



الشعبية الديمقراطية الجزائرية الجمهورية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

العلمي والبحث العالي التعليم وزارة

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

المدرسة الوطنية العليا للتكنولوجيا والهندسة- عنابة-

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE DE TECHNOLOGIE ET D'INGENIERIE – ANNABA

Département d'Électronique, d'Électrotechnique et Automatique

MEMOIRE

En vue d'obtention du diplôme de MASTER

Domaine : Science et Technologie

Filière : Electrotechnique

Spécialité : Réseaux Electriques

Présenté par

BOUCHAIR HANI

OUCIF LOKMANE

Modélisation et analyse du comportement de pile à combustible PEMFC

Encadré par

Pr. HOUBES MOURAD

ENSTI Annaba

Membres du jury :

MCB. MESSIKH Tarek	Président	ENSTI ANNABA
MCB. BENNEDJAI Soumaya	Examineur	ENSTI ANNABA
MAB. DJELLOUL Khedda Zakarya	Examineur	ENSTI ANNABA

Remerciements

Al hamdou lillah, par la grâce duquel les bonnes actions sont accomplies, qui nous a aidés à accomplir cet humble travail.

Nos sincères remerciements à notre encadrant monsieur HOUABES Mourad pour la supervision, l'orientation et le conseil tout au long de ce travail.

Nous tenons à exprimer notre gratitude aux employés de l'usine de panneaux d'Algérie pour leur accueil chaleureux et leur accompagnement au long de stage de fin d'étude.

Table des matières

Introduction	2
<hr/>	
Chapitre I : Présentation générale des piles à combustible	
I.1 Introduction	4
I.2 Définition	4
I.3 Pile à combustible de type PEM	4
I.3.1 Principe de fonctionnement	4
I.3.2 Structure du stack PEM	5
I.3.3 Les composants d'une cellule PEM	5
I.3.4 Secteurs d'application des piles PEM	6
I.4 Conclusion	6
<hr/>	
Chapitre II : Approche de la pile PEM par modélisation	
II.1 Introduction	8
II.2 Modèle électrique de la pile PEM	8
II.2.1 Perte d'activation	9
II.2.2 Pertes ohmiques	9
II.2.3 Chute liée à la concentration	11
II.3 Phénomènes de double couche électrochimique	11
II.4 Approche dynamique pour la modélisation d'une pile PEM	11
II.4.1 Circuit équivalent électrique	11
II.5 Conclusion	12
<hr/>	
Chapitre III : Analyse du comportement de la pile à combustible PEMFC	
III.1 Introduction	14
III.2 Données techniques de la pile PEM étude	14
III.3 Influence des conditions opératoires sur la pile PEM	15
III.3.1 Influence de la température	15
III.3.2 Influence de la pression	17
III.4 La suralimentation en hydrogène	18
III.4.1 Effet du débit d'hydrogène sur la tension et le courant de sortie	19
III.4.2 L'usage de combustible	19
III.4.3 Impact du débit d'hydrogène sur le rendement énergétique de la pile	21
III.4.4 Réponse en tension et en courant après le convertisseur Boost.	21
III.5 Conclusion	22
<hr/>	
Conclusion final	24

Liste des Figures

Figure I.1 : Schéma fonctionnel de la pile à combustible PEM	5
Figure I.2 : Les éléments constitutifs de la PEM	6
Figure II.1 : Zones dynamiques et comportements croisés de la tension et puissance dans une PEMFC	9
Figure II.2 : Représentation simplifiée du modèle électrique d'une pile PEMFC	12
Figure III.1 : Comportement polarisation-puissance de la pile étudiée	15
Figure III.2 : Tension de la pile selon la température	15
Figure III.3 : La puissance utile selon différente température	16
Figure III.4 : Le rendement selon la température de fonctionnement	16
Figure III.5 : Tension selon les conditions de pression	17
Figure III.6 : La puissance utile selon différente pression	17
Figure III.7 : Rendement selon différentes pressions	18
Figure III.8 : Variation de débit de carburant (H_2)	19
Figure III.9 : Évolution simultanée du courant et de la tension	19
Figure III.10 : Évolution de courant de pile et l'utilisation d'hydrogène	20
Figure III.11 : Variation du rendement et du taux d'utilisation de l'hydrogène	21
Figure III.12 : Évolution de courant et de tension en aval du hacheur Boost	22

Liste d'Abréviations

Abréviation	Définition
PEM	Proton exchange membrane
Ψ (Psi)	Teneur en eau dans la membrane
$P_{H_2}^*$	pressions partielles d'hydrogène
$P_{O_2}^*$	pressions partielles d'oxygène

المخلص

تمثل خلية الوقود نظامًا متطورًا للطاقة النظيفة يحوّل الطاقة الكيميائية مباشرةً إلى طاقة كهربائية عبر تفاعل غير احتراقي بين الهيدروجين والأكسجين، مع إنتاج الماء كمنتج ثانوي صديق للبيئة. وقد شهدت هذه التقنية تطورًا ملحوظًا في السنوات الأخيرة. تستعرض هذه الدراسة الآلية التفصيلية لتشغيل خلايا وقود غشاء تبادل البروتون، مع التركيز على النمذجة الحركية باستخدام منصة MATLAB/Simulink لتحليل أدائها تحت ظروف تشغيلية متغيرة. كما يبحث العمل في التفاعلات الكهروكيميائية الأساسية وتأثير المعلمات التشغيلية الحرجة مثل درجات الحرارة، ضغوط التشغيل، ومعدلات تغذية الوقود على الخصائص الوظيفية للخلية.

Résumé

La pile à combustible constitue une technologie énergétique innovante qui produit de l'électricité par oxydation électrochimique de l'hydrogène, avec comme seuls résidus de la vapeur d'eau et une quantité significative d'énergie thermique. Ces systèmes connaissent actuellement un essor remarquable et trouvent des applications variées, depuis l'alimentation stationnaire jusqu'à la propulsion électrique de véhicules.

Ce travail de recherche explore en détail les mécanismes de fonctionnement des piles PEMFC, en mettant l'accent sur leur modélisation dynamique via l'outil MATLAB/Simulink, quantifie les effets des conditions opératoires (température/pression/débit) sur leur comportement

Abstract

The fuel cell is a device that generates electricity using a chemical reaction between hydrogen and oxygen, producing a continuous electric current, water, and heat generation. Nowadays, fuel cells have gained in popularity and are used in a very wide range of fields whether for power generation, and in the transport sectors.

This study aims to describe the working principle of a proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) Model and then analyze the behavior using the MATLAB/Simulink environment. The main objective is to understand the electrochemical phenomena that affect cell performance and evaluate the effect of key factors (such as temperature, pressure, and hydrogen flow rate) on electrical quantities such as voltage, current, power, and efficiency.

Introduction

Introduction

L'une des problématiques majeure de notre époque est de réduire l'empreinte carbonique et la protection d'environnement, la transformation énergétique vers les ressources renouvelables s'impose comme une solution inévitable. Au milieu de cette situation la pile à combustible se définit comme une technologie prometteuse, avantageuse par un fonctionnement silencieux, une efficacité énergétique élevée et le plus important basses émissions de composés polluants.

Les piles à combustible à membrane échangeuse de protons ont acquis une grande importance, en particulier dans les secteurs du transport et des dispositifs portables grâce à leur architecture simple et compacte, ainsi que leur potentiel d'intégration dans des systèmes hybrides avec les panneaux solaires et l'éolienne.

La performance des piles à combustible PEMFC est fortement influencée par des paramètres clés comme la température, le débit, la concentration du combustible et l'épaisseur de la membrane. Une optimisation de ces facteurs pourrait permettre d'obtenir une efficacité énergétique élevée tout en minimisant les pertes.

Ce mémoire offre une étude approfondie des phénomènes physiques qui interviennent dans les différentes composantes d'une pile PEMFC.

Chapitre I : Présentation générale des piles à combustible

I.1 Introduction :

A ce chapitre nous plongerons au cœur de ce système énergétique innovant : son principe de base, son mécanisme réactionnel, son architecture et les matériaux qui le composent. avec un accent particulier sur la technologie PEMFC.

I.2 Définition :

La pile à combustible est un générateur électrique transformant l'énergie chimique de l'hydrogène en électricité continue [2], Ce convertisseur d'énergie propre fonctionne comme un groupe électrogène silencieux, produisant un courant électrique utilisable , l'eau distillée comme effluent, plus la chaleur . [3]

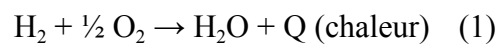
I.3 Pile à combustible de type PEM :

I.3.1 Principe de fonctionnement :

la pile à combustible PEM opère comme un convertisseur électrochimique , Son mécanisme repose sur trois processus clés [1,4] :

1. À l'interface anode/catalyseur, les molécules de H₂ subissent Oxydation avec libération d'électrons.
2. Transport sélectif : La membrane polymère conductrice protonique permet seulement la migration des H⁺ vers la cathode .
3. Synthèse moléculaire : En cathode, le triplet (O₂ + 4H⁺ + 4e⁻) s'associe via une réduction catalytique pour former l'eau (2H₂O)

L'architecture bipolaire crée ainsi un gradient électrochimique continu, transformant ~50-60% de l'enthalpie de réaction en travail électrique utile, le reste étant valorisable en chaleur. Selon la réaction globale :



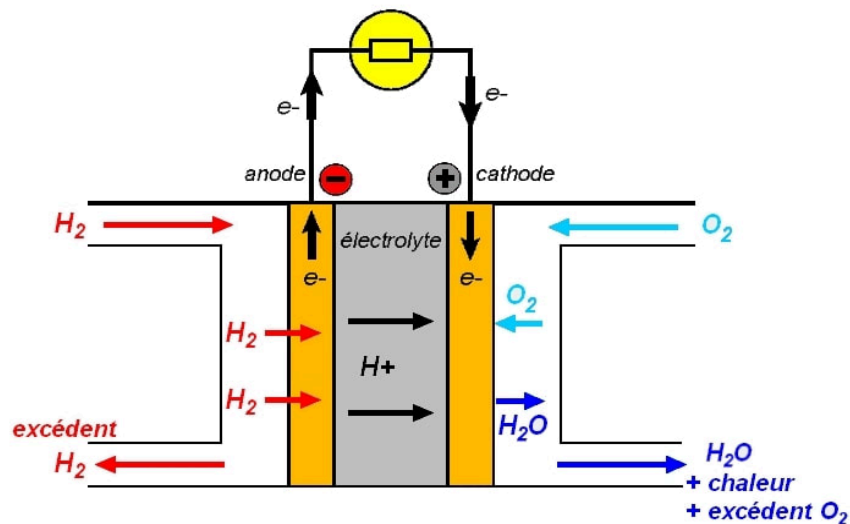


Figure I.1 : Schéma fonctionnel de la pile à combustible PEM [5]

I.3.2 Structure du stack PEM :

En conditions normales, une cellule élémentaire idéale présente une tension théorique à vide de 1,23 V. La tension d'un pile à vide m'avait déjà dit qu'elle est environ de 1 V en pratique. En pleine charge, elle tombe à 0,5-0,7 V. Pour obtenir une tension plus élevée, un certain nombre de cellules sont connectées en série. Actuellement, selon la source, des stacks de 100 à 120 cellules sont réalisés et offrent une tension nominale de 60 à 80 V. [3]

I.3.3 Les Composants d'une cellule PEM :

L'unité active d'une pile PEM présente une structure symétrique centrée sur la membrane échangeuse de protons. Elle est composée de l'assemblage membrane-électrodes (AME), encadré par deux GDL et des plaques de distribution des gaz. [4].

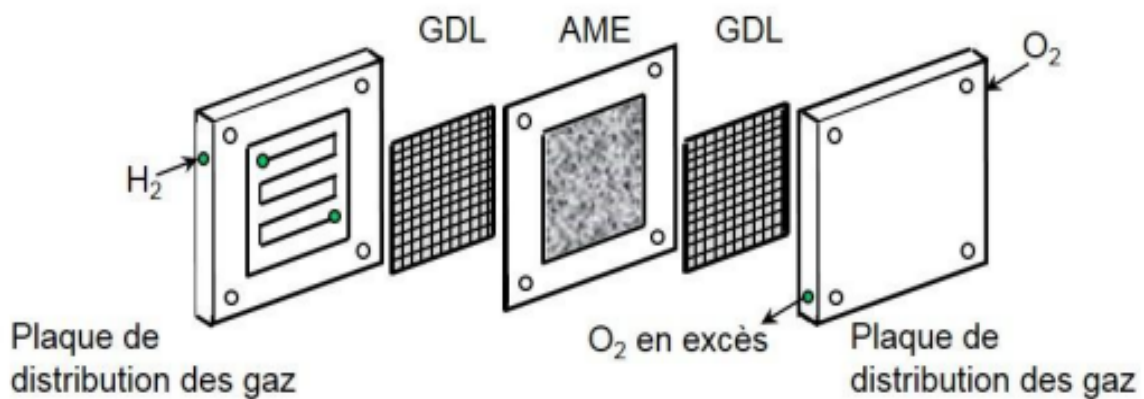


Figure I.2 : Les éléments constitutifs de la PEM [4]

I.3.4 Secteurs d'application des piles PEM :

Transport ferroviaire à hydrogène

En France, elle révolutionne le secteur ferroviaire avec ses trains à pile à combustible fabriqués par Alstom, l'institut CRRC Zhuzhou en Chine a fabriqué des tramways intelligents à hydrogène motorisés avec une autonomie "de plus de 200 km". Par ailleurs, le marché mondial du transport ferroviaire à l'hydrogène était estimé à 1,45 milliard de dollars en 2022 [6]

Propulsion maritime

Le secteur maritime a adopté la technologie des piles à combustible PEM grâce à des projets pionniers notables. Alsterwasser en Allemagne (2008) était le premier navire de passagers à propulsion électrique PEMFC, suivi par le Viking Lady en Norvège (2009) avec un système de 320 kW pour des applications offshore. Le navire French Energy Observer (2017) est une avancée en tant que premier navire autonome au monde qui génère son propre hydrogène, ouvrant la porte à de futures applications dans les navires de croisière et commerciaux. [6]

I.4 Conclusion :

Dans ce premier chapitre, les principes fondamentaux relatifs aux piles à combustible sont abordés, avec une attention particulière portée au type PEMFC. ou nous avons présenté leur fonctionnement, leur Structurée, et leur composants clés, l'on peut faire le constat que la pile à combustible apparaît comme une technologie d'avenir puisqu'elle est capable de répondre aux enjeux énergétiques actuels en produisant de l'électricité de manière propre et efficace

Chapitre II : Approche de la pile PEM par modélisation

II.1 Introduction :

Ce chapitre développe une approche analytique pour décrire le fonctionnement des PEMFC à travers un formalisme mathématique . vise à appréhender les phénomènes électrochimiques influençant le comportement de la pile à combustible PEMFC . En particulier, nous abordons l'équation de nernst de réaction chimique à l'intérieur de la pile , les différentes pertes qui limitent les performances .

II.2 Modèle électrique de la pile PEM

La différence de potentiel en circuit ouvert d'une pile à membrane échangeuse de protons est calculée à partir de la relation de Nernst, à laquelle se soustraient les chutes de potentiel dues aux pertes d'activation, ohmiques et de concentration [7].

$$E_{PAC} = E_{Nernst} - V_{act} - V_{ohm} - V_{con} \quad (3)$$

Où :

E_{Nernst} : Potentiel thermodynamique idéal de la cellule.

V_{act} : Surtension d'activation .

V_{ohm} : Chute ohmique .

V_{con} : chute de tension des pertes de concentration.

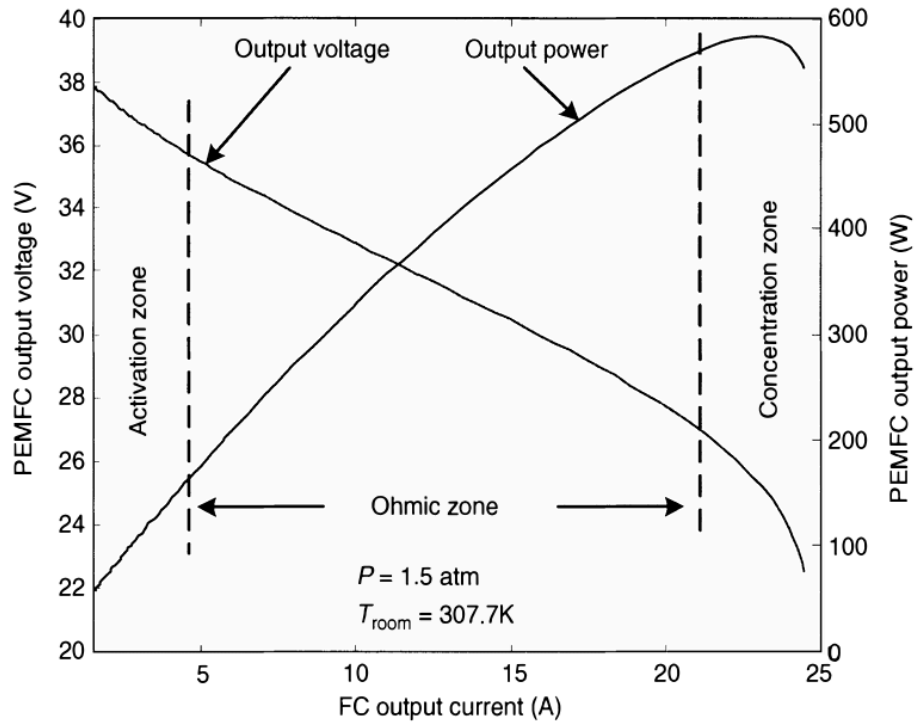


Figure.II.1 : Zones dynamiques et comportements croisés de la tension et puissance dans une PEMFC [7].

Le potentiel électrochimique réversible de la réaction globale est défini par l'équation suivant [7] :

$$E_{Nernst} = E_s + \frac{RT}{2F} \ln \left[P_{H_2}^* \cdot (P_{O_2}^*)^{0.5} \right] \quad (4)$$

Où E_s est la force électromotrice standard (FEM) :

$$E_s = E_0 + K_e(T - 298) \quad (5)$$

E_0 est le potentiel de référence standard à l'état standard (298 K et pression de 1 atm)

Où :

P : Pressions partielles aux électrodes

T : Temperature de fonctionnement

R : Constante des gaz parfaits

F : Constante Faraday

n : Nombre d'électrons transférés dans l'équation (ici n=2)

Après le remplacement numérique l'expression de l'équation de Nernst est donnée comme suit [7] :

$$E_{Nernst} = 1,229 + 0,85 \cdot 10^{-3}(T - 298) + 4,31 \cdot 10^{-5} \cdot \ln \left[P_{H_2}^* \cdot (P_{O_2}^*)^{0.5} \right] \quad (6)$$

II.2.1 Perte d'activation :

Avant d'atteindre leur état stable, les produits de réaction passent par un état intermédiaire, ce qui engendre une dissipation d'énergie sous forme de chaleur. Ces surtensions cinétiques, dépendantes de la densité de courant et de la température opérationnelle, obéissent à la relation paramétrique établie par J.C. Amphlett [8].

$$V_{act} = \xi_1 + \xi_2 \cdot T + \xi_3 \cdot T \cdot \ln(C_{O_2}) + \xi_4 \cdot T \cdot \ln(I_{FC}) \quad (7)$$

Où :

ξ_1, ξ_2, ξ_3 et ξ_4 : Coefficients spécifiques au modèle J.C. Amphlett

Selon la loi de Henry la concentration en dioxygène [8] :

$$C_{O_2} = \frac{P_{O_2}}{5,08 \cdot 10^6 \cdot e^{-\left(\frac{489}{T}\right)}} \quad (8)$$

II.2.2 Pertes ohmiques :

combine la résistance électronique des circuits (R_c), et la résistance ionique membranaire (R_m) [8] :

$$V_{ohmic} = I_{FC}(R_m + R_c) \quad (9)$$

Ou :

$$R_m = \frac{l}{A} \left[\frac{181,6 \left[1 + 0,03 \left(\frac{I_{FC}}{A} \right) + 0,062 \left(\frac{T}{303} \right)^2 \left(\frac{I_{FC}}{A} \right)^{2,5} \right]}{\left[\Psi - 0,634 - 3 \left(\frac{I_{FC}}{A} \right) \right] \exp \left[4,18 \left(\frac{T-303}{T} \right) \right]} \right] \cdot L + A \cdot R_c \quad (10)$$

Où :

l : l'épaisseur de la membrane (μm),

II.2.3 Chute liée à la concentration

Les régimes à haut courant, les limitations de transport massique et les phénomènes diffusionnels induisent des dissipations énergétiques importantes[8].

$$V_{con} = - B \left(1 - \frac{J}{J_{max}} \right) \quad (11)$$

J : densité du courant

J_{MAX} : la densité de courant maximum

B coefficient empirique intrinsèque à chaque pile . donné par une équation suivante [8] :

$$B = \frac{RT}{nF} \quad (12)$$

II.3 Phénomènes de double couche électrochimique :

L'électrode de la pile PEMFC est séparée par une membrane solide permettant uniquement le passage des protons d'hydrogène [7] . Les électrons se déplacent de l'anode vers la cathode en traversant le circuit externe, puis s'accumulent à la surface de la cathode, où ils sont attirés par les protons d'hydrogène. Des couches chargées de pôles opposés se forment ainsi à l'interface entre la cathode et l'anode . Ces couches peuvent servir à stocker de l'énergie électrique et possèdent donc un comportement de supercondensateur [7].

II.4 Approche dynamique pour la modélisation d'une pile PEM

Les modèles dynamiques sont également nécessaires pour prédire et évaluer leurs performances sous différentes conditions transitoires [7] .

II.4.1 Circuit équivalent électrique

Elle est généralement obtenu à l'aide des méthodes de spectroscopie d'impédance. Il est représenté dans la figure II.2

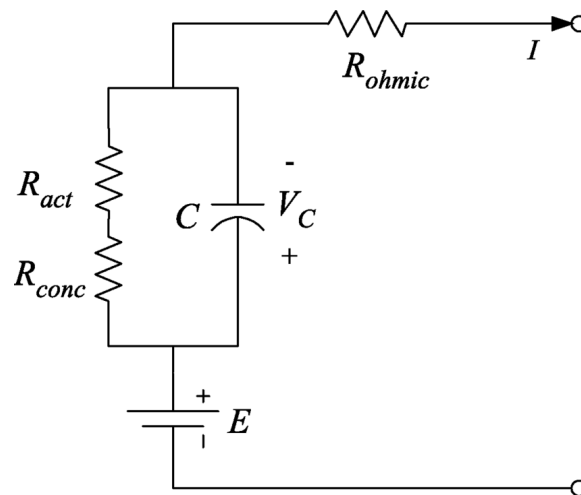


Figure II.2 : Représentation simplifiée du modèle électrique d'une pile PEMFC [7]

L'application des lois de maille permet d'établir que :

$$V_c = \left(I_{Fc} - C \frac{dv_c}{dt} \right) (R_{act} + R_{con}) \quad (13)$$

II.5. Conclusion :

La modélisation des piles PEMFC nous a permis d'établir un modèle mathématique complet caractérisant leur comportement électrochimique. Trois grandes sources de pertes (activation, ohmiques, concentration) ont été quantifiées pour modéliser l'impact sur la tension de sortie et l'effet de double couche électrochimique a été intégré dans le modèle pour représenter le comportement dynamique de la pile .

***Chapitre III : Analyse du comportement de
la pile à combustible PEM***

III.1 Introduction

Dans cette partie nous allons analyser le comportement de la pile à combustible PEM, pour cela nous utilisons un modèle développé sous MATLAB/Simulink. afin d'analyser l'impact des paramètres opératoires critiques sur les performances électriques .

III.2 Donnée techniques de la pile PEM étude

Les paramètres de fonctionnement de la pile utilisés dans notre étude sont résumés dans le tableaux suivant :

Paramètre	Valeur
Puissance nominale	5998.5 W
Tension de Nernst d'une cellule [En]	1.1288 V
Utilisation d'Hydrogène (H ₂)	99.56 %
Utilisation d'Oxydant (O ₂)	59.3 %
Consommation de Carburant (H ₂)	61 lpm
Consommation d' Air	144 lpm
Courant d'échange [i ₀]	0.29197 A
Coefficient d'échange [α]	0.60645
Composition du carburant [x_H ₂]	99.95 %
Composition de l'oxydant [y_O ₂]	21 %
Débit de carburant (H ₂) Nominal	50.06 lpm
Débit de carburant (H ₂) Maximum	84.5 lpm
Débit d'air (O ₂) Nominal	300 lpm
Débit d'air (O ₂) Maximum	506.4 lpm
Température du système [T]	338 K
Pression du carburant [P _{fuel}]	1.5 bar
Pression de l'air [P _{air}]	1 bar

tableaux III.1: Les paramètres de la pile 6 kW et 45 Vdc

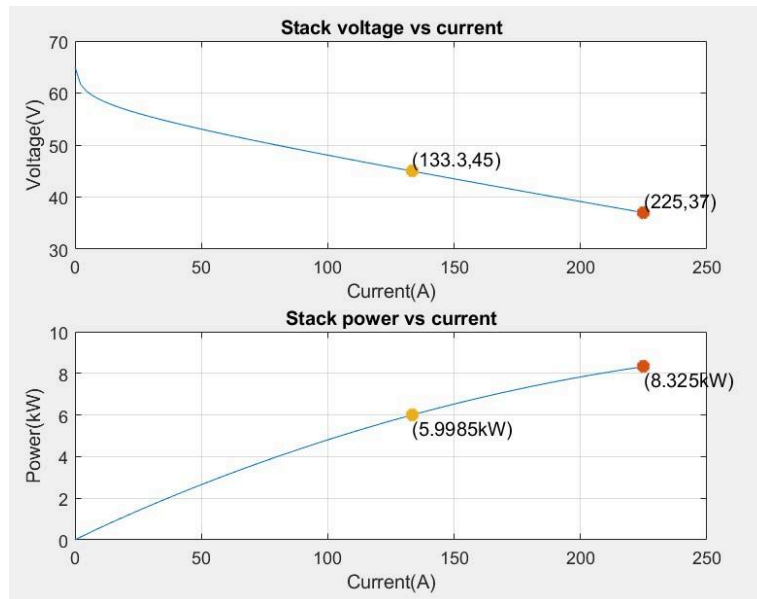


Figure III.1 : Comportement polarisation-puissance de la pile étudiée

III.3 Influence des conditions opératoires sur la pile PEM

III.3.1 L'influence de température

La méthodologie adoptée consiste à faire varier progressivement la température , et les autres variables maintiennent constant .

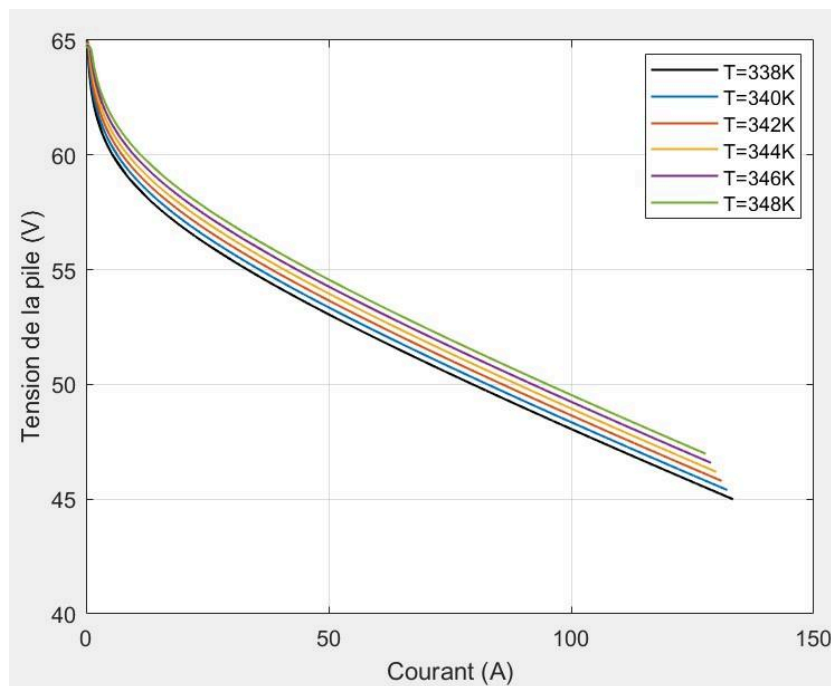


Figure III.2 : Tension de la pile selon la température

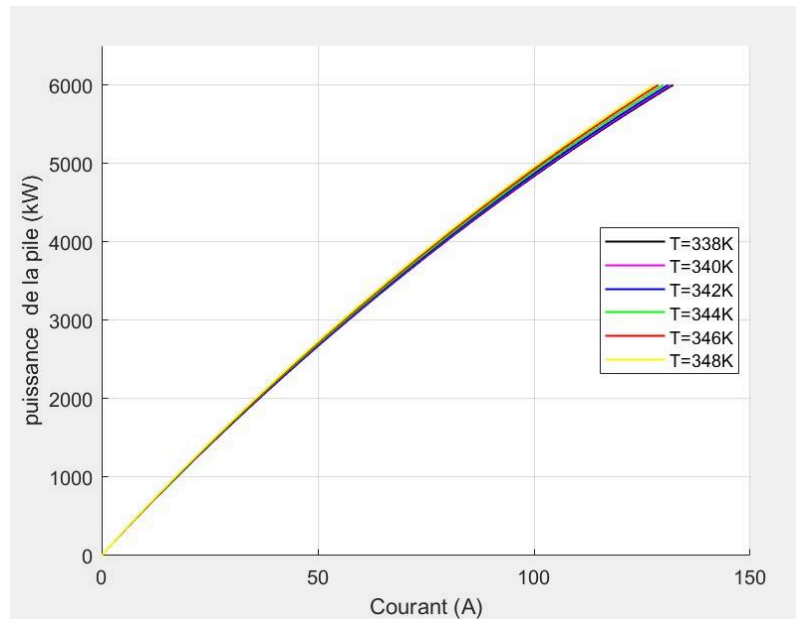


Figure III.3 : la puissance utile selon différente température

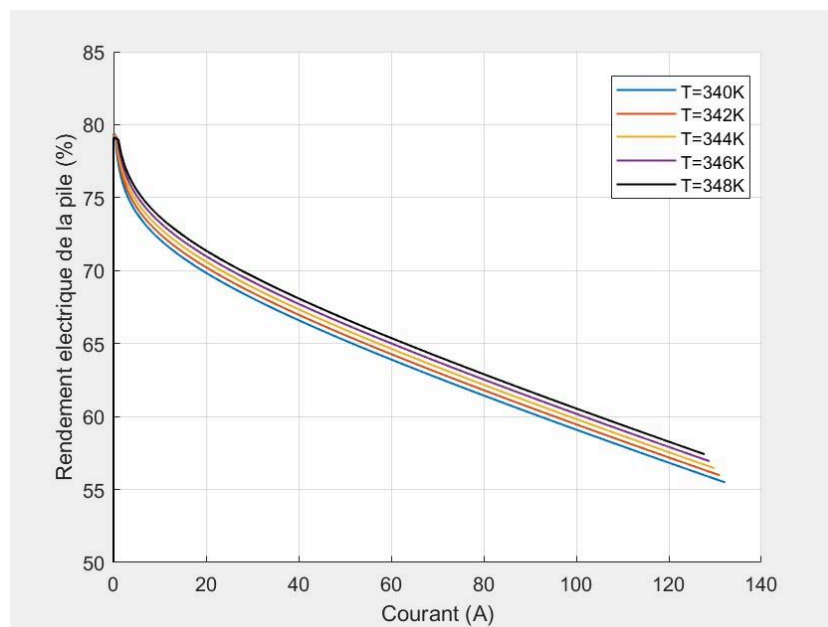


Figure III.4 : le rendement selon la température de fonctionnement

L'analyse comparative des figures (III.2) à (III.4) confirme une corrélation positive significative entre l'élévation thermique et l'amélioration des performances électrochimiques de la pile à combustible PEM. Cette amélioration s'explique par la diminution des pertes par activation à des températures plus élevées, ce qui favorise la cinétique des réactions électrochimiques. De plus, la baisse des résistances internes contribue à un ensemble d'effets positifs, une hausse notable de la tension générée par la cellule, une augmentation du courant associé à la puissance fournie et un meilleur rendement global de conversion de l'énergie.

III.3.2 l'influence de pression

La pression a été modifiée dans une plage allant de 1 à 3,5 bars, par incréments de 0,5 bar, tandis que les autres paramètres de fonctionnement ont été maintenus constants.

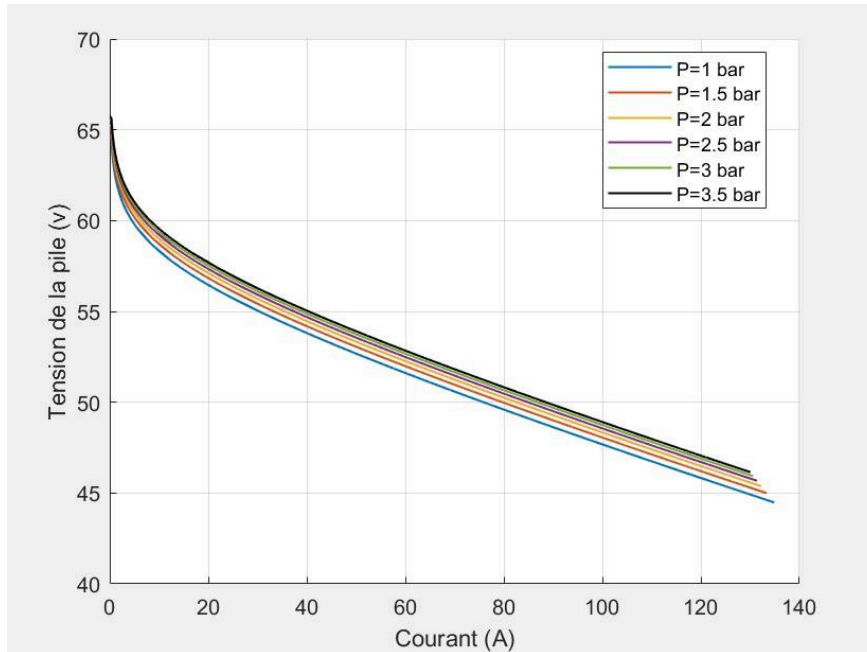


Figure III.5: Tension selon les conditions de pression

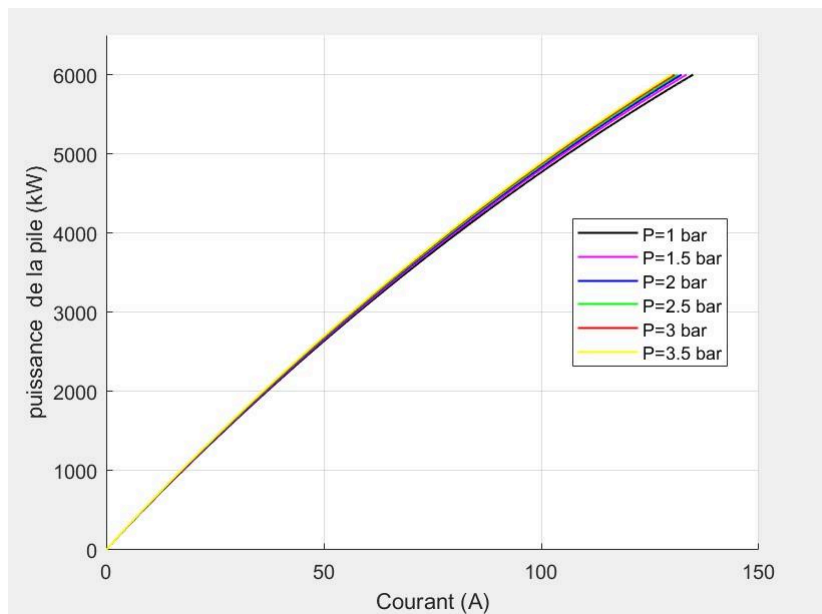


Figure III.6 : la puissance utile selon différente pression

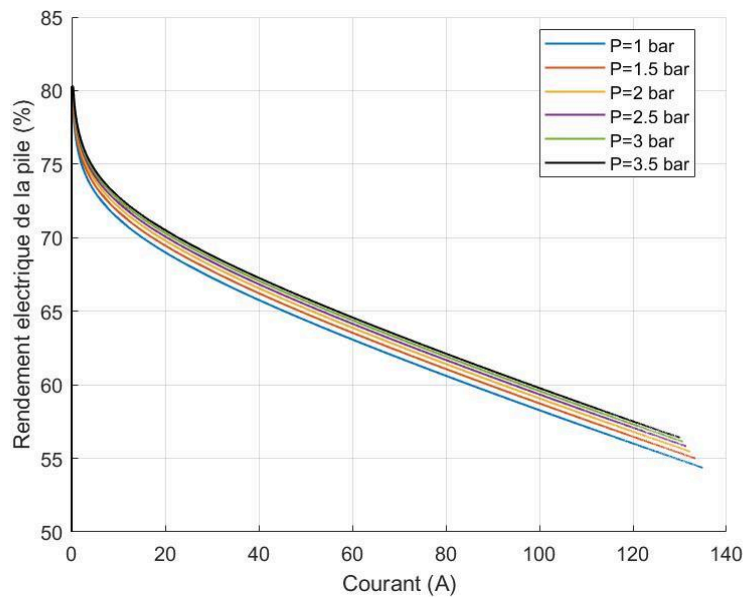


Figure III.7 : Rendement selon différent pression

L'étude comparative des figures III.5, III.6 et III.7 montre qu'une augmentation des pressions de fonctionnement, tant du côté anodique que cathodique, exerce une influence positive marquée sur les performances globales .

Ces résultats sont obtenus par un effet synergique : En augmentant la pression du côté de l'anode, il est possible d'accélérer la dissociation de l'hydrogène et donc de générer plus de protons. En parallèle, en augmentant la pression du côté de cathode contribue à maintenir un bon niveau d'hydratation de la membrane, ce qui renforce sa conductivité ionique.

De pair, ces deux effets permettent de réduire les résistances ohmiques et d'améliorer le transport des protons à travers la membrane, ce qui se traduit par une hausse de la tension de sortie et, par conséquent, une puissance électrique supérieure à consommation équivalente.

III.4 La suralimentation en hydrogène

La Simulation a été réalisée sur un modèle MATLAB/Simulink d'une pile à combustible PEM . La charge est monophasée de type RL avec une résistance de $1,67 \Omega$ et une inductance de $1,67 \text{ H}$. Cette simulation vise à évaluer le comportement dynamique de la pile en termes courant, tension, consommation d'hydrogène et rendement et le comportement dynamique du système après le convertisseur boost.

Au cours des 10 premières secondes de la simulation, l'alimentation en combustible (hydrogène) est maintenue constante. Après cet intervalle, une augmentation de l'injection de combustible jusqu'à une valeur maximale de 85 litres par minute.

Cette augmentation de débit simule le phénomène de l'excès en hydrogène.

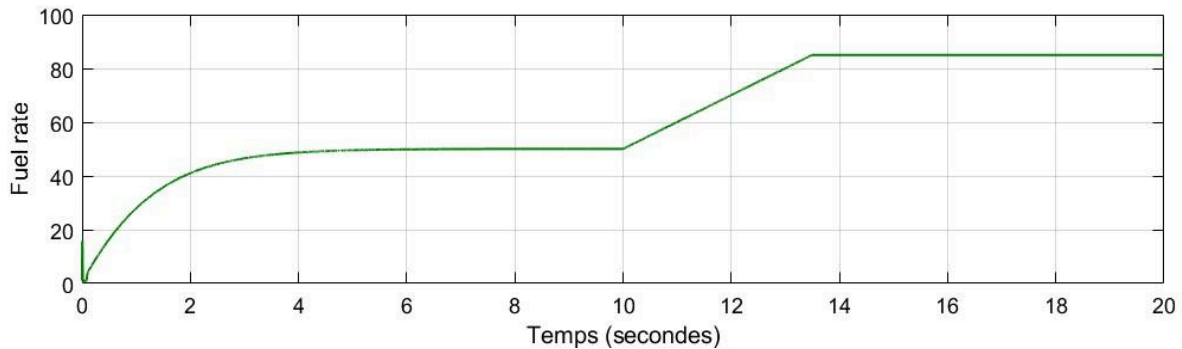


Figure III.8 : Variation de débit de carburant (H₂)

III.4.1 Effet du débit d'hydrogène sur la tension et le courant de sortie

Pendant les premières 10 secondes, le débit de H₂ est constant, ce qui assure une tension stable et un courant de sortie relativement élevé.

Lorsque l'alimentation en hydrogène est augmentée à 85 lpm, on observe une hausse de la tension de sortie de la pile. Cette amélioration s'explique par l'élévation de la tension de Nernst, directement influencée par la pression partielle de l'hydrogène. s'accompagne d'une baisse progressive du courant.

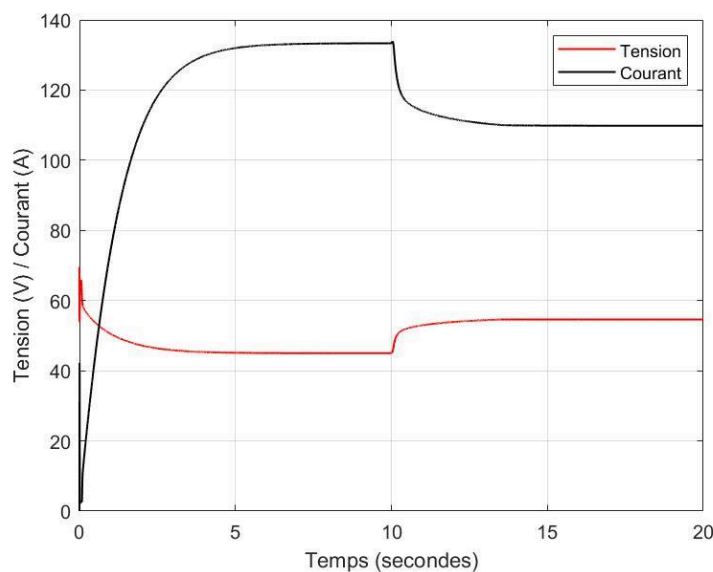


Figure III.9: Evolution simultanée du courant et de la tension

III.4.2 L'usage de combustible

$$Utilisation H_2 (\%) = \frac{H_2 \text{ consommé}}{H_2 \text{ injecté}} \times 100$$

C'est un indicateur de l'efficacité d'utilisation du combustible : plus ce pourcentage est élevé, plus l'hydrogène injecté est bien utilisé.

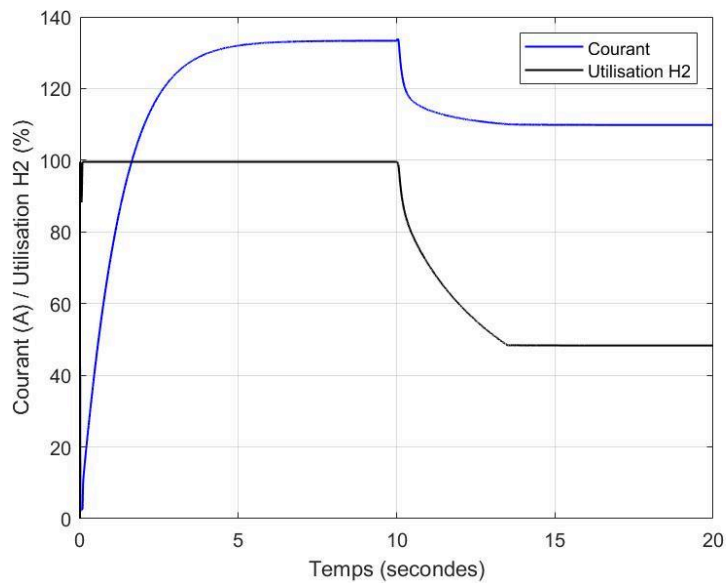


Figure III.10 :Évolution de courant de pile et l'utilisation d'hydrogène en fonction du temps

Durant les 10 premières secondes, le débit de H₂ est constant et bien ajusté à la charge la pile fournit un courant élevé, et l'hydrogène injecté est largement consommé, ce qui se traduit par une utilisation du H₂ élevée (~95–100%)

Après 10 s : Le débit d'hydrogène augmente progressivement jusqu'à 85 L/min (voir Fig. III.8), mais l'utilisation de H₂ (%) diminue, cette augmentation du débit entraîne une suralimentation en hydrogène (le H₂ injecté dépasse largement la quantité réellement consommée) ce qui entraîne une augmentation de la tension et une diminution du courant délivré (voir Fig. III.9)

étant donné que le courant imposé par la charge détermine directement la quantité d'hydrogène consommée, la diminution du courant après la suralimentation entraîne une réduction de la consommation effective de H₂ ce qui explique la baisse du taux d'utilisation de l'hydrogène

Pour une efficacité maximale, le débit de H₂ injecté doit être ajusté dynamiquement à cette consommation

III.4.3 impact du débit d'hydrogène sur le rendement énergétique de la pile

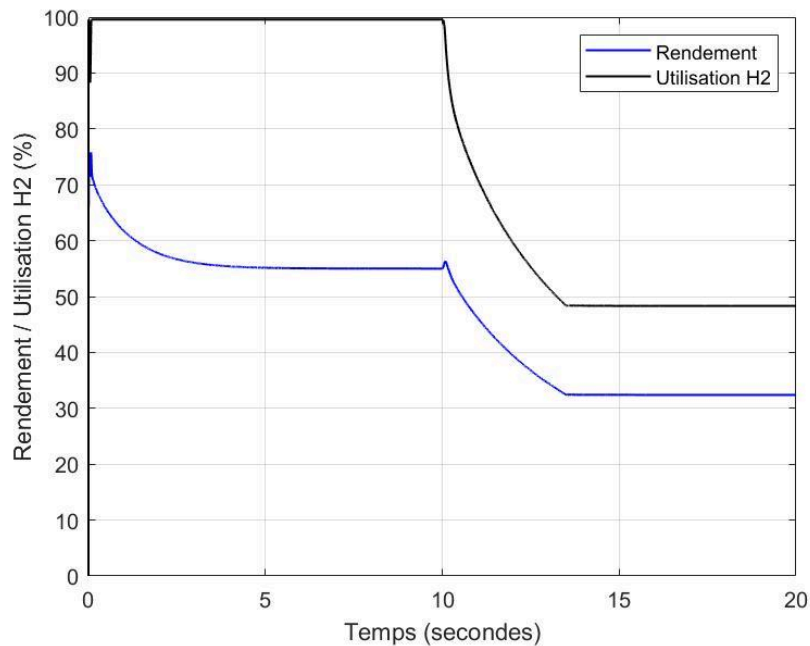


Figure III.11 : Variation du rendement et du taux d'utilisation de l'hydrogène

Durant les 10 premières secondes Le rendement décline de manière progressive de 75% à 55% grâce au perte d'activation avec utilisation presque de 100% d'H2, ce qui indique que tout l'hydrogène injecté est effectivement consommé dans la réaction électrochimique.

Après 10 secondes, il y a une transition brutale vers un rendement de 32% et une consommation d'hydrogène à 49%, donc la Suralimentation d'hydrogène réduit à la fois l'efficacité d'utilisation du combustible et le rendement global du système soulignant l'importance d'un ajustement dynamique du débit d'hydrogène en fonction de la demande réelle.

III.4.4 Réponse en tension et en courant après le convertisseur Boost

La pile à combustible donne une tension de sortie très basse, il faut un hacheur boost pour obtenir un tension plus élevée, voir la Fig.4. Au début de la simulation, il y a un pic de 122 volts, puis stabilisé à 100 v. Après 10 secondes, l'alimentation en combustible est augmentée, entraînant une élévation en tension qui rapidement stabilisée en fraction de seconde, ce qui confirme son efficacité

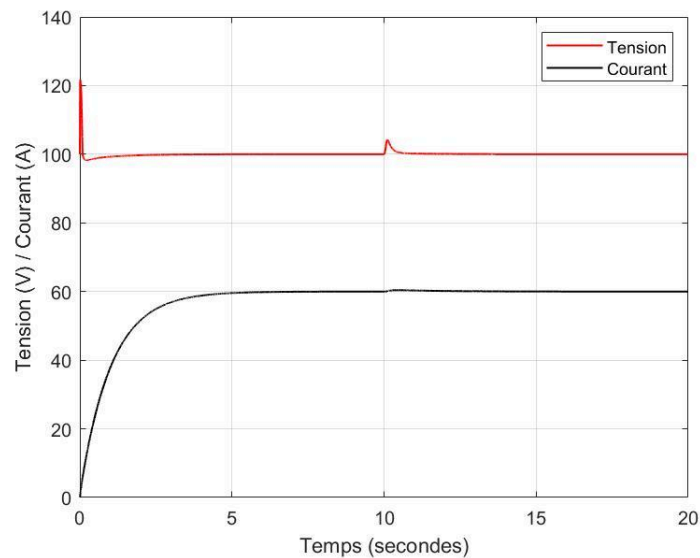


Figure III.12 :Évolution de courant et de tension en aval du hacheur Boost

III.5 Conclusion

Les résultats obtenus démontrent qu' il y a un lien direct entre l'augmentation de la température et de la pression et l'amélioration des performances électriques. d'autre par, un excès d'hydrogène no ajuste a la de demande de la charge entraîne à une utilisation inefficace du carburant, ce qui se traduit par une réduction du taux d'utilisation et une baisse du rendement global

Enfin, l'utilisation d'un convertisseur boost assure une tension stable en sortie. Pour que le fonctionnement soit optimal, il faut ajuster le débit de H2 de manière dynamique en fonction de la demande en courant.

Conclusion final

Conclusion finale

Cette mémoire nous a offert l'opportunité d'approfondir notre compréhension du principe de fonctionnement et des particularités techniques des piles à combustible . ou nous avons commencé par leur principe de fonctionnement, leurs principales constituants, ainsi que les différents types existants selon la nature de l'électrolyte utilisé, l'étude portera principalement sur les piles PEMFC

Ensuite , nous avons également formulé un modèle de la pile dépend de la pression, de la température et des pertes internes.

A la fin, nous avons simulé le modèle pile pemfc de 6 kw à l'aide de MATLAB\SIMULINK , ou nous avons analysé comment la température, la pression et le débit d'hydrogène influencent les performances électriques. Un étude de suralimentation en hydrogène a mis en évidence l'importance du contrôle dynamique pour améliorer l'efficacité et la consommation. Cette recherche souligne le potentiel des PEMFC en tant que source d'énergie propre et établit une plateforme solide pour optimiser les futurs systèmes hybrides et les intégrer dans les réseaux intelligents.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] BARBIR, Frano. *PEM Fuel Cells: Theory and Practice*. Amsterdam : Elsevier Academic Press, 2005
- [2] BUSQUET, Séverine. Étude d'un système autonome de production d'énergie couplant un champ photovoltaïque, un électrolyseur et une pile à combustible : réalisation d'un banc d'essai et modélisation. Thèse de doctorat : Énergétique. Paris : École des Mines de Paris, 2003.
- [3] SADLI, Idris. Modélisation par impédance d'une pile à combustible PEM pour utilisation en électronique de puissance. Thèse de doctorat : Génie Électrique. Nancy : Institut National Polytechnique de Lorraine, 2006
- [4] Franck-Lacaze, Ludivine, Bonnet, Caroline, et Lapique, François. 2016. *Les membranes pour piles à combustible PEMFC*. Techniques de l'Ingénieur. Disponible sur : <https://hal.science/hal-03202217>
- [5] Autoencyclopédie. *Pile à Combustible* [en ligne]. [s.d.]. [Consulté le 19 juin 2025]. Disponible à l'adresse : <https://www.autoencyclopedie.com/pile-a-combustible.html>
- [6] TMNetch. *Applications pratiques des piles à combustible à membrane échangeuse de protons* [en ligne]. 9 janvier 2024. Disponible sur : <https://tmnetch.com/fr/applications-pratiques-des-piles-a-combustible-a-membrane-echangeuse-de-protons/>
- [7] NEHRIR, M. Hashem et WANG, Caisheng. *Modeling and control of fuel cells: distributed generation applications*. Hoboken, New Jersey : Wiley-IEEE Press, 2009. ISBN 978-0-470-23328-3.
- [8] J.M.CORRÊA, F.A.FARRET, V.A.POPOV, and M. Godoy.SIMÕES, Sensitivity analysis of the modeling parameters used in simulation of proton exchange membrane fuel cells. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2005, vol. 20, no. 1, pp. 211–218. DOI: [10.1109/TEC.2004.842382](https://doi.org/10.1109/TEC.2004.842382).