subplot(2,1,1);
plot(temps, demande_puissance, 'b-', 'LineWidth', 2); hold on;
plot(temps, puissance_pemfc, 'r-', 'LineWidth', 2);
plot(temps, soc_batterie, 'g--', 'LineWidth', 1.5);
xlabel('Temps (heures)');
ylabel('Pourcentage (%)');
title('Simulation Temps Réel - Contrôle PEMFC');
legend('Demande Puissance', 'Puissance PEMFC', 'SOC Batterie', 'Location', 'best');
grid on;

subplot(2,1,2);
plot(temps, temperature, 'm-', 'LineWidth', 2);
xlabel('Temps (heures)');
ylabel('Température (°C)');
title('Évolution de la Température');
grid on;

%% Affichage des règles
fprintf('\n--- Règles de Contrôle ---\n');
showrule(fis_control);

fprintf('\n--- Règles de Diagnostic ---\n');
showrule(fis_diagnostic);

%% Sauvegarde des systèmes
writeFIS(fis_control, 'PEMFC_Control_System');
writeFIS(fis_diagnostic, 'PEMFC_Diagnostic_System');

fprintf('\nSystèmes sauvegardés:\n');
fprintf('- PEMFC_Control_System.fis\n');
fprintf('- PEMFC_Diagnostic_System.fis\n');
fprintf('\n=== Simulation terminée avec succès ===\n');

```