



وزارة البحث العلمي والتعليم العالي
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE
LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
جامعة عبد الحميد بن باديس مستغانم
Université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem
كلية العلوم والتكنولوجيا
Faculté des Sciences et de la Technologie
DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE



N° d'ordre : M...../GE/2022

MEMOIRE

Présenté pour obtenir le diplôme de

Filière : MASTER EN GENIE ELECTRIQUE

Spécialité : Energies renouvelables en électrotechnique

Par

Hamidi Rachida

Hadj Belkacem Chaima Nor El Houda

**Etude et dimensionnement d'un système de stockage à pile à
combustible dans une habitation**

Soutenu le 07 /07/ 2022 devant le jury composé de :

Président :	Mr H.Omari	MCB	Université de Mostaganem.
Examineur :	Mr M.Bendaha	MAA	Université de Mostaganem
Rapporteur :	Mme H.Neddar	MCA	Université de Mostaganem

Année Universitaire 2021/2022

Résumé

Le développement de nouveaux convertisseurs d'énergie, plus efficaces et libérant moins de substances toxiques, tels que la pile à combustible, tend à s'accélérer. Leur diffusion à grande échelle suppose cependant des garanties vis-à-vis de la sécurité et l'environnement.

Ce mémoire traite un type de production d'énergie électrique par un vecteur énergétique l'hydrogène, et plus précisément la pile à combustible. Le fonctionnement de la pile, ses caractéristiques et les technologies qui s'y réfèrent sont étudiés. Ce travail est consacré à un dimensionnement d'un chalet alimenté principalement par une pile à combustible à membrane échangeuse de protons (PEMFC) dans la région de Tikjda à Bouïra et sa modélisation. Ce type de pile à combustible est utilisé dans plusieurs domaines comme le transport, système embarqué et le stationnaire. Le mécanisme de fonctionnement de cette pile est très intéressant : elle convertit l'énergie chimique en énergie électrique selon les réactions d'oxydo-réductions, avec un dégagement d'eau et de chaleur. Nous avons calculé dans le dimensionnement les besoins en électricité, les besoins en eau et les besoins thermiques de notre chalet, à travers ces calculs, nous avons choisi la technologie PEM vitovalor pt2 qui répond à nos besoins de ce chalet. La modélisation et la simulation sur MATLAB SIMULINK nous a permis de comprendre les caractéristiques de polarisation et de puissance et l'influence des paramètres sur le fonctionnement de la pile.

Mot clé : pile à combustible ; hydrogène ; oxygène ; Habitat ; cogénération.

Abstract

The development of new energy converters, more efficient and releasing less toxic substances, such as the fuel cell, tends to accelerate. Their large-scale distribution, however, presupposes guarantees with respect to safety and the environment.

This dissertation deals with a type of electrical energy production by an energy carrier hydrogen and more precisely the fuel cell. The functioning of the battery, its characteristics and the technologies, which refer to it, are studied. This work is devoted to the sizing of a chalet powered mainly by a proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) in the region of Tikjda in Bouïra and its modeling. This type of fuel cell is used in several fields such as transport, on-board systems and stationary. The operating mechanism of this battery is very interesting: it converts chemical energy into electrical energy according to oxidation-

reduction reactions, with a release of water and heat. We calculated in the dimensioning the electricity needs, the water needs and the thermal needs of our chalet, through these calculations, we chose the PEM vitovvalor pt2 technology, which meets our needs for this chalet. Modeling and simulation on MATLAB SIMULINK allowed us to understand the polarization and power characteristics and the influence of the parameters on the operation of the cell.

Key word: fuel cell; hydrogen; oxygen; dwelling; cogeneration.

ملخص

يميل تطوير محولات طاقة جديدة، أكثر كفاءة وإطلاق مواد أقل سمية، مثل خلية الوقود، إلى التسارع. ومع ذلك، فإن توزيعها على نطاق واسع يفترض ضمانات فيما يتعلق بالسلامة والبيئة.

تتناول هذه الرسالة نوعًا من إنتاج الطاقة الكهربائية بواسطة الهيدروجين الناقل للطاقة، وبشكل أكثر دقة خلية الوقود. يتم دراسة أداء البطارية، خصائصها والتقنيات التي تشير إليها. هذا العمل مخصص لتحجيم شاليه يعمل بشكل أساسي بخلية وقود غشائية لتبادل البروتونات (PEMFC) في منطقة تكجدة في البويرة ونمذجتها. يستخدم هذا النوع من خلايا الوقود في العديد من المجالات مثل النقل والأنظمة الموجودة على متن الطائرة والثابتة. تعتبر آلية تشغيل هذه البطارية مثيرة جدًا للاهتمام: فهي تحول الطاقة الكيميائية إلى طاقة كهربائية وفقًا لتفاعلات تقليل الأكسدة، مع إطلاق الماء والحرارة. حسبنا بأبعاد احتياجات الكهرباء واحتياجات المياه والاحتياجات الحرارية لشاليهنا، من خلال هذه الحسابات، اخترنا تقنية PEM vitovvalor pt2 التي تلبى احتياجاتنا لهذا الشاليه. سمحت لنا النمذجة والمحاكاة على MATLAB SIMULINK بفهم خصائص الاستقطاب والطاقة وتأثير المعلمات على تشغيل الخلية.

الكلمات الرئيسية: خلية الوقود؛ هيدروجين؛ الأكسجين؛ مسكن التوليد؛ المشترك للطاقة.

Dédicaces

Tout d'abord, nous remercions Allah pour toutes ses bénédictions et la grâce de la réussite.

A nos parents

Nous tenons à dédier ce travail à nos parents qui ont contribué par tous les moyens disponibles pour notre réussite. Ils ont consenti beaucoup de sacrifices afin de nous voir grandir et ont veillé à réussir dans notre vie. Aujourd'hui, à notre tour de les remercier en leur dédiant ce modeste travail qui est le fruit de leurs sacrifices. Nous leur souhaitons prospérité et parfaite santé

A nos frères et sœurs

Nous apprécions beaucoup l'affection que vous nous apportez chaque jour. A cette occasion, nous vous manifestons notre meilleur sentiment en vous dédiant le fruit de notre travail

A nos amis

Nos dédicaces s'adressent également à tous nos amis(e), à tous ceux qui nous connaissent, et à tous les étudiants de notre promotion.

Et à tous ceux que nous connaissons de près ou de loin.

Remerciements

Nous remercions Dieu de nous avoir accordé des connaissances de la science
et de nous avoir aidés à réaliser ce travail.

C'est avec un grand plaisir que nous adressons nos sincères remerciements à
notre professeur Madame NEDDAR Houaria pour nous avoir encadré
et à exprimer notre gratitude pour sa disponibilité et ses conseils.

Nos vifs remerciements à notre encadrant du stage Monsieur BENYAHIA
Mohamed pour son accueil, son bon déroulement
et sa disponibilité à rendre le service.

Sans oublier de remercier Monsieur BESTANI professeur au département de
Génie de procédé pour nous aider et nous apporter
des solutions des conseils précieux.

Nos remerciements vont également à tous les enseignants qui ont contribué à
notre formation ainsi qu'à tout le personnel
du département de Génie Electrique.

Nous tenons ensuite à remercier tous ceux et toutes celles qui nous ont
apporté l'aide de près et de loin.

Que Monsieur le Président et les membres du jury trouvent ici l'expression de
notre gratitude et notre respect pour nous avoir fait l'honneur d'examiner
ce modeste travail.

Enfin, nous tenons à remercier nos familles pour leur soutien
et leurs encouragements.

SOMMAIRE

Résumé et Abstract	I
Remerciements.....	II
Nomenclature.....	VII
List des figures.....	X
Liste des tableaux.....	XI

Introduction générale.....	1
----------------------------	---

CHAPITRE I: Recherche bibliographique sur la pile à combustible

I.1 Introduction.....	5
I.2 Historique	5
I.3 Principe de fonctionnement :	6
I.4 Constitution de la pile à combustible	9
I.4.1 Les électrodes :	9
I.4.2 L'électrolyte.....	10
I.4.3 Les plaques bipolaires :.....	10
I.5 Alimentation de la PAC.....	11
I.5.1. Circuit d'alimentation en hydrogène :.....	11
I.5.1.1 La production à partir d'énergies fossiles (l'hydrogène gris) :.....	12
a. Le vaporeformage du gaz naturel	12
b. La production d'électrolyse.....	12
I.5.1.2 La production d'hydrogène à partir d'énergies renouvelables	13
a. Le biogaz.....	13
b. La biomasse.....	13
I.5.1.3 Le stockage de l'hydrogène.....	13
a. Stockage de gaz dans un réservoir	13
b. Liquéfaction d'hydrogène	14
c. Stockage d'hydrogène à basse pression	14
I.5.2 Circuit d'alimentation en oxygène (provenant de l'air).....	14
I.6 Système de contrôle.....	14
I.7 Circuit de refroidissement.....	15
I.8 Circuit d'humidification.....	15
I.9 Convertisseurs statiques.....	15
I.10 Dimensionnement d'un stack.....	16
I.11 Différents types de la pile à combustible.....	17

I.11.1 Les piles alcalines (AFC, alkaline fuel cells)	19
I.11.2 La pile à combustible à acide phosphorique PAFC (Phosphoric Acid Fuel Cell)	20
I.11.3 La pile à combustible à carbonates fondus MCFC (Molten Carbonate Fuel Cell)	20
I.11.4 La pile à combustible à oxyde solide SOFC (Solid oxide fuel cells).....	21
I.11.5 Les piles au méthanol direct (DMFC Direct Methanol Fuel Cell).....	22
I.11.6 La pile à combustible à membrane échangeuse de protons PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cell)	23
I.12 Les applications des piles à combustibles	24
I.12.1 Applications portables	24
I.12.2 Applications embarquées	24
I.12.3 Applications stationnaires	25
I.13 L'objectif de notre travail	27
I.14 Conclusion	27

CHAPITRE II : Dimensionnement de la pile PEMFC

II.1 Introduction	29
II.2 Caractéristiques électrique des piles à combustible	29
II.2.1 Rendement énergétique	29
II.2.2 Densité de courant.....	31
II.2.3 Tension réelle :	31
II.2.4 Nécessite une zone de température spécifique pour un fonctionnement constant	33
II.2.5 La pression	33
II.2.6 Les débits des gaz	33
II.2.7 Humidité relative des gaz	34
II.3 la cogénération	34
II.3.1 Échelle de puissance pour cogénération	35
II.4 Micro-cogénération	36
II.4.1 Micro-cogénération avec pile à combustible.....	36
II.5 Principe de fonctionnement du système PAC dans le chalet.....	37
II.6 Choix du site.....	38
II.7 Besoins journalier du chalet	38
II.7.1 Besoins en électricité.....	39
II.7.2 Besoin en eau	40

II.8 Besoins thermique	40
II.9 Choix de la technologie.....	44
II.9.1 Principe de fonctionnement de PEM Vitovalor PT2.....	44
II.9.2 Caractéristiques de pile à combustible vitovalor Pt2.....	45
II.9.3 Couvrir les besoins d'un foyer (chalet)	46
II.9.4 La production simultanée de l'électricité et de la chaleur.....	46
II.9.5 La construction de la pile à combustible Vitovalor PT2	46
II.9.6 Commande à distance.....	48
II.10 Besoin en hydrogène.....	49
II.11 Besoin en CH4	50

CHAPITRE III: Modélisation et simulation de la pile PEMFC

II.12 Conclusion	51
III.1 Introduction.....	53
III.2Caractéristique tension - courant d'une PAC	53
III.3 La modélisation de la pile à combustible	56
III.3.1 Modèle mathématique	56
III.3.1.1 Le modèle simple	58
III.3.1.2 Modèle détaillé	58
III.4 Paramètres de la fiche technique :	63
III.5 Modèle Simulink de pile à combustible PEM.....	65
III.6 Résultats de la simulation du système à pile à combustible	67
III.7 Caractéristique courant-tension et courbe de puissance.....	68
III.8 Conclusion	72
Conclusion générale et perspective	73
Référence et bibliographie.....	76

Annexes

Liste des Figures

Figure I.1 : Piles à combustible de Sir William Grove.....	6
Figure I.2 : Schéma de principe de conversion directe en électricité.	7
Figure I.3 : Principe de fonctionnement simplifié des PAC.....	7
Figure I.4 : Schéma d'une zone active de cellule de pile à combustible H_2/O_2	8
Figure I.5 : Catalyseur du côté cathode.....	9
Figure I.6 : Vue éclatée et assemblée d'une pile à combustible.....	11
Figure I.7 : Schéma de production d'hydrogène vert (électrolyse).....	12
Figure I.8 : Schéma de principe d'un système pile à combustible alimenté en hydrogène pur sous pression.....	16
Figure I.9 : Classification des piles à combustibles selon la puissance et le rendement Electrique	18
Figure I.10 : Principe de la pile à combustible alcaline.....	19
Figure I.11 : Principe de la pile à combustible à acide phosphorique.....	20
Figure I.12 : Principe de la pile à combustible MCFC.....	21
Figure I.13 : Principe de la pile à combustible SOFC.....	22
Figure I.14 : Principe de la pile à combustible DMFC.....	23
Figure I.15 : Schéma du principe de fonctionnement d'une pile à combustible PEMFC.....	23
Figure I.16 : Ordinateur portable avec une pile à combustible.....	24
Figure I.17 : L'utilisation de la pile à combustible aux transports.....	25
Figure I.18 : Exemple Pile MCFC 250 kW baptisée CELLIA et mise en place par Dalkdans unHLM à Paris.....	25
Figure II.1 : Rendement en fonction de la densité de courant d'une PAC, générique.....	31
Figure II.2 : Puissance en fonction de la densité de courant d'une PAC, générique.....	31
Figure II.3 : Equivalent électrique d'une pile à combustible.....	32
Figure II.4 : Influence de la polarisation sur la tension.....	32

Figure II.5 : Principe de fonctionnement de la cogénération.....	35
Figure II.6 : Principe de la cogénération.....	35
Figure II.7 : Utilisation de la micro-cogénération l'échelle d'une maison individuelle.....	36
Figure II.8 : Schéma qui explique le principe de fonctionnement de micro-cogénération à pile à combustible.....	36
Figure II.9 : Schéma synoptique d'alimentation en cogénération d'un chalet via PEMFC.....	38
Figure II.10 : La carte géographique de tikjda à wilaya de bouira.....	38
Figure II.11 : Le plan du chalet.....	39
Figure II.12 : Simulateur de bilan thermique.....	44
Figure II.13 : Principe de fonctionnement de Vitovalor PT2.....	45
Figure II.14 : Vitovalor PT2 en maison individuelle.....	48
Figure II.15 : Vue du système.....	48
Figure II.16 : Commande à distance du chauffage par pile à combustible par App.....	49
Figure II.17 : Dessin en coupe Vitovalor PT2.....	49
Figure III.1 : Exemple de courbe de polarisation.....	57
Figure III.2 : Modèle électrochimique simplifié de pile à combustible PEM.....	58
Figure III.3 : Circuit équivalent de pile à combustible.....	59
Figure III.4 : Modèle simplifié de pile à combustible.....	61
Figure III.5 : La réponse de la pile à combustible.....	64
Figure III.6 : La courbe de polarisation de la pile à combustible PEMFC.....	66
Figure III.7 : Modèle Simulink de pile à combustible PEM.....	67
Figure III.8 : Schéma bloc 1 sélecteur de débit dans MATLAB SIMULINK.....	67
Figure III.9 : Schéma bloc 2 régulateur de débit dans MATLAB SIMILUNK.....	67
Figure III.10 : Schéma bloc 3 du cycle de service.....	68

Figure III.11 : Courbe de polarisation de la pile à combustible.....	69
Figure III.12 : Tension et courant de pile à combustible.....	70
Figure III.13 : Variation de tension et courant pour convertisseur élévateur DC/DC (Boost) en fonction de temps.....	70
Figure III.14 : Utilisation de l'hydrogène et de l'oxygène.....	71
Figure III.15 : Consommation de la pile de combustible pour l'air et le combustible.....	72
Figure III.16 : Rendement de pile à combustible.....	72

Liste des Tableaux

Tableau I.1 : Les différents types de pile à combustible.....	17
Tableau II.1 : Exemple de besoins en électricité.....	40
Tableau II.2 : Exemple de besoins en eau.....	41
Tableau II.3 : récapitulation des paramètres de la pile Vitovalor pt2	52
Tableau III.1 : Paramètres physiques de PEM.....	71

Nomenclature

PAC	Pile A Combustible.
AFC	Pile A Combustible Alcaline.
PEMFC	Pile A Combustible A Membrane Echangeuse De Protons.
PAFC	Pile A Combustible A Acide Phosphorique.
SOFC	Pile A Combustible A Oxydes Solides.
MCFC	Pile A Combustible A Carbonates Fondus.
DMFC	Pile Au Méthanol direct.
O₂	L'oxygène.
H₂	L'hydrogène.
H₂O	L'eau.
CH₄	Méthane.
CO₂	Le dioxyde de carbone.
Pt	Site libre.
Pt- <i>H_{abs}</i>	Un atome d'hydrogène absorbé sur le site active.
P_H	Potentiel d'hydrogène.
Nombre N	Cellules mises en série qui fixe la tension du stack,
Surface A	Cellule qui fixe le courant du stack.
P_{st}	Puissance électrique brute du stack (W)
N	Nombre de cellules de l'empilement
V	Tension par cellule (V)
J	Densité de courant (A/m ²)
A_s	Surface active des cellules (m ²)
W_{elec}	L'énergie électrique produite.
n_{elec_réel}	le nombre d'électrons réellement échangés.
n_{elec_the}	Consommation en comburant et combustible.
P_{Aux}	Puissance demandée par les auxiliaires.
P_{PAC}	Puissance nette fournie par la PAC.
F_{in, c}	Etant le débit d'entrée à la cathode.

$F_{in, a}$	Etant le débit d'entrée à l'anode.
$F_{utilisé, c et a}$	Sont les débits de l'air et d'hydrogène.
G	Le coefficient de déperdition volumique de la maison.
V	Volume de la maison (m ³).
ΔT	Différence de température entre l'intérieur (19 ou 20°), et l'extérieur (Température de base hiver du lieu d'habitation).
T ext base	Température extérieure de base du lieu d'habitation.
Ubat	Représente la déperdition thermique totale moyenne de la maison
Sdép	Somme des surfaces des parois [m ²].
Vh	Volume habitable de la zone traitée [m ³].
R	Coefficient fonction du type de ventilation.
E^0	Potentiel thermodynamique d'équilibre à une température < 100 °C
E_{Rev}	Potentiel thermodynamique réversible de la réaction d'une PAC
$E_{PAC MAX}$	Tension maximale de la PAC en circuit ouvert
$E_{PAC MAX Standard}$	Tension maximale de la PAC en circuit ouvert dans de conditions standards.
F	Constante de Faraday, 96485C
I_0	Courant d'échange de la PAC.
I_1	Courant représentant le limite de densité de courant de la PAC.
I_{PAC}	Courant de sortie de la PAC,
m_{elec}	Mols d'électrons mises en jeu lors de la réaction d'une PAC.
P_0	Pression standard, 10 ⁵ Pa
R	Constante de gaz parfait, 8.314 J·mol ⁻¹ ·K ⁻¹ ou kg·m ² ·s ⁻² ·mol ⁻¹ ·K ⁻¹
$R_{Electronique}$	Résistance de la PAC due aux transports des électrons
$R_{Protonique}$	Résistance de la PAC due aux transports des protons
R_t	Résistance totale de la PAC
T_{PAC}	Température de fonctionnement de la PAC

V_{PAC}	Tension de sortie de la PAC
ΔG	Variation d'enthalpie libre appelée énergie libre de Gibbs
ΔH	Variation de l'enthalpie
$(\Delta S, \Delta S_{Standard})$	Variation d'entropie quinconce et standard -0.164 kJ/(mol K)
$(\eta_{act_c}, \eta_{act_a}, \eta_{conc})$	Surtensions d'activation à la cathode, à l'anode et de concentration
η_{Comp}	Rendement volumique du compresseur
V_F	Tension de sortie de la pile à combustible.
E_{NL}	Pas de tension de charge de la pile à combustible.
V_{RA}	Chute de tension due à la perte d'activation.
V_{RC}	Chute de tension due à une perte de concentration.
V_{RO}	Chute de tension due à une perte ohmique.
P_1	Pression partielle d'hydrogène.
P_2	Pression partielle d'oxygène.
T	température de cellule.
z	Nombre d'électrons en mouvement.
E_n	Tension de Nernst.
α	coefficient de transfert de charge.
P_{H2}	Pression partielle d'hydrogène à l'intérieur de la cheminée (Pa) .
P_{O2}	Pression partielle d'oxygène à l'intérieur de la cheminée (Pa) .
k	constante de Boltzmann = $1,38 \times 10^{-23}$ J/K
h	constante de Planck = $6,626 \times 10^{-34}$ J s
Δv	Facteur volumique de la barrière d'activation (m3).
ΔG	Taille de la barrière d'activation qui dépend du type d'électrode et de catalyseur utilisé (J/mol) .
T	Température de fonctionnement (K).
K_c	Constante de tension dans les conditions nominales de fonctionnement.
P_{fuel}	pression d'alimentation absolue du carburant (atm) .
P_{aire}	pression d'alimentation absolue de l'air (atm).
$V_{lpm}(\text{carburant})$	Débit de carburant (l/min) .
$V_{lpm}(\text{air})$	Débit d'air (l/min)
x	Pourcentage d'hydrogène dans le carburant (%)
y	Pourcentage d'oxygène dans le comburant (%)

N	nombre de cellules
P_{H_2O}	Pression partielle de vapeur d'eau à l'intérieur de la cheminée (atm)
W	Pourcentage de vapeur d'eau dans le comburant
η_{nom}	Rendement PCI nominal de la cheminée (%)
V_{nom}	Tension nominale (V).
I_{nom}	Courant nominal (A).
$V_{lpm(air)nom}$	Débit d'air nominal (l/min).
P_{airnom}	Pression nominale absolue d'alimentation en air (Pa).
T_{nom}	Température de fonctionnement nominale (K).
K	Constante de sous-dépassement de la tension.
$U_{f_{O_2}}(nom)$	Utilisation nominale d'oxygène.

Introduction générale

Introduction Générale

Introduction générale

Le développement des nouvelles énergies est un défi majeur du 21^{ème} siècle pour, d'une part, faire face au réchauffement climatique et d'autre part, avoir des alternatives aux énergies fossiles. La production mondiale d'énergie repose aujourd'hui essentiellement sur les combustibles fossiles comme le pétrole, le charbon et le gaz naturel. L'augmentation de la population mondiale ajoutée au développement économique laisse prévoir le doublement des besoins énergétiques au niveau mondial. D'après l'Agence Internationale de l'Energie, plus de 1,4 milliards de personnes dans le monde ne disposent pas d'accès à l'électricité. Environ 85% de ces personnes vivent dans les zones rurales. Ces régions sont également confrontées à des nombreux défis environnementaux et économiques qui font que, particulièrement pour ces régions, des solutions énergétiques durables seront basé sur un recours accru aux sources d'énergie renouvelables (SER).

Tant dit que les réserves s'épuisent, nous devons trouver une alternative aux combustibles fossiles, ce qui a poussé les scientifiques à chercher de nouvelles sources de production d'énergie électrique. Le besoin de sources d'énergies abondantes, propres, efficaces et d'un coût abordable devient un enjeu social de première importance pour le maintien de la modernité. Les énergies renouvelables pourraient répondre à ce besoin mais leur attrait est limité par leur disponibilité intermittente comme l'éolien ou le solaire et par l'absence d'un moyen de stockage adéquat de l'électricité. Les batteries ne sont pas adaptées au stockage à long terme d'énergie: elles ont une durée de vie limitée.

La recherche de nouvelles sources d'énergies (propres, renouvelables) et de nouveaux modes d'exploitation, plus efficaces, est donc une quête constante. Dans ce contexte, La pile à combustible s'avère être une solution.

La pile à combustible (PAC) est connue depuis longtemps comme un convertisseur d'hydrogène en énergie (électrique + thermique) possédant de très bons rendements, les recherches sur cette technologie se développent partout dans le monde de manière considérable. Les raisons sont bien connues : la réponse aux contraintes environnementales, aux problèmes posés par la production centralisée d'électricité et autonomie. La nécessité d'avoir des alternatives énergétiques (vecteur hydrogène) et certaines exigences technologiques spécifiques telles que les applications spatiales, sous-marines, électroniques portables, alimentation électrique de sites isolés et de microsystèmes. Il est certain que nous

Introduction Générale

assisterons dans les prochaines décennies à l'émergence de la filière hydrogène dans notre vie quotidienne comme vecteur énergétique.

Les programmes spatiaux américains ont pourtant relancé l'intérêt pour ces piles dans les années 1960 et depuis le début des années 1990 (et actuellement plus que jamais), on assiste à une réelle émulation entre les nombreux laboratoires de recherche et entreprises travaillant au développement des piles à combustible et de leurs composants pour sortir les premiers prototypes et les premières piles destinées à la vente. Le Japon a été un des premiers pays à mettre en place une coordination des efforts de recherche au niveau académique et industriel dans le domaine de l'hydrogène et des piles à combustible et une feuille de route pour les applications stationnaire et transport.

Si on ne regarde que du point de vue de l'utilisation, l'hydrogène semble être la solution miracle pour sortir de la crise énergétique et environnementale actuelle. En effet, L'hydrogène est l'élément le plus abondant de notre univers, c'est un carburant non polluant et non toxique dont la combustion ne rejette que de l'eau l'hydrogène est inépuisable et il peut donc être produit dans tous les pays, ce qui résout les tensions économiques et sociopolitiques entre les pays.

La pile à combustible met en effet en jeu la réaction d'oxydoréduction entre l'hydrogène et l'oxygène pour donner de l'eau, de l'électricité et de la chaleur

En fait, il existe plusieurs types de piles à combustible, dans notre thème on s'intéresse à étudier la pile à membrane échangeuse de protons (PEMFC). Les piles à membrane échangeuse de protons sont très attractives pour des raisons essentiellement liées à leur rendement énergétique élevé et à leur possibilité d'industrialisation .cette technologie semble effectivement être la plus mûre et la plus proche du stade commercial.

La technologie choisie dans notre travail est innovant et énergétiquement très performant, fonctionnant au gaz. Cette technologie s'appuie sur le principe de micro-cogénération pour assurer localement une production simultanée de chaleur et d'électricité. Elle est particulièrement adaptée aux maisons individuelles existantes bien isolées qui présentent d'un côté, une demande importante en électricité et de l'autre, des consommations de chauffage et d'eau chaude sanitaire maîtrisées.

Ce mémoire s'articule autour de trois chapitres :

Introduction Générale

Dans le premier chapitre nous avons effectué une recherche bibliographique approfondie sur le principe de fonctionnement de pile à combustible. Par la suite, il sera exposé les autres types de PAC existant ainsi que les différentes applications offertes par de telles piles. Enfin, avant d'en venir à la partie de dimensionnement, nous expliquerons de quelle manière est produit l'hydrogène nécessaire au fonctionnement de la PAC

Le deuxième chapitre sera consacré au dimensionnement d'un chalet, nous avons calculé les besoins électrique afin de choisir un système à pile à combustible adéquat. La cogénération et en effet un domaine permettant de dimensionné un système de stockage a PAC.

Le troisième chapitre a abordé la modélisation pour mettre en œuvre la pile PEMFC, grâce à l'analogie entre les domaines électrique et dynamique, cette manière constitue un outil simple, évolutif et efficace. Grâce à cette modélisation, une simulation regroupe des résultats a été effectuée dans le but d'obtenir les différentes caractéristiques et l'influence des paramètres et les performances de la pile à combustible PEMFC.

Enfin, une conclusion générale permettra de clôturé ce manuscrit en résumant les travaux de ce mémoire.

CHAPITRE I
Recherche bibliographique sur
La pile à combustible

I.1 Introduction

Aujourd'hui, nos besoins énergétiques sont largement couverts par les énergies fossiles (gaz naturel, charbon, pétrole...). Par ailleurs, ces ressources fossiles sont limitées, non renouvelables, et leurs combustions engendrent des gaz à effet de serre. Le recours à la pile à combustible s'est avéré une technologie très étudiée dans tous les domaines de production d'énergie et elle est présentée comme une des solutions du futur, elle prend tout son sens en raison de rendement de conversion global (électrique + thermique).

Dans ce chapitre nous allons présenter l'intérêt porté à cette technologie comme moyen de production décentralisée prometteur à plusieurs avantages :

- Un processus est donc très écologique, car, en comparaison avec un système traditionnel, la quantité de CO₂ émis peut être jusqu'à 50 % plus faible.
- Flexibilité du combustible qui peut être utilisé (en dehors du gaz naturel et hydrogène, possibilité d'envisager des combustibles d'origine renouvelable, tels que le biogaz ou les biocombustibles liquides).
- Production de l'électricité, la chaleur et l'eau.
- Flexibilité de la technologie (basse et haute températures).
- Modularité en puissance ouvrant de nombreuses perspectives d'applications (mobile, transport, stationnaire résidentiel, tertiaire et industriel).
- Un rendement électrique élevé (> 50 %) sur une large plage de modulation de puissance.
- La PAC est non toxique et non polluante.

I.2 Historique

La première démonstration pile à combustible a été faite en 1839 par William Grove. Il s'agissait d'une pile hydrogène/oxygène à basse température avec des électrodes en platine et d'un électrolyte à base d'acide sulfurique dilué. Ce n'est qu'à partir des années 1930 que les piles à combustible devinrent pertinentes grâce aux travaux de l'ingénieur anglais Francis T. Bacon, à Cambridge sur une pile à combustible hydrogène/oxygène en milieu KOH aqueux (température de 80 à 200°C, pression de gaz de quelques atmosphères à 40 atmosphères, électrodes poreuses de nickel et d'oxydes de nickel). En 1953, la

Chapitre I : Recherche bibliographique sur la pile à combustible

réalisation d'un premier prototype de puissance notable a eu lieu. Le programme spatial américain de la NASA (National Aeronautics and Space Administration) conduisit, à la fin des années cinquante, à une série de réalisations technologiques concernant des piles à électrolyte polymère solide (SPEFC de General Electric), pour le programme GEMINI à partir des années soixante, à la fabrication de piles alcalines de type Bacon par Pratt et Whitney (devenu United Technologies Corporation), pour les missions lunaires APOLLO et maintenant pour les navettes spatiales. Parallèlement, Justi et Winsel, en Allemagne, développèrent des piles alcalines (AFC) de quelques kilowatts, avec des électrodes de nickel de Raney de grandes surfaces actives (électrodes à double squelette ou DSK).changé [1].

- 1962-1966 : programme GEMINI pile PEMFC de 1Kw (General Electrics).
- 1966-1972 : programme APOLLO 3 piles AFC de 1.5 Kw (international Fuel Cells).
- 1981-2007 : Navette spatiale pile AFC de 12Kw (international Fuel Cells) [2].
- En août 2010, un appel à projet européen (25 projets) lié aux technologies de l'hydrogène a été lancé par un partenariat public-privé, offrant 180 M€ pour encourager l'utilisation des piles à combustible et de l'hydrogène dans les voitures, le transport public urbain ou les centrales [3].

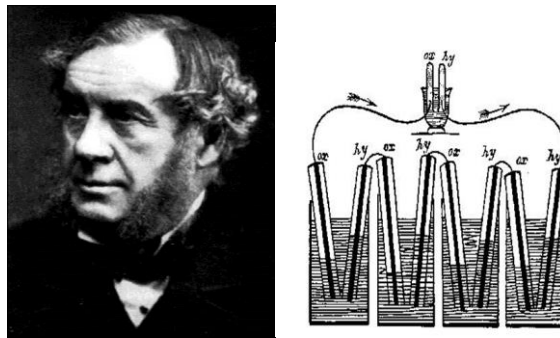


Figure I.1 Piles à combustible de Sir William Grove

I.3 Principe de fonctionnement :

La PAC est un générateur électrique qui convertit l'énergie d'une réaction chimique en énergie électrique. Son principe de fonctionnement nécessite un approvisionnement en combustible, le plus utilisé étant l'hydrogène [4]. Une cellule de pile à combustible produit une tension électrique, chaleur et l'eau. Leur température de fonctionnement varie de 60 à 1050°C selon les modèles de la pile [5].

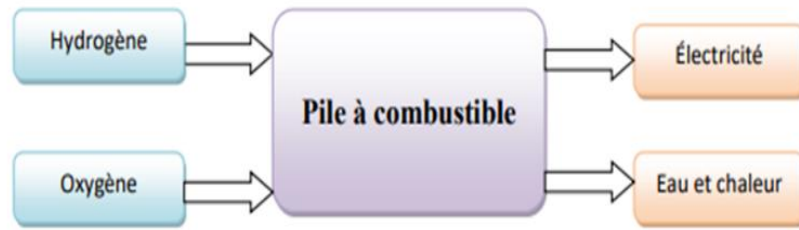
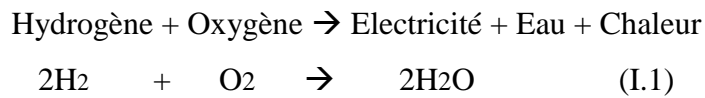


Figure I.2 Schéma de principe de conversion directe en électricité

Le principe de la pile à combustible repose sur une réaction chimique simple :



La pile à hydrogène convertit l'énergie d'un combustible (l'hydrogène) en énergie (électrique et thermique).

Le principe repose sur une réaction oxydoréduction permettant de créer l'électricité, chaleur et l'eau [5].

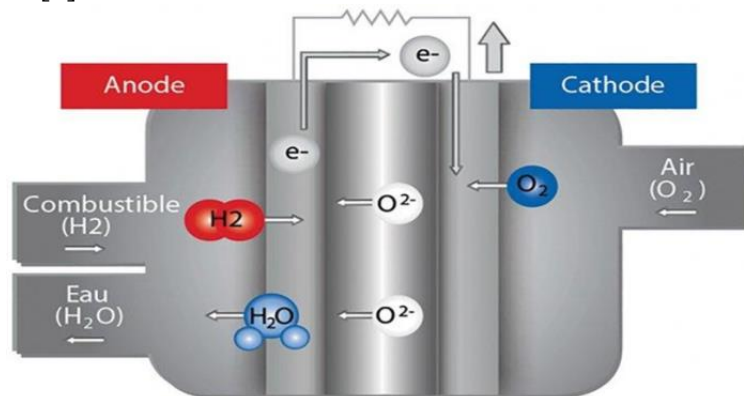
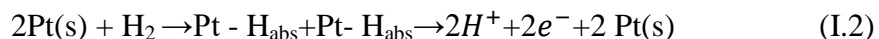


Figure I.3 Principe de fonctionnement simplifié de PAC.

Au niveau de l'anode : il se passe une réaction d'oxydation. La molécule d'hydrogène, au contact d'un catalyseur (généralement du platine), se décompose et libère ses électrons qui vont créer le courant électrique suivant l'équation ci-dessous [5].



Où

Pt(s) : Site libre

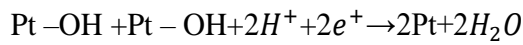
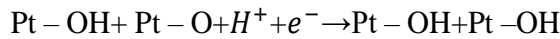
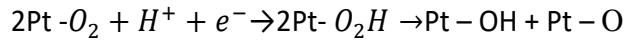
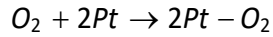
Pt- H_{abs} : un atome d'hydrogène absorbé sur le site active

Donc la réaction globale à l'anode est :

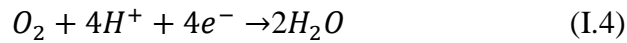
Couple (H^+/H_2) :



Au niveau de la cathode : l'oxygène, au contact avec les électrons libérés par la précédente réaction réagit [5]. C'est la réduction [6].



Le couple (O_2/H_2O) :



Enfin, les protons hydrogène, lorsqu'ils arrivent à la cathode, se recombinent avec les ions d'oxygène et forment de l'eau [5].



Pour que la réaction ait lieu, on utilise un catalyseur, le plus souvent de platine. Ce dernier a pour rôle d'augmenter la vitesse de réaction sans pour autant être consommé lui-même. Le catalyseur est disposé sur l'anode et sur la cathode, au niveau d'un point de contact entre l'électrolyte et l'électrode, de manière à ce que tous les « acteurs » de la réaction d'oxydation ou de réduction [7].

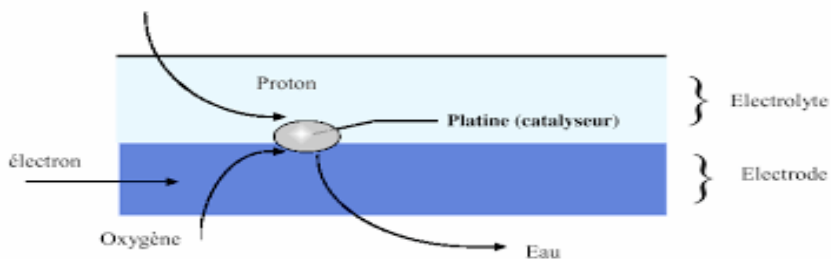


Figure I.4 Schéma d'une zone active de cellule de pile à combustible H_2/O_2

I.4 Constitution de la pile à combustible

Le cœur de la pile est constitué : d'une anode (électrode chargée positivement) et une cathode (électrode chargée négativement), séparées par un électrolyte (un matériau qui bloque le passage des électrons). L'assemblage de ces composants ainsi que leur nature dépend du type de pile. Ils ont cependant le même rôle.

I.4.1 Les électrodes :

Les électrodes sont le lieu des réactions d'oxydoréduction. Pour que la synthèse de l'eau ait lieu, les protons (en solution dans l'eau), l'oxygène (gaz dissous dans l'eau) et le platine (catalyseur solide) doivent simultanément être présents sur le site réactionnel : il s'agit du triple contact (gaz, électrolyte, catalyseur). Pour favoriser la création du triple contact, les électrodes doivent présenter les caractéristiques suivantes :

- être poreuses pour permettre la diffusion des gaz jusqu'aux sites de réaction. Elles sont généralement en feutre de carbone ou en papier carbone.
- être imprégnées d'un catalyseur sur la face en contact avec l'électrolyte.

A l'heure actuelle, les catalyseurs utilisés sont des alliages de platine. La teneur en platine sur les électrodes est généralement de l'ordre de 0,4 à 0,6 mg.cm⁻². L'objectif est d'atteindre des quantités de platine inférieures à 0,1 mg.cm⁻², tout en conservant des performances acceptables en termes de tension de cellule, de stabilité des performances dans le temps [6].

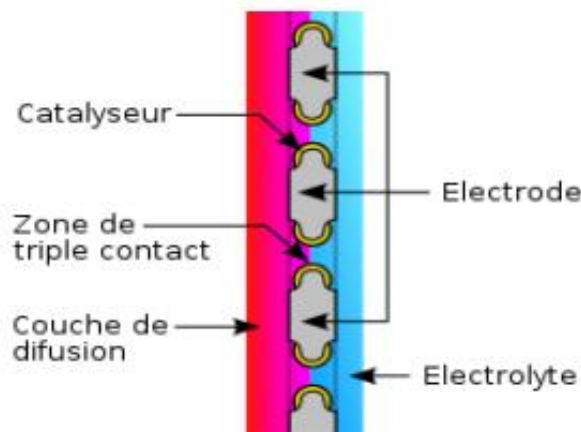


Figure I.5 Catalyseur du côté cathode.

I.4.2 L'électrolyte

L'électrolyte joue un rôle primordial dans les piles à combustible. Son rôle est de permettre la migration des ions d'une électrode vers l'autre d'une part, et d'autre part la séparation physique des deux compartiments anodique et cathodique. Ce sont ses propriétés de conduction qui vont conditionner la recombinaison électrochimique de l'hydrogène avec l'oxygène et donc les performances des piles. La conductivité d'une membrane dépend essentiellement de sa température et du taux d'hydratation et le type de la pile

L'hydratation doit être rigoureusement contrôlée, car un excès cause un noyage de la membrane et réduit par la suite les performances des PAC, à l'inverse l'assèchement quant à lui provoque la rupture de la membrane d'où un contact direct entre les réactifs : l'oxygène et l'hydrogène dont résulte une réaction chimique très exothermique.

Une température élevée peut nécessiter un refroidissement de l'ensemble et réduit ainsi le rendement des PAC par l'utilisation des auxiliaires à cet effet. Pour les piles à haute température l'effet est pratiquement intéressant dans la mesure où un système de cogénération est envisageable dans ce cas [6].

L'électrolyte permet le passage des charges par deux effets physiques l'électro-osmose et la diffusion. Il doit posséder les propriétés suivantes :

- ✓ être de bonne conduction ionique.
- ✓ être un bon isolant électrique.
- ✓ être imperméable à l'oxygène et à l'hydrogène gazeux.
- ✓ avoir une bonne tenue mécanique face aux contraintes thermiques, d'hydratation et de différence de pression entre l'hydrogène de l'anode et l'oxygène de la cathode[6].

I.4.3 Les plaques bipolaires :

Généralement en graphite, les plaques doivent conduire le courant, mais aussi permettre de diffuser des gaz jusqu'aux électrodes (pour les piles de type PEMFC). Elles doivent résister aux agressions du milieu (acide ou basique) et aussi être imperméables aux gaz réagissant (sous peine de provoquer un court-circuit chimique). Situées au cœur des piles à combustible, les plaques bipolaires assurent la conduction des électrons, ce qui permet l'alimentation en gaz et l'évacuation de l'eau.

Ces plaques sont collées aux supports de l'anode et de la cathode. Elles permettent de :

- Canaliser les gaz venant de l'extérieur
- Collecter le courant
- Gérer les flux

Des canaux sont gravés dans ces plaques pour permettre le passage des réactifs [16].

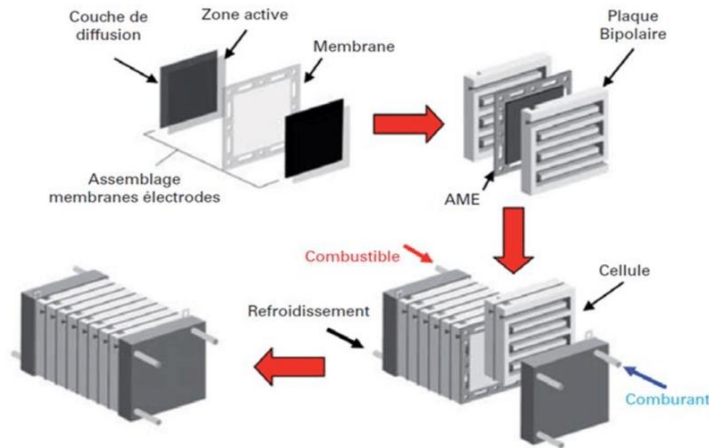


Figure I.6 Vue éclatée et assemblée d'une pile à combustible

I.5 Alimentation de la PAC

La pile à combustible peut être alimentée en hydrogène et en oxygène.

I.5.1. Circuit d'alimentation en hydrogène :

L'hydrogène est élément chimique le plus répandu dans l'univers. Il ne s'enflamme pas de lui-même, il ne pollue pas les eaux, il n'est pas nocif pour l'environnement et la nature et il brûle sans laisser de résidus. En dépit de ses nombreux avantages, les propriétaires ont souvent beaucoup de craintes par rapport à l'hydrogène. Parmi ces craintes, la plus fréquente est la peur d'une explosion. Les expériences découlant de la technique automobile prouvent que cette crainte est injustifiée. Par exemple, les piles à combustible sont utilisées dans les bus, sans qu'il y ait eu d'incident à déplorer à ce jour [8].

L'hydrogène est produit par la séparation d'éléments chimiques dont l'atome H est un composant et par la mobilisation d'une source d'énergie [9].

La plus grande partie de l'hydrogène est actuellement produite à partir de gaz naturel et est utilisée par les industries pour ses propriétés chimiques, en particulier dans les usines d'ammoniac (50% de la consommation mondiale) et dans les raffineries de pétrole (désulfuration d'essence et de gazole, production de méthanol etc [9]).

I.5.1.1 La production à partir d'énergies fossiles (l'hydrogène gris) :

Actuellement, 95 % de l'hydrogène consommé à l'échelle mondiale est produit à partir de gaz naturel ou de charbon [10].

a. Le vaporeformage du gaz naturel

Est le processus industriel le plus répandu pour produire l'hydrogène est le qui est essentiellement composé de méthane (CH_4). À une température comprise entre 700 et 1 100 °C, la vapeur d'eau réagit avec le méthane en donnant du monoxyde de carbone et de l'hydrogène. La purification de l'hydrogène étant plus facile sous forte pression, le reformage est réalisé sous une pression de vingt atmosphères. Le mélange hydrogène/monoxyde de carbone est communément appelé gaz de synthèse. Si la réaction est faite en présence d'un excès de vapeur d'eau, le monoxyde de carbone est oxydé au niveau d'oxydation supérieur, conduisant au dioxyde de carbone, ce qui augmente la production d'hydrogène [11].

b. La production d'électrolyse

L'hydrogène vert, produit principalement par électrolyse de l'eau à partir d'électricité renouvelable, L'électrolyse de l'eau est un procédé électrolytique qui décompose l'eau (H_2O) en dioxygène et dihydrogène gazeux grâce à un courant électrique [10]. La cellule électrolytique est constituée de deux électrodes habituellement en métal inerte dans la zone de potentiel et de pH considérée, typiquement du groupe du platine immergées dans un électrolyte et connectées aux pôles opposés de la source de courant continu[12].

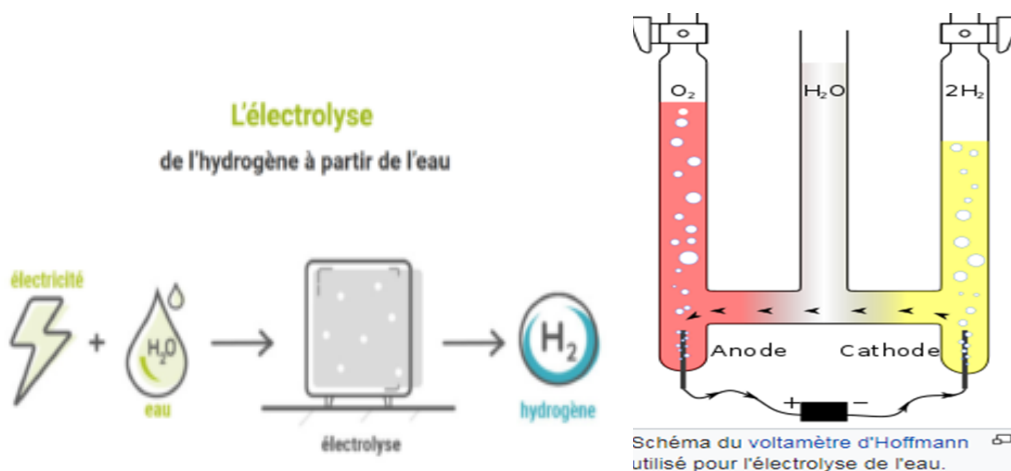


Figure I.7 schéma de production d'hydrogène vert (électrolyse)

I.5.1.2 La production d'hydrogène à partir d'énergies renouvelables

a. Le biogaz

Le biogaz constitue une alternative durable au gaz naturel fossile. Il est produit dans les installations à biogaz dans lesquelles les résidus végétaux et alimentaires ou le lisier subissent une fermentation sèche ou humide. Énergie est produite par des petites bactéries qui décomposent la biomasse utilisée (le substrat) en ses éléments constitutifs. Le produit final est un mélange gazeux composé essentiellement de méthane, de dioxyde de carbone et oxygène. Le biogaz dispose des mêmes propriétés que le gaz naturel. Il peut donc être injecté aisément dans le réseau de gaz public et être également traité par les piles à combustible [8].

b. La biomasse

Dans le domaine de l'énergie, la biomasse est la matière organique d'origine végétale (micro algues incluses), animale, bactérienne ou fongique (champignons), utilisable comme source d'énergie (bioénergie). Cette énergie peut en être extraite par combustion directe, comme pour le bois énergie, ou par combustion après un processus de transformation de la matière première, par exemple la méthanisation (biogaz, ou sa version épurée le bio-méthane) ou d'autres transformations chimiques (dont la pyrolyse, la carbonisation hydrothermale et les méthodes de production de biocarburants ou « agro-carburant »). Trois modes de valorisations de la biomasse existent : thermique, chimique et biochimique [13].

I.5.1.3 Le stockage de l'hydrogène

Concernant le stockage de l'hydrogène, il existe plusieurs solutions :

a. Stockage de gaz dans un réservoir

Le gaz stocké dans un réservoir à des pressions de l'ordre de 300 bars à 700 bars.

Afin de satisfaire les conditions de pression en entrée de la pile (jusqu' à 3 bar), il est nécessaire d'ajouter entre le stockage et la pile, un détendeur permettant de réguler la pression d'hydrogène en entrée de la pile. L'inconvénient d'un tel mode de stockage est que l'énergie utilisée pour comprimer l'hydrogène représente 7% de l'énergie stockée si l'hydrogène est comprimé à 200 bars (et donc plus si la pression est plus élevée) [14].

b. Liquéfaction d'hydrogène

Cette liquéfaction implique des températures très basses et donc une énergie encore plus conséquente qu'un stockage sous pression. Avec les installations actuelles, l'énergie nécessaire à la liquéfaction représente 40% de l'énergie contenue dans l'hydrogène [14].

c. Stockage d'hydrogène à basse pression

Cette solution consiste à stocker l'hydrogène à basse pression dans des hydrures métalliques. L'inconvénient d'un tel type de stockage est le temps de recharge du réservoir qui est assez long. D'autre part, la quantité d'hydrogène stockée ne dépasse pas 2% du poids du réservoir [14].

I.5.2 Circuit d'alimentation en oxygène (provenant de l'air)

L'oxygène est l'un des vecteurs indispensable au fonctionnement d'une pile à combustible. Bien qu'il enveloppe notre environnement, il reste insuffisant dans l'air qui le contient. Cependant, l'air ne contient que 21% d'oxygène. Afin d'alimenter la pile en oxygène, différentes méthodes sont utilisées : l'oxygène pur ou air comprimé par un compresseur ou soufflante ; dans certains cas, l'énergie disponible dans les gaz de sortie (air appauvri en oxygène) de la pile peut être récupérée par une turbine [14].

Pour les petites puissances, une soufflante peut suffire.

Les piles à combustible PEMFC peuvent fonctionner à partir d'oxygène pur (cas des piles utilisées dans les sous-marins et les engins spatiaux). Celui-ci est alors stocké sous pression dans un réservoir. Dans le cas des applications terrestres, stationnaires ou embarquées, les piles à combustible sont majoritairement alimentées en air.

I.6 Système de contrôle

Pour assurer un bon fonctionnement (rendement, sécurité de la pile, temps de réponse, contraintes mécaniques, etc...), il est nécessaire d'avoir un système de contrôle global qui agit sur les différents sous-systèmes en interaction :

- Contrôle des convertisseurs statiques pour la gestion d'énergie.
- Contrôle du débit des gaz et du groupe moto-compresseur.
- Contrôle de la pompe à eau et du ventilateur nécessaires au refroidissement.
- Contrôle de la température de l'humidificateur [14].

I.7 Circuit de refroidissement

L'évacuation de cette chaleur, pour des petites puissances, peut être réalisée avec un ventilateur (convection forcée d'air) qui peut être le même que celui alimentant la pile en air. Dans le cas des piles de plus fortes puissances, la convection forcée à air ne suffit plus à évacuer la chaleur donc la température est régulée à partir d'un circuit de circulation en eau dans la pile. Des plaques de refroidissement sont donc insérées entre les cellules élémentaires du stack et sa température est ainsi régulée grâce au débit du fluide circulant dans un circuit indépendant [14].

I.8 Circuit d'humidification

Généralement les piles de type PEFC requièrent un circuit d'humidification des gaz afin que la membrane ne soit pas déshydratée (augmentation de la résistance ionique de la membrane) ou que les électrodes ne soient pas noyées en raison d'un excédent d'eau. Ce circuit a donc pour rôle d'humidifier les gaz en entrée de la pile, généralement à partir de l'eau produite par la pile, Récupérée au moyen d'un condenseur.

L'assèchement ou la sur-humidification de la membrane diminue la production d'énergie électrique et limite la durée de vie de la pile [14].

I.9 Convertisseurs statiques

Comme on peut le voir sur la Figure I.8, les auxiliaires de la pile disposent de nombreux convertisseurs statiques. Ils sont nécessaires pour la gestion d'énergie dans le système contenant la pile. La tension de la pile, relativement faible, varie en fonction du courant débité. Un convertisseur statique est donc nécessaire pour faire l'interface entre la pile et le bus continu. Pour cet objectif, le convertisseur choisi dépend du cahier des charges, et est généralement de type continu-continu, élévateur de tension et unidirectionnel en courant. Selon l'application, des composants de stockage, comme les batteries et les super condensateurs, peuvent être connectés au bus continu par des convertisseurs. Sur le même bus, des convertisseurs sont aussi connectés pour assurer le lien avec une charge électrique quelconque alimentée par la pile, comme un moteur électrique [14].

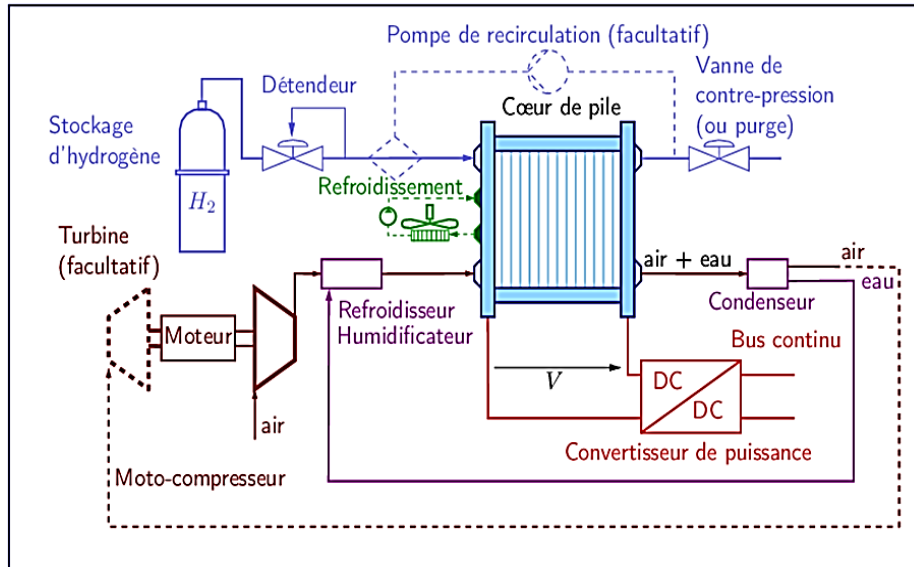


Figure I.8 Schéma de principe d'un système pile à combustible alimenté en hydrogène pur sous pression.

I.10 Dimensionnement d'un stack

Pour concevoir la pile à combustible correspondant au cahier des charges d'un projet donné, le concepteur dispose de deux degrés de liberté :

- Le nombre N de cellules mises en série qui fixe la tension du stack,
- La surface A d'une cellule qui fixe le courant du stack.

Le dimensionnement du stack consiste à déterminer le nombre et la surface des cellules qui composent un stack de piles à combustible. Ce dimensionnement doit tenir compte de la puissance nominale de la pile et de la densité de courant que nous souhaitons avoir [14]. La puissance électrique brute de l'empilement se calcule par la relation suivante (I.6) :

$$P_{st} = N \cdot V \cdot J \cdot A_s \quad (I.6)$$

Avec :

P_{st} : Puissance électrique brute du stack (W)

N : Nombre de cellules de l'empilement

V : Tension par cellule (V)

J : Densité de courant (A/m^2)

A_s : Surface active des cellules (m^2)

Chapitre I : Recherche bibliographique sur la pile à combustible

V et J sont liés par la caractéristique tension/courant de la pile, il reste donc trois variables indépendantes à ajuster de façon à obtenir la puissance souhaitée. Les contraintes liées à l'application vont nous permettre de faire les choix nécessaires [14].

Il est intéressant d'avoir la tension V_{st} la plus élevée et donc le courant I_{st} le plus faible possible car cela limite les pertes joule dans la cellule [14].

$$V_{st}=N \cdot V \quad (I.7)$$

$$I_{st}= J \cdot A_s \quad (I.8)$$

Pour satisfaire cette contrainte, il est possible :

- D'augmenter le nombre de cellules jusqu'à la limite technologique actuelle.
- D'augmenter la tension par cellule, en diminuant la densité de courant donc en augmentant la surface de cellule. Ce choix va en outre dans le sens d'un bon rendement de pile [14].

I.11 Différents types de la pile à combustible

Différentes familles de piles à combustible ont été développées. Les piles sont classées selon la nature de leur électrolyte et leur température de fonctionnement. Nous pouvons distinguer six types de pile Mentionnées dans **le tableau I.1** ci-dessous

Chapitre I : Recherche bibliographique sur la pile à combustible

Tableau I.1 : les différents types de pile à combustible

	PEMFC	AFC	PAFC	MCFC	SOFC	DMFC
Electrolyte	Polymère conducteur de protons	solution alcaline	acide phosphorique	carbonate fondu	céramique	Membrane en polymère solide
Catalyseur	Platine	Platine	Platine	nickel et l'oxyde de nickel	cermet nickelzircon	Méthanol
Charge mobile	H ⁺	OH ⁻	H ⁺	CO ₃ ²⁻	O ²⁻	H ⁺
Température de fonctionnement en (°C)	40 – 90	65 - 220	205	650	600 - 1000	
Rendement électrique pile en (%)	35 – 40	60 - 70	50	65	45 - 65	30 – 45
Champs d'applications	automobile, cogénération Transport, Stationnaire	applications spatiales	Cogénération	Cogénération	Cogénération	Transport, Equipements portable

Les six types les plus utilisés au stade de bases applications ou au stade de l'industrialisation sont regroupés dans le graphe suivant :

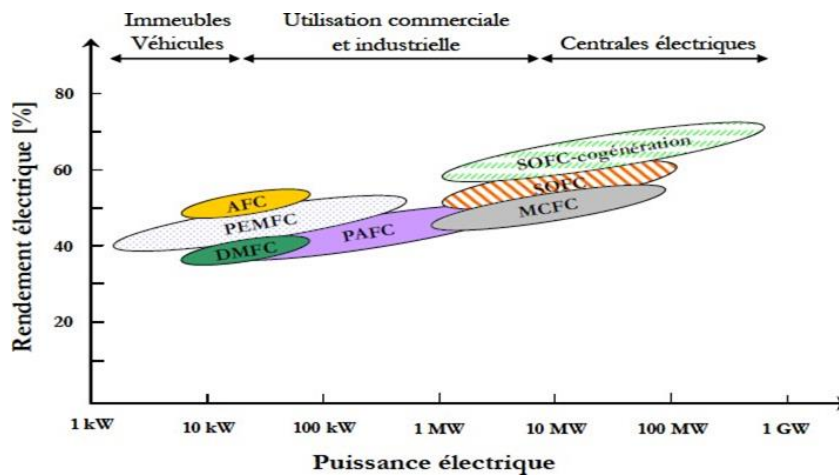
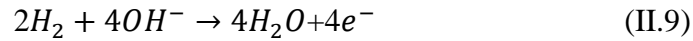


Figure I.9 : Classification des piles à combustibles selon la puissance et le rendement Electrique (REFERENCE)

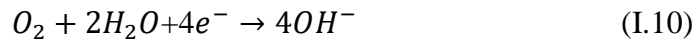
I.11.1 Les piles alcalines (AFC, alkaline fuel cells)

Les piles à combustible alcalines est une des technique de piles à combustible les plus développées. C'est aussi une technique qui fut employée lors des expéditions lunaires [15].

La pile à combustible produit de l'énergie grâce à une réaction d'oxydo-réduction entre l'hydrogène et l'oxygène. A l'anode, l'hydrogène est oxydé selon la réaction :



Produisant de l'eau et lâchant deux électrons. Les électrons transitent par un circuit externe et retournent à la cathode, où ils diminuent l'oxygène selon la réaction produisant des ions hydroxyde.



La réaction totale nette consomme une molécule d'oxygène (O₂) et deux d'hydrogène (H₂) pour produire deux molécules d'eau (H₂O). De l'électricité et de la chaleur sont créés, produits secondaires de la réaction.

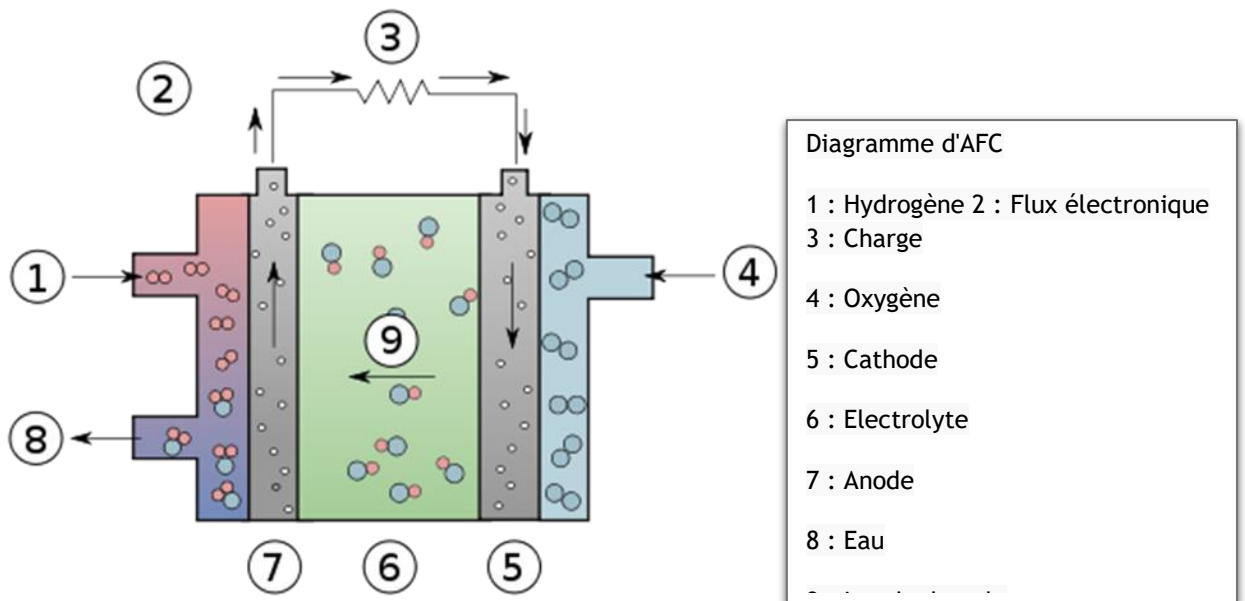


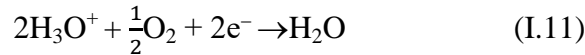
Figure I.10 Principe de la pile à combustible alcaline

Un inconvénient majeur de la pile alcaline est la sensibilité de l'hydroxyde de potassium au dioxyde de carbone. Il est donc nécessaire d'utiliser de l'hydrogène très pur lorsque celui-ci est obtenu par vapeur formage d'un combustible hydrocarboné. Il faut aussi éliminer ce dioxyde de carbone de l'air fourni à la cathode afin d'éviter la carbonatation de la potasse [15].

I.11.2 La pile à combustible à acide phosphorique PAFC (Phosphoric Acid Fuel Cell)

L'électrolyte est de l'acide phosphorique très concentré (97%) qui a une très faible Tension de vapeur et permet un fonctionnement jusqu'à 250°C. Les électrodes, destinées à séparer le gaz de la solution, sont hydrophobes (en général un tissu de carbone comprenant du PTFE) [17]. On a les demi-réactions suivantes :

À la cathode :



À l'anode :

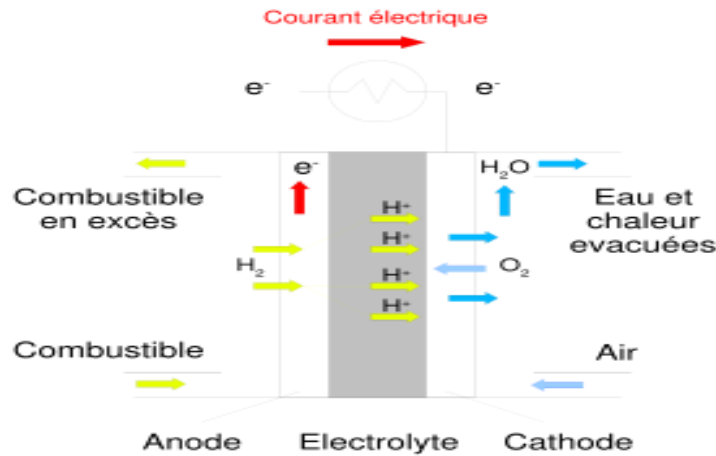
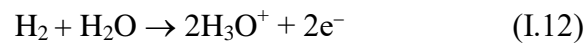


Figure I.11 Principe de la pile à combustible à acide phosphorique.

I.11.3 La pile à combustible à carbonates fondus MCFC (Molten Carbonate Fuel Cell)

Dans une pile à combustible à carbonates fondus l'électrolyte est un mélange eutectique de carbonate (X_2CO_3 , avec $\text{X} = \text{K}, \text{Na}$ et Li) fondu à haute température (500- 750°C) qui transporte l'oxygène de la cathode à l'anode sous forme CO_3^{2-} , à l'aide du gaz carbonique présent dans le comburant [17]. Les demi-réactions s'écrivent donc ainsi, sur catalyseurs non nobles :

Chapitre I : Recherche bibliographique sur la pile à combustible

Les réactions électrochimiques peuvent être représentées de façon schématique par :

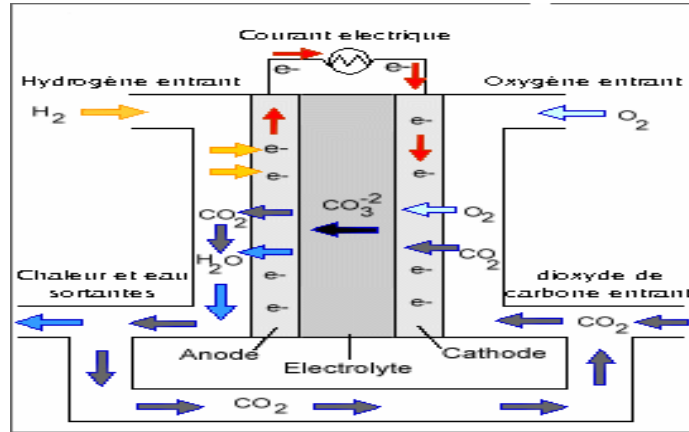
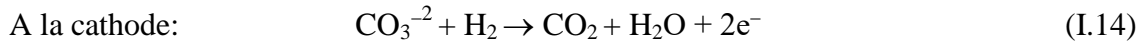
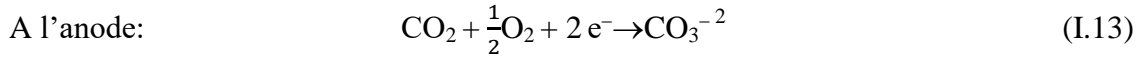


Figure I.12 Principe de la pile à combustible MCFC.

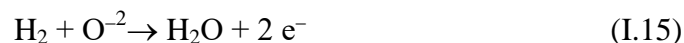
Ce type de pile a pour principal avantage, en plus du reformage interne, un rendement technologique, calculé en tenant compte du système entier, assez élevé (54%). En plus des remarques générales évoquées en introduction de cette partie, les inconvénients principaux sont une instabilité de l'électrolyte, qui est très corrosif, ce qui peut entraîner une durée de fonctionnement abrégée (quelques milliers d'heures) [17].

I.11.4 La pile à combustible à oxyde solide SOFC (Solid oxide fuel cells)

Les piles de type SOFC fonctionnent à particulièrement hautes températures, typiquement entre 700 °C et 1 000 °C (973 et 1273 K). Dans ces piles, les ions oxygène sont déplacés au travers d'un oxyde solide pris comme électrolyte à haute température pour réagir avec l'hydrogène du côté anode. À cause de la haute température de fonctionnement des SOFC [18].

Les deux réactions qui prennent place sont les suivantes :

A l'anode :



A la cathode :



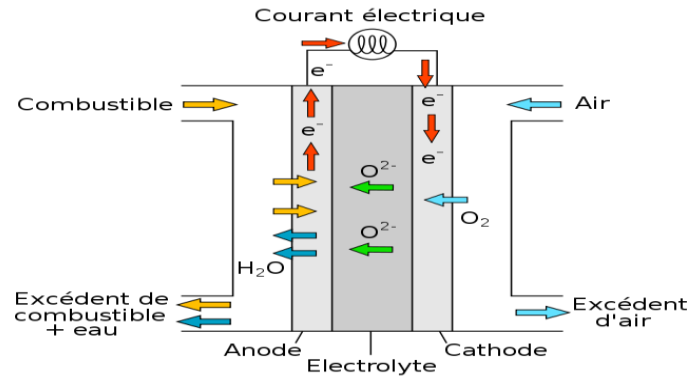
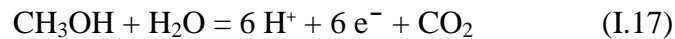


Figure I.13 Principe de la pile à combustible SOFC.

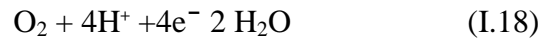
I.11.5 Les piles au méthanol direct (DMFC Direct Methanol Fuel Cell)

La DMFC est une PEMFC utilisant du méthanol comme carburant, le méthanol est alors directement en contact avec l'anode, à laquelle les réactions suivantes se produisent à des températures de fonctionnement ne dépassant jamais 80°C [19].

À l'anode :



Et à la cathode on a :



Dans une DMFC, ce sont les protons qui se déplacent de l'anode à la cathode et non les molécules de méthanol. Tout comme le cas chez la PEMFC, cette pile à combustible utilise un électrolyte polymérique échangeur d'ions, cependant ces membranes ne sont pas avantageuses pour bloquer le passage du méthanol. Le mouvement des protons dans la membrane est associé à la teneur en eau de la membrane. Le méthanol et l'eau ayant des propriétés comparables. À la cathode, le méthanol cause un mélange de potentiels dû à l'interférence entre les réactions d'oxydation du méthanol et de réduction de l'oxygène. Cela a pour effet une baisse des performances de la pile [19].

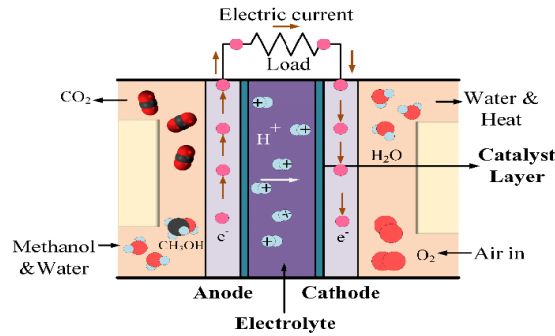


Figure I.14 Principe de la pile à combustible DMFC

I.11.6 La pile à combustible à membrane échangeuse de protons PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cell)

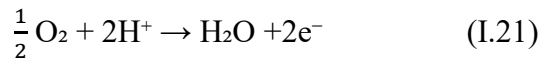
Il s'agit d'une combustion électrochimique d'hydrogène et d'oxygène [19], avec production simultanée, d'électricité, d'eau et de chaleur (figure 1.15), selon la réaction chimique de fonctionnement de la pile :



L'hydrogène H_2 est amené sur l'anode. Il se transforme en ions H^+ et libère des électrons qui seront captés par l'anode :



Les protons H^+ arrivent sur la cathode où ils se combinent aux ions O_2 constitués à partir de l'oxygène de l'air, pour former de l'eau :



Le transfert des protons H^+ et des électrons vers la cathode produit un courant électrique continu. Cependant la tension ne dépasse pas 1 V par cellule [20].

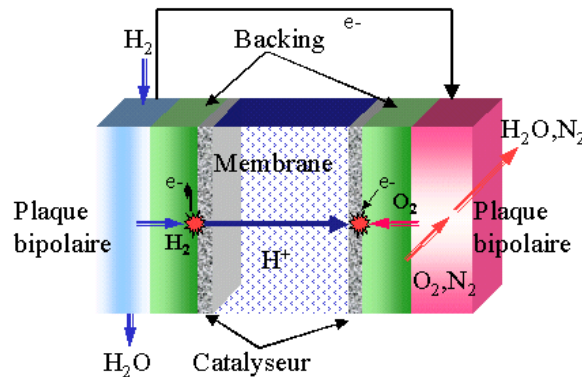


Figure I.15 Schéma du principe de fonctionnement d'une pile à combustible PEMFC.

I.12 Les applications des piles à combustibles

On distingue :

I.12.1 Applications portables

Celles-ci incluent le téléphone mobile d'une puissance moyenne de l'ordre de 400 mW et l'ordinateur portable d'une puissance moyenne de 10 W. Ces applications connaissent une très forte croissance et les recherches les plus importantes sont axées sur l'utilisation d'une pile à combustible chargeant une petite batterie qui assure mieux l'apport d'énergie lors des pics d'émission. L'autonomie n'est alors limitée que par la taille du réservoir d'hydrogène ou de méthanol. L'utilisateur recharge son portable comme on recharge un briquet ou un stylo à encre, en quelques secondes et chaque recharge donne 3 à 5 fois plus d'autonomie qu'une batterie actuelle, pour le même encombrement [21].



Figure I.16 Ordinateur portable avec une pile à combustible

I.12.2 Applications embarquées

Le transport est le domaine d'application à l'origine du développement de la pile à combustible vers le début des années 90. Compte tenu de la contrainte de coût, particulièrement forte dans ce secteur, et de la concurrence de la technologie traditionnelle (moteur thermique), il faut distinguer deux sous-familles assez différentes suivant qu'il s'agit d'équiper un véhicule léger ou un véhicule lourd. Il est demandé au véhicule léger quelque 3000 h de fonctionnement pour une dizaine d'années de durée de vie alors qu'un véhicule lourd (transport de passagers ou marchandises) exige une durée de fonctionnement bien plus importante [21].

La pile à combustible présente l'avantage de n'émettre aucun polluant au niveau du véhicule si elle utilise de l'hydrogène pur et peut aider au développement des véhicules hybrides [21].



Figure I.17 L'utilisation de la pile à combustible aux transports.

I.12.3 Applications stationnaires

Compte tenu des tendances vers la décentralisation de la production d'énergie électrique, ce secteur intéresse de nombreux industriels. L'activité est centrée sur deux grands domaines d'applications : le premier domaine est la production collective (les puissances sont dans la gamme de 200 kW à quelques MW) et le deuxième domaine est la production domestique (les puissances sont dans la gamme de 2 à 7 kW) [21].

De nombreux projets et démonstrations existent déjà dans le premier domaine. Ils sont généralement basés autour de la technologie PEMFC même si d'autres technologies (MCFC, SOFC) font également l'objet de tests mais ne sont pas encore au stade d'une commercialisation [21].

Ainsi, depuis quelques années, de nombreuses piles de faible puissance (quelques kW) sont apparues et ont été placées en test dans des habitations, des sites isolés et des bâtiments administratifs. Parallèlement, d'autres prototypes de moyenne puissance utilisés en mode de cogénération (quelques centaines de kW) ont été installés aux USA, au Japon et en Europe. Les unités d'une puissance supérieure à 1 MW restent encore rares à l'heure actuelle, ce qui restreint l'impact des piles à combustible sur la production centralisée [21].



Figure I.18 Exemple Pile MCFC 250 kW baptisée CELLIA et mise en place par Dalkia dans un HLM à Paris.

Chapitre I : Recherche bibliographique sur la pile à combustible

La technologie PEMFC retient l'attention pour trois raisons essentielles :

1) Sa température de fonctionnement relativement basse laisse envisager une technologie simplifiée pour assurer un démarrage rapide et une évacuation aisée de la chaleur produite à température ambiante, ce premier point est essentiel pour l'application propulsion électrique que nous traitons [22].

2) Elle est, ensuite, insensible à la présence de CO₂ dans l'air, contrairement à la filière alcaline. [22].

3) Enfin elle est de technologie «tout solide » et donc peut à la fois prétendre à des durées de vie supérieures aux piles à électrolyte liquide (pas de pièces mobiles au sein du convertisseur) ainsi qu'une industrialisation plus aisée : ceci permet d'envisager un coup prospectif compatible avec le marché visé, d'autant qu'elle offre une compacité sensiblement supérieure à celle des autres filières [22].

C'est pour toutes ces raisons que nous avons choisi d'étudier l'utilisation d'une pile PEM dans l'habitat. Dans une pile à membrane échangeuse de protons, le combustible brûlé est l'hydrogène et le comburant l'oxygène, en général prélevé dans l'air ambiant, le produit de la réaction chimique étant l'eau [22], L'hydrogène utilisé est soit, stocké dans des bouteilles de gaz comprimé ou dans des métalliques, soit produit par reformage à l'eau de différents combustibles : Gaz naturel (CH₄), charbon, méthanol, propane ...

Par ailleurs, l'ensemble des technologies de piles à combustible permettent de concevoir des systèmes de cogénération dans un très large spectre de puissance : depuis quelques kilowatts (micro-cogénération domestique) jusqu'à plusieurs mégawatts (immeubles collectifs, commerces, bâtiments publics ou industriels).

Ce type d'installation de cogénération bénéficie également en théorie d'un meilleur rendement que par moteur ou turbine

Avec cette technologie, le gaz naturel est, dans un premier temps, employé pour générer de l'hydrogène. Le mélange de l'hydrogène avec de l'oxygène produit une réaction électrochimique qui génère à son tour de l'électricité et de la chaleur. Ce processus est donc très écologique, car, en comparaison avec un système traditionnel, la quantité de CO₂ émis peut être jusqu'à 50 % plus faible.

Chapitre I : Recherche bibliographique sur la pile à combustible

La chaleur et l'électricité produites dans les différents systèmes de cogénération peuvent s'appliquer à différents secteurs :

- les sites industriels de la chimie, du papier, de l'automobile, de la métallurgie, de l'agroalimentaire.
- les serres agricoles.
- les laiteries, les blanchisseries.
- des bâtiments administratifs et commerciaux.
- les scieries et menuiseries.
- des bâtiments scolaires.
- des lots d'immeubles...

L'électricité générée est alors le plus fréquemment consommée sur place pour répondre aux besoins de fonctionnement du site. Alors que la chaleur, peut servir à alimenter un circuit de chauffage dans des industries, des entreprises, des hôpitaux, des bâtiments publics, des locaux d'habitation individuels ou collectifs. Elle peut aussi servir à la production d'eau chaude sanitaire.

I.13 L'objectif de notre travail

Est d'introduire ce genre de système dans un habitat .mais cela nécessite de prendre en compte certains paramètres intervenant dans les caractéristiques et le fonctionnement de la pile à combustible.

I.14 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté un aperçu global sur le fonctionnement, alimentation et l'application de la pile à combustible. Ce « background » théorique et bibliographique sert d'apport pour connaître le fonctionnement du système PAC.

Dans le chapitre suivant on va entamer les caractéristiques intervenant le fonctionnement de la PAC.

CHAPITRE II
Dimensionnement de pile PEMFC

II.1 Introduction

Avec la diminution des réserves d'énergies fossiles, la cogénération est en effet devenue la nouvelle solution énergétique à envisager. La cogénération peut représenter un complément essentiel pour les centrales et les industries, mais également pour l'habitat individuel grâce à la micro-cogénération.

L'objectif de notre travail consiste la micro cogénération intégrée dans une habitation (maison individuelle) apparaît aujourd'hui comme une solution efficace pour chauffer une maison et réduire sa dépendance envers les fournisseurs d'électricité.

Dans ce chapitre nous allons faire une étape de dimensionnement d'un chalet.

II.2 Caractéristiques électrique des piles à combustible

La caractéristique électrique d'une pile à combustible est déterminée par le nombre de cellules en série, définissant la tension totale et par la taille de la surface active, déterminant le courant délivré. La membrane électrolytique, l'élément de base de toutes les piles à combustible ne produisant qu'une tension assez faible, de l'ordre de 0,7 [V], il faut en empiler plusieurs pour obtenir une tension suffisante. Les performances en découlent comme suit : le nombre de membranes fixe la tension, la surface de membranes fixe l'intensité du courant, le produit des deux fixes la puissance. Le rendement global (toutes pertes des auxiliaires prises en compte) varie (selon les piles) de 35 à 55 % en production électrique. Si la production de chaleur est utilisée (cogénération) le rendement peut atteindre 75 à 90 %. Ces résultats sont d'autant plus intéressants que l'efficacité est largement indépendante de la charge lorsque celle-ci varie de 20 à 100 % [23].

II.2.1 Rendement énergétique

Le rendement énergétique de la PAC est très élevé puisqu'il ne se voit pas limité par le cycle de Carnot. Le combustible est directement transformé en électricité sans passer par le stade thermique. Le rendement est défini par le rapport entre l'énergie électrique produite directement utilisable, W_{elec} ou Δ_G , et l'énergie thermique libérée par la réaction chimique, Δ_H [24]. Le rendement théorique maximal d'une PAC peut donc s'écrire sous la forme (II.1) :

$$\eta_{\text{Théorique}} = \frac{W_{elec}}{\Delta_H} = \frac{m_{Elec} \times F \times E_{PAC_MAX}}{\Delta_H} = \frac{\Delta_G}{\Delta_H} = 1 - \frac{T_{PAC} \times \Delta_S}{\Delta_H} \quad (\text{II.1})$$

Ce rendement réversible théorique est très élevé. Par exemple, à 25°C, il peut atteindre 83 % pour de l'eau liquide, et 95% pour de l'eau sous forme gazeuse. Cependant,

Chapitre II : Dimensionnement de la pile PEMFC

dans la réalité, cette valeur n'est pas atteignable, car les surtensions et résistances de la PAC font chuter le rendement lorsqu'un courant s'établit [24]. Ce rendement qui est représenté par la tension de sortie est donné par l'équation (II.2) :

$$\eta_{\text{réversible}} = \frac{E_{PAC}}{E_{PAC_MAX}} \quad (\text{II.2})$$

En conséquence, pour une tension de sortie de 0.7 V à 25 °C et de l'eau sous forme liquide ($E_{PAC_MAX} = 1.23$), la valeur sera $0.7/1.23 = 57\%$. En considérant l'énergie et la puissance de la PAC, il faut introduire un autre rendement : le rendement faradique. En effet, le nombre d'électrons réellement échangés, $n_{\text{elec_réel}}$, n'est pas exactement celui estimé par la consommation en comburant et combustible, $n_{\text{elec_the}}$ [24]. Le rendement faradique est calculé à l'aide de l'équation (II.3) :

$$\eta_{\text{Faradique}} = \frac{n_{\text{elec_réel}}}{n_{\text{elec_the}}} \quad (\text{II.3})$$

Cela est dû aux réactions électrochimiques parallèles et aux réactions chimiques entre les espèces réactives catalysées et les matériaux d'électrodes. Pour le cas d'une PEM, alimentée en oxygène et hydrogène, on peut considérer que le rendement faradique est égal à 1.

Dans les cas où le combustible est fourni en excès pour prévenir tout déficit des réactifs, un autre coefficient affecte le rendement : le rendement de matière, $\eta_{\text{matière}}$. La valeur est habituellement de 95%, car on considère que presque tout réagit.

On arrive enfin au rendement du système, $\eta_{\text{système}}$. Le conditionnement de la PAC demande une grande quantité d'énergie qui peut être fournie par la PAC elle-même lors du régime permanent, ou par des sources auxiliaires d'énergie, lors des transitoires. Cette consommation dépend des auxiliaires employés : compresseur, reformeur, ventilateurs, circuit de refroidissement, valves[24]. Il est calculé en utilisant la formule ci-dessous (II.4) :

$$\eta_{\text{système}} = \frac{P_{\text{nette}}}{P_{\text{brute}}} = \frac{P_{PAC}}{P_{PAC} + P_{AUX}} \quad (\text{II.4})$$

Où :

P_{AUX} : Puissance demandée par les auxiliaires.

P_{PAC} : Puissance nette fournie par la PAC.

En définitive, le rendement global du générateur sera calculé par l'équation (II.5) :

$$\eta_{PAC} = \eta_{Théorique} \cdot \eta_{Réversible} \cdot \eta_{Faradique} \cdot \eta_{Matière} \cdot \eta_{Système} \quad (II.5)$$

Si l'on compare cette valeur à celle obtenue pour d'autres sources d'énergie comme le moteur thermique classique, la micro turbine ou le générateur diesel, la PAC affiche un net avantage.

Il va sans dire que l'exploitation de la chaleur produite, $P_{Chaleur}$, conduit à un rendement énergétique global encore plus grand. Cela conduit à une plage de valeurs comprise entre 36 et 80% [24]. L'équation (II.6) permet d'évaluer la chaleur produite.

$$P_{Chaleur} = P_{Totale} - p_{Electronique} = (E_{MAX} I_{PAC}) - (V_{PAC} I_{PAC}) = [(E_{MAX} - V_{PAC}) \cdot I_{PAC} \quad (II.6)$$

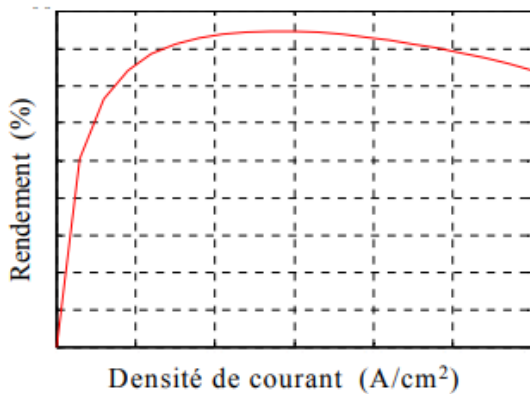


Figure II.1 Rendement en fonction de la densité de courant d'une PAC, générique.

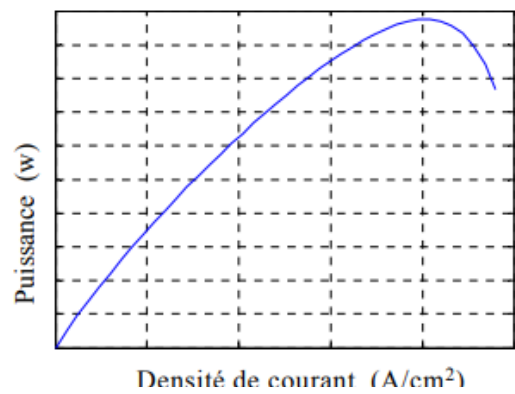


Figure II.2 Puissance en fonction de la densité de courant d'une PAC, générique.

II.2.2 Densité de courant

La réaction électrochimique étant des réactions de surface, la densité de courant est donc une grandeur caractéristique d'une pile à combustible. Elle est exprimée en ampères par centimètre carré (ramenée à la surface physique de l'électrode). Elle est fonction de nombreux paramètres (type de pile à combustible, débit de combustible, etc.) [17].

II.2.3 Tension réelle :

La tension théorique est celle d'une pile à combustible en circuit ouvert ne débitant pas. Lorsque l'on relie les bornes de la pile à combustible à la charge, elle sera traversée par un courant d'intensité i , la tension aux bornes de la pile diminue par rapport à la

Chapitre II : Dimensionnement de la pile PEMFC

tension théorique suite aux phénomènes de polarisation dont on distingue trois formes [17].

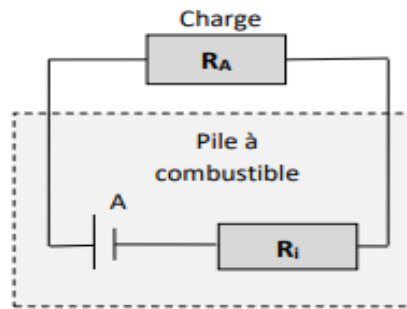


Figure II.3 Equivalent électrique d'une pile à combustible.

- **Polarisation d'activation** qui concerne la diffusion des ions à l'interface électrode /électrolyte (transfert de charges).
- **polarisation de résistance** qui est la résultante de la résistance électrique des différents éléments de la pile et surtout de l'électrolyte.
- **Polarisation de la concentration** de l'électrolyte autour des électrodes. Les trois différentes zones illustres dans la figure II.4 suivante:

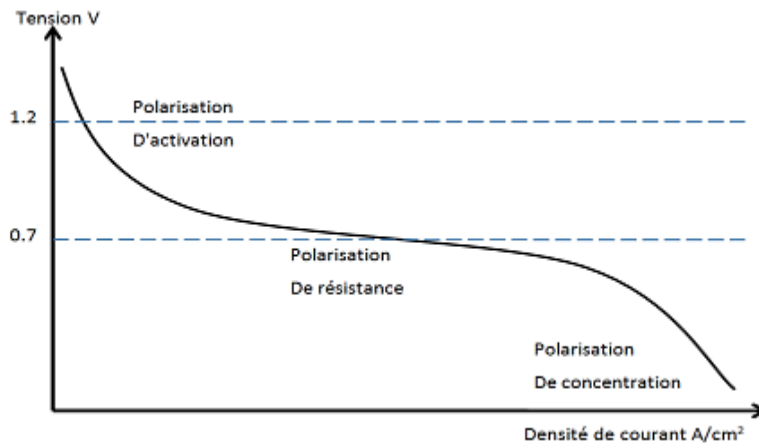


Figure II.4 Influence de la polarisation sur la tension.

Zone 1 : pour les faibles densités de courant le transfert de charge à la cathode est prédominant ; le potentiel est fonction de $\ln(j)$, les autres termes de l'équation caractéristique sont négligeables.

Zone 2 : pour les densités de courant moyennes, la courbe caractéristique suit un régime linéaire, la chute ohmique (principalement due à la résistance de l'électrolyte R_e) est prépondérante.

Zone 3 : à densité de courant élevée, la tension de cellule est gouvernée par le transport de matière par diffusion. Lorsque s'approche de l'une des deux densités de courant limites j_{la} ou j_{lc} , l'épuisement de matière active au voisinage des électrodes conduit à l'effondrement de la tension de cellule. Le fonctionnement de la pile dans cette zone peut engendrer des dégradations au niveau des matériaux d'électrode.

Pour éviter toute détérioration de la pile à combustible, on limite habituellement le fonctionnement de la pile à une tension seuil. La densité de courant débitée correspondante dépend alors de la composition des électrodes.

II.2.4 Nécessite une zone de température spécifique pour un fonctionnement constant

Les piles à combustible à hydrogène fonctionnent mieux lorsqu'elles sont maintenues en dessous de 212 ° F. Cela rend ces piles à combustible difficiles à intégrer dans certaines technologies, y compris les technologies automobiles actuelles. Le moteur moyen d'un véhicule fonctionne dans une plage de température pouvant dépasser 220 °F. Certains appareils électroménagers, comme un four, seraient également incompatibles avec cette technologie.

II.2.5 La pression

La pression de fonctionnement est déterminée par les propriétés mécaniques de la cellule, ainsi que par les sources utilisées en hydrogène et en oxygène / air. Le sous-système d'écoulement des gaz contrôle la pression de sortie à l'anode $P_{out a}$ et à la cathode $P_{out c}$ [25].

II.2.6 Les débits des gaz

Les valeurs de référence pour les débits d'écoulement dépendent de la densité de courant de la pile à combustible et d'un facteur de sur-stœchiométrie [25]. La sur-stœchiométrie en temps réel peut être calculée en utilisant les relations suivantes:

$$\lambda_a = \frac{F_{in,a}}{F_{utilisé,a}} \quad \lambda_c = \frac{F_{in,c}}{F_{utilisé,c}} \quad F_{utilisé, a \text{ ou } c} = \frac{M}{nF} I$$

Avec M la masse molaire (H₂ ou air), n le nombre d'Electron échangé, F la constante de Faraday.

$F_{in, c}$ étant le débit d'entrée à la cathode, $F_{in, a}$ étant le débit d'entrée à l'anode, débits mesurés à l'aide d'un débitmètre $F_{utilisé, a}$ et $F_{utilisé, c}$ sont les débits de l'air et d'hydrogène consommés respectivement [25]. Ils sont calculés à partir du courant I de la pile à combustible (I en ampères), en utilisant la relation suivante [25] :

$$F_{utilisé, a} = 1.0510^{-8} I \text{ (kg/s)} \quad F_{utilisé, c} = 3.57 \times 10^{-7} \text{ (kg/s)}$$

II.2.7 Humidité relative des gaz

Le sous-système d'humidification est essentiellement chargé de contrôler la température du point de rosée de l'anode et de la cathode. L'humidification des écoulements de gaz à l'anode et à la cathode aide à bien humidifier la membrane, améliorant ainsi sa conductivité protonique. Une faible température de point de rosée peut entraîner un assèchement de la membrane, tandis qu'une température de point de rosée supérieure à la température du stack pourrait provoquer une condensation de l'eau et un noyau au niveau des électrodes et des canaux d'alimentation [25].

II.3 la cogénération

La cogénération peut se découper en deux mots : "co" signifiant "ensemble" et "génération" voulant dire "production".

La cogénération consiste à produire et à utiliser simultanément de l'électricité et de la chaleur à partir d'une même énergie primaire et au sein de la même installation. Elle se base sur le fait que la production d'électricité (à partir d'un moteur thermique ou d'une turbine) dégage une grande quantité de chaleur habituellement inutilisée [27]. La cogénération valorise cette chaleur afin d'atteindre un rendement énergétique global pouvant atteindre 85%.

Une installation classique obtient un rendement électrique d'environ 35%, tandis que le reste de l'énergie (65%) est perdu sous forme de chaleur. Dans un système en cogénération, 30 à 35% de l'énergie primaire est transformée en électricité grâce à un alternateur, tandis que 65% se retrouve sous forme de chaleur, dont 50 à 55% est récupérée pour chauffer un circuit d'eau au travers d'un échangeur. Cette eau peut être utilisée pour le chauffage des bâtiments, de l'eau chaude sanitaire, ou pour des procédés industriels. L'électricité produite sera quant à elle consommée sur place ou revendue sur le réseau électrique public [27].

Chapitre II : Dimensionnement de la pile PEMFC

La cogénération permet ainsi d'optimiser la consommation du combustible initial et de réduire les rejets de gaz à effet de serre. Toutefois, les installations de cogénération doivent produire au plus près des lieux de consommation car la chaleur se transporte mal [27].

La cogénération peut être utilisée à grande échelle (installations industrielles, centrales électrothermiques...), ainsi qu'à petite échelle : dans le résidentiel, la micro-cogénération peut produire une base de chaleur et d'électricité [27].

C'est la production d'électricité, la chaleur étant aussi récupérée, à partir d'une seule source d'énergie primaire et en utilisant le même équipement [27]. (Voir Figure II.1)

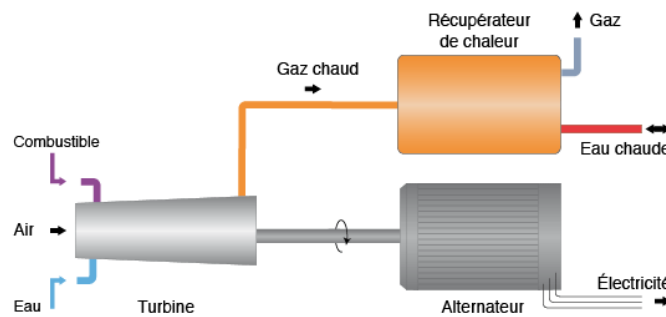


Figure II.5 Principe de fonctionnement de la cogénération.

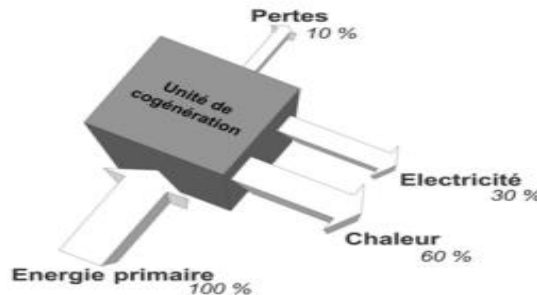


Figure II.6 Principe de la cogénération.

II.3.1 Échelle de puissance pour cogénération

La cogénération de petite puissance (micro-cogénération ou μ -cogénération) couvre en général les besoins depuis une maison individuelle jusqu'à ceux d'un groupe de maisons ou d'un petit immeuble, bureau, hôtel, magasin, PME, clinique, piscine, école.

Selon la définition européenne (directive 2004/8/CE du Parlement européen), la micro-cogénération couvre une puissance allant jusqu'à 50 kWél [28].

II.4 Micro-cogénération

Plus largement employée à un niveau industriel, la cogénération peut être utilisée à plus petite échelle. On parle alors de chaudière « micro-cogénération ». Celle-ci, d'une puissance inférieure à 36 kVA, s'adresse aux particuliers qui peuvent y recourir pour remplacer leur chaudière. Son utilisation dans les logements individuels est encore marginale. On la retrouve la plupart du temps dans des immeubles résidentiels, des hôpitaux ou pour chauffer des installations telles qu'une piscine. Elle permet de réaliser des économies de l'ordre de 45 % concernant l'électricité et de 25 % pour le gaz.

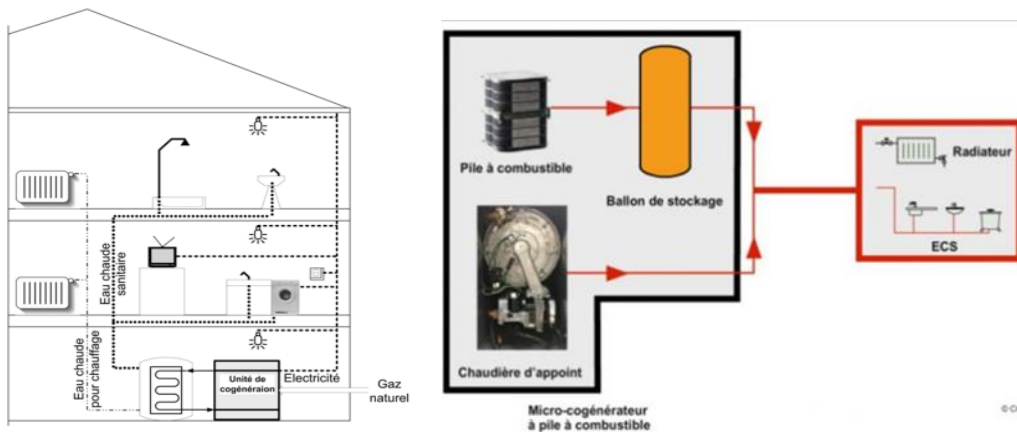


Figure II.7 Utilisation de la micro-cogénération à l'échelle d'une maison individuelle

Figure II.8 le schéma qui explique le principe de fonctionnement de micro-cogénération à pile à combustible

II.4.1 Micro-cogénération avec pile à combustible

La pile à combustible est aujourd'hui la solution de micro-cogénération la plus performante du marché. Elle présente une efficacité énergétique accrue de par un nombre limité d'étapes nécessaire à la transformation du gaz naturel en énergies électrique et thermique [29].

Lorsqu'elle est intégrée à une centrale de cogénération, la pile à combustible nécessite différents éléments périphériques indispensables à son fonctionnement :

- la qualité des réactifs.
- la bonne gestion du circuit de refroidissement et des émissions de polluant.
- la régulation du système de chauffage et de production de l'électricité en fonction des demandes de l'habitation et des saisons [29].

Chapitre II : Dimensionnement de la pile PEMFC

Les lois de dimensionnement permettent de déterminer la puissance de chaque composant et la capacité des unités de stockage. Dans les systèmes PAC-H₂, le dimensionnement permet aussi d'utiliser au maximum le stockage. Il est essentiel de prendre en compte le profil électrique ainsi que sa consommation lorsqu'on envisage l'installation d'une pile à combustible.

II.5 Principe de fonctionnement du système PAC dans le chalet

Notre système de cogénération production électricité et chaleur est composé de plusieurs éléments et dispositifs intégrés dans un processus en chaîne chronologique.

Phase 1 : injection du METHANE (CH₄) qui est le principal constituant du gaz naturel avec la vapeur d'eau et haute température, pression entre 20 et 30 bars cette réaction produit du CO₂ et du DIIYDROGENE (H₂).

Phase 2 : le dihydrogène produit de la phase 1 est stocké dans le réservoir il est utilisé par la pile à combustible dans une réaction oxydo-réduction qui nous produit de l'électricité eau et chaleur.

Phase 3 : l'électricité produite de la pile et un courant continu en doit le convertir par l'utilisation de dispositif onduleur. La chaleur et l'eau émises et condensées puis injectées dans la tuilerie pour l'utiliser au besoin quotidien du chalet.

Nous illustrons ce processus dans le schéma synoptique suivant :

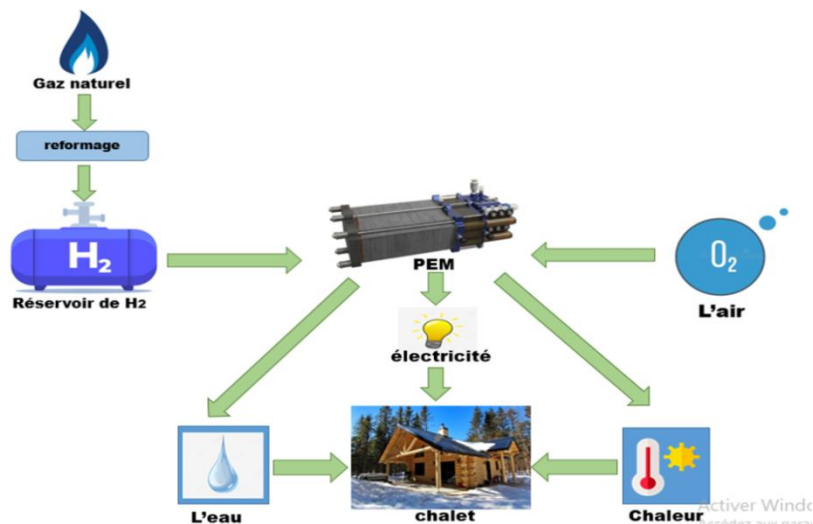


Figure II.9 schéma synoptique d'alimentation en cogénération d'un chalet via PEMFC.

II.6 Choix du site

Un chalet dans la région de Tikjda a Bouïra connecté au gaz naturel.

Les coordonnées géographiques de cette région sont :

Tikjda est une station de ski située dans une chaîne de montagnes nommée Djurdjura, au nord de l'Algérie, à une altitude de 1 600 mètres (5 250 pieds), dans la province de Bouïra.

- Latitude : 36.316.
- Longitude : 4.122

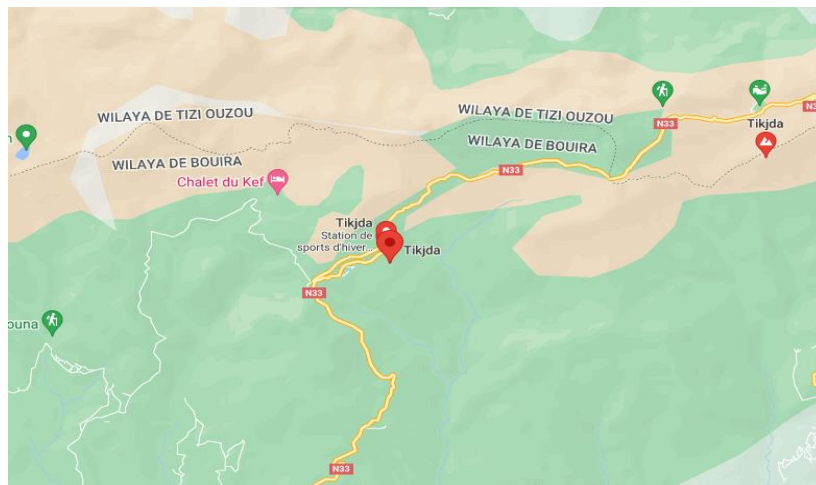


Figure II.10 la carte géographique de tikjda à wilaya de bouïra.

Le chalet est habitable uniquement pendant la période hivernale par quatre personnes.

D'après ces données là nous avons choisi une alimentation en électricité pour les besoins journalier du chalet, donc via la technologie de PAC à gaz naturel.

II.7 Besoins journalier du chalet

On a un chalet se compose d'un seul étage qui contient deux chambres et une cuisine un salon et douche avec sanitaire donc :

- Les dimensions :
 - Deux chambres ($4\text{ m}^2 \times 3\text{ m}^2$) totale = 24 m^2
 - Le salon ($3\text{ m}^2 \times 4\text{ m}^2$) totale = 12 m^2
 - La cuisine ($3\text{ m}^2 \times 3\text{ m}^2$) totale = 9 m^2
 - La douche et sanitaire ($2\text{ m}^2 \times 2\text{ m}^2$) totale = 4 m^2
 - Le couloir ($3\text{ m}^2 \times 2\text{ m}^2$) totale = 6 m^2

Chapitre II : Dimensionnement de la pile PEMFC

Totale = 55 m² (la figure montre le plan du chalet).

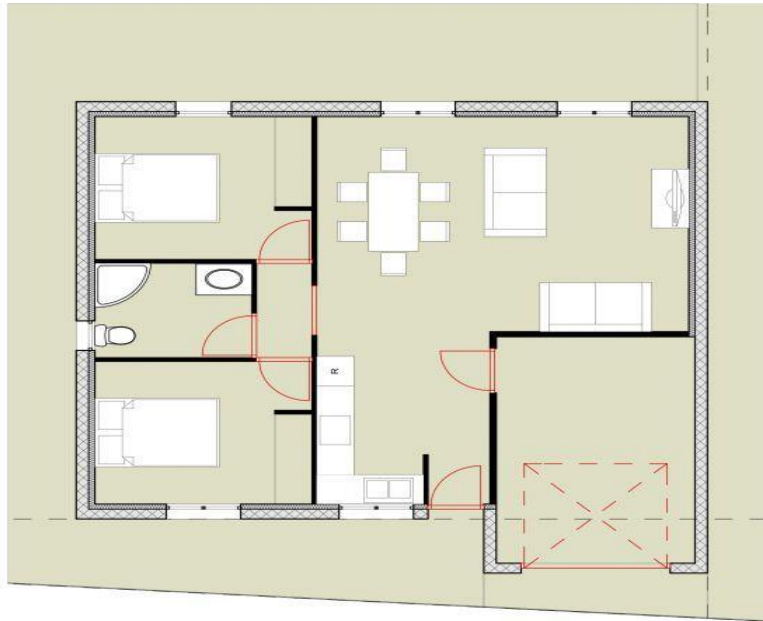


Figure II.11 le plan du chalet.

II.7.1 Besoins en électricité

Tableau II.1 : exemple de besoins en électricité

Appareils	Le nombre d'appareils	Fréquence d'utilisation (h/J)	Puissance en (W)	Totale (Wh/J)
Lampes LED	7	12	25	2100
Lampes extérieurs	4	12	25	1200
Machine à laver	1	2	2400	4800
Réfrigérateur	1	24	150	3600
Télévision	1	10	75	750
Micro portable	2	4	30	240
Chargeur de téléphone	4	5	10	200
Totale	20	69	3000	12890

Chapitre II : Dimensionnement de la pile PEMFC

II.7.2 Besoin en eau

La consommation journalière d'eau pour 4 personnes mentionnées dans le tableau II.2 ci-dessous :

Tableau II.2 : exemple de besoins en eau

Douche et sanitaire	Vaisselle	Se laver les mains	Machine à laver	L'eau pour boire	Totale (litres/jour)
80 litres	25 litres	4 litres	15 litres	8 litres	132Litres

II.8 Besoins thermique

Le calcul d'un bilan thermique permet de connaître avec précision la quantité d'énergie qu'il faudra pour chauffer et refroidir un local, la justesse de ce calcul est primordiale non seulement pour le coût de l'installation, mais aussi pour son exploitation [30].

Les éléments entrant en compte dans ce calcul sont nombreux, il faudra connaître la nature, l'exposition, la surface des murs, des parois vitrées, des plafonds, des sols, ces éléments étant multipliés par des coefficients variables selon l'altitude, le rayonnement solaire, la localisation géographique [30].

Ici nous nous arrêterons à deux méthodes de calcul simplifiées qui permettent de faire une évaluation de ses déperditions [30].

➤ Méthode de calcul par coefficient G :

Le G est le coefficient de déperdition volumique de la maison, il s'exprime en Watt par mètre cube et par degré. Ce coefficient est actuellement remplacé par le coefficient Ubat, mais le calcul par le coefficient G reste néanmoins pratique d'utilisation, mais d'une fiabilité relative.

$$\text{Bilan} = G \times V \times \Delta T$$

G : coefficient de déperdition globale (W/m³. °C).

- 0,65 W/°C m³ isolation norme RT 2005.
- 0,75 W/°C m³ isolation norme RT 2000.
- 0,9 W/°C m³ constructions après 1980.

Chapitre II : Dimensionnement de la pile PEMFC

- 1,2 W/°C m³ constructions moyennement isolées.
- 1,8 W/°C m³ constructions non isolées.

V : volume de la maison (m³).

ΔT : différence de température entre l'intérieur (19 ou 20°), et l'extérieur (Température de base hiver du lieu d'habitation).

➤ Méthode de calcul par le coefficient Ubat :

Déperditions = $D_p \times (19 - T_{\text{ext base}})$

Il faudra d'abord calculer la valeur de D_p qui est le coefficient de déperditions de la maison (W/K).

$D_p = U_{\text{bat}} \times S_{\text{dép}} + R \times V_h$

Ubat : représente la déperdition thermique totale moyenne de la maison (toutes parois) (W/m².K), pour une précision optimale ce coefficient se calcule pour chaque paroi, mura, bâti...etc [30]

Valeur empirique d'Ubat :

- 0,3 : maison avec une isolation exceptionnelle.
- 0,4 : excellente isolation sans ponts thermique.
- 0.75 : pour les maisons à isolation conventionnelle "RT2005" et réalisées entre 2007 et 2012
- 0.8 : pour les maisons à isolation conventionnelle "RT2000" et réalisées entre 2001 et 2006
- 0.95 : pour les maisons construites entre 1990 et 2000
- 1.15 : pour les maisons construites entre 1983 et 1989
- 1.4 : pour les maisons construites entre 1974 et 1982
- 1.8 : maison non isolée (murs, combles) et à menuiseries simples vitrage.

Sdép : somme des surfaces des parois [m²].

Vh : volume habitable de la zone traitée [m³].

Chapitre II : Dimensionnement de la pile PEMFC

R : coefficient fonction du type de ventilation.

VMC autoréglable : $R = 0,2$.

VMC hygroréglable : $R = 0,14$.

19 : Température de confort.

T ext base : Température extérieure de base du lieu d'habitation.

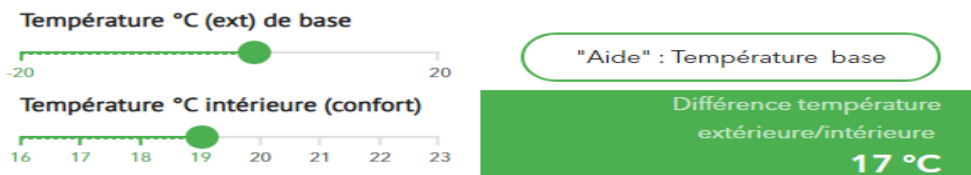
✓ **Calcul de bilan thermique par un simulateur :**

Le rôle de ce simulateur est pour faciliter le calcul de bilan thermique de manière directe et précise.

Bilan thermique, chauffage seul

1) Températures de base et de confort

Sélectionner la température de base hiver du lieu de votre résidence et votre température de confort. Pour choisir la température de base hiver voir l'aide .



2) DJU et performance de votre isolation

DJU du lieu de votre habitation
Pour déterminer les Dju voir l'aide !

2.5

"Aide" : Table DJU

Performance de votre isolation

Isolation RT 2012 (construction à partir 2013)

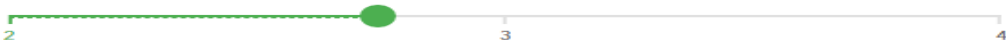
DJU : On utilise les degrés-jours-unifiés pour calculer les consommations de chauffage d'une année sur l'autre ce qui permet de connaître le degré de sévérité d'un hiver dans un lieu donné.

La formule : $DJU = 18 - (T_{min} + T_{max}) / 2$

Chapitre II : Dimensionnement de la pile PEMFC

3) Volume des pièces

Hauteur sous plafond (généralement 2.5 m)



Pièce 1 (en m)

4

3

Pièce 2 (en m)

4

3

Pièce 3 (en m)

3

4

Pièce 4 (en m)

3

3

Pièce 5 (en m)

2

2

Pièce 6 (en m)

3

2

Pièce 7 (en m)

Pièce 6 (en m)

3

2

Pièce 7 (en m)

Longueur

Largeur

Pièce 8 (en m)

Longueur

Largeur

Volume habitation

148.50 m³

Puissance à installer

1.06 Kw

Déperditions totales

0.88 Kw/m³/°C

Consommation annuelle (prévision)

2.49 Kwh/an

Figure II.12 simulateur de bilan thermique.

II.9 Choix de la technologie

La technologie est choisie selon les Besoins journalier du chalet, selon ces besoins nous avons choisi la technologie Vitovalor PT2.

II.9.1 Principe de fonctionnement de PEM Vitovalor PT2

La Vitovalor PT2 est une chaudière à pile à combustible qui utilise le principe de fonctionnement de la production combinée chaleur-électricité et produit ainsi aussi bien de l'électricité que de la chaleur. Pour produire de l'électricité et de la chaleur, la pile à combustible a besoin, outre d'oxygène, également encore d'hydrogène, celui-ci ayant été préalablement extrait de gaz naturel [31].

La technique, développée et optimisée spécialement pour les maisons individuelles, fonctionne avec un rendement global très élevé et est conçu pour un mode de fonctionnement optimisé en termes d'électricité [31].

La production d'électricité et de chaleur par le chauffage par pile à combustible Vitovalor PT2 est fondée sur une réaction électrochimique des deux éléments oxygène et hydrogène. Une combustion telle qu'elle se produit dans les chaudières conventionnelles n'a pas lieu, raison pour laquelle le processus est également désigné comme une combustion froide. Si l'hydrogène se rencontre massivement dans la nature, ce n'est pas sous la forme dans laquelle il est utilisé pour la combustion froide dans la Vitovalor. C'est pourquoi il doit d'abord être extrait du gaz naturel. En fonction des besoins, Vitovalor PT2 peut fonctionner avec du gaz naturel. Le gaz combustible acheminé traverse un reformeur installé dans l'unité, et est transformé en hydrogène à l'aide d'un catalyseur dans une réaction à deux étages. La transformation produit d'abord un mélange d'hydrogène et de monoxyde de carbone. Ce n'est que dans la deuxième purification du gaz que le monoxyde de carbone devient du dioxyde de carbone [31].

L'hydrogène ainsi obtenu est tout d'abord amené dans la pile à combustible. Ensuite, un catalyseur sur le côté anode le divise en ions positifs et en électrons négatifs. Ces derniers se déplacent de l'anode vers la cathode via un conducteur électrique et produisent ainsi un courant continu. L'inverseur intégré le transforme en courant alternatif, avant d'alimenter le réseau électrique. Simultanément, les ions chargés positivement arrivent dans la cathode et y réagissent avec l'oxygène. La chaleur dégagée lors de cette réaction est absorbée par les canaux de refroidissement remplis d'eau de l'empilement de piles à combustible et transmise à un échangeur de chaleur. L'énergie thermique ainsi obtenue

Chapitre II : Dimensionnement de la pile PEMFC

peut être utilisée pour le chauffage des pièces ou la production d'eau chaude sanitaire. Le craquage en ions chargés positivement et en électrons chargés négativement empêche en outre une réaction de gaz détonant [31].

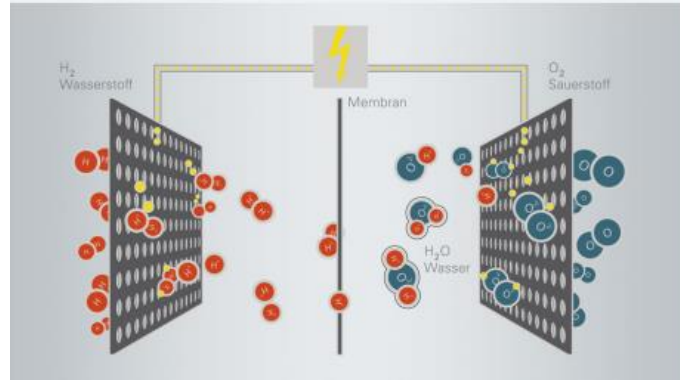


Figure II.13 principe de fonctionnement de Vitovalor PT2.

Les piles à combustible vitovalor PT2 sont commercialisées et destinées à la production d'énergie domestique. Elle a produit de 0,75kW, la pile à combustible est parfaitement adaptée aux nouvelles constructions, En plus de la production d'eau chaude sanitaire, la pile à combustible va produire de l'énergie thermique, mais aussi de l'énergie électrique. Elle doit fonctionner 22 h et se régénérer 2 h. Elle fonctionne avec de l'hydrogène et de l'air, système où l'hydrogène est obtenu depuis le gaz naturel grâce à un dispositif de traitement du gaz intégré [32].

II.9.2 Caractéristiques de pile à combustible vitovalor Pt2 (Voir annexe 2) :

- Pile à combustible : 0,75 kWel, 1,1 kWth.
- Chaudière d'appoint : 11,4/19,0/24,5/30,8 kWth.
- Technologie d'avenir innovante.
- Réservoir d'eau chaude en acier inoxydable de 220 litres.
- Écologique – économies de CO2 par rapport à la production classique d'électricité et de chaleur.
- Utilisation idéale dans les maisons individuelles nouvelles et existantes.
- Production parallèle d'électricité et de chaleur pour réduire les dépenses énergétiques.

Chapitre II : Dimensionnement de la pile PEMFC

- La séparation du système intégrée au moyen de l'échangeur de chaleur à plaques et du serpentín garantit un fonctionnement sûr et robuste.
- Suivi et contrôle à distance via l'application ViCare.
- Compacité et encombrement réduit : surface d'installation de 0,72 m² seulement.
- Technologie d'avenir et écologique : réduction de la facture énergétique et réduction des émissions de CO₂ par rapport à la production classique d'électricité et de chaleur.
- Fonctionnement de la pile très silencieux, système sans pièce en mouvement.
- Classe d'efficacité énergétique chauffage : A++
- Classe d'efficacité énergétique production d'eau chaude sanitaire : A+

II.9.3 Couvrir les besoins d'un foyer (chalet)

La pile à combustible offre avec 25,2 Kwh th, assez d'énergie pour couvrir les besoins de chauffage d'une maison individuelle. Les 16,5 kWh el d'énergie produits durant la journée peuvent subvenir aux besoins de base d'un foyer [32].

II.9.4 La production simultanée de l'électricité et de la chaleur

La Vitovalor PT2 a une puissance de 1,1 kW, la pile à combustible couvre la majeure partie des besoins calorifiques. S'il faut plus de chaleur les journées froides, la chaudière gaz à condensation s'enclenche automatiquement. La Vitovalor PT2 produit en même temps un maximum de 15 kWh d'électricité par jour, ce qui suffit pour couvrir les besoins de base de la plupart des foyers et permet de faire des économies considérables en coûts d'électricité [32].

II.9.5 La construction de la pile à combustible Vitovalor PT2

Vitovalor PT2 se compose de deux unités : un module à pile à combustible et un module gaz à condensation pour couvrir les charges de pointe. Les deux unités peuvent être transportées séparément l'une de l'autre et permettent de ce fait un montage rapide, même dans des caves exigües. Dans la première unité de Vitovalor, installée par Panasonic, se trouvent notamment le reformeur, l'inverseur et l'empilement de piles à combustible (une juxtaposition de nombreuses piles à combustible). Avant que le courant continu produit par la pile à combustible ne soit injecté dans le réseau électrique de l'habitation, l'inverseur le convertit en courant alternatif.

Chapitre II : Dimensionnement de la pile PEMFC

La deuxième unité de Vitovalor PT2 sert en première instance à couvrir les besoins en chaleur en périodes de charge de pointe. À savoir quand la température extérieure est très froide ou quand une grande quantité d'eau chaude est demandée en peu de temps. Elle se compose d'une chaudière gaz à condensation avec régulation pour la marche en fonction de la température extérieure ainsi que d'un réservoir d'eau chaude en acier inoxydable. Les autres composants sont l'hydraulique ainsi qu'un compteur électrique.

Les deux unités sont alimentées via une conduite de gaz commune. Elles partagent également un système d'échappement commun, si bien que l'encombrement n'est pas supérieur à celui d'une chaudière murale gaz à condensation [32].

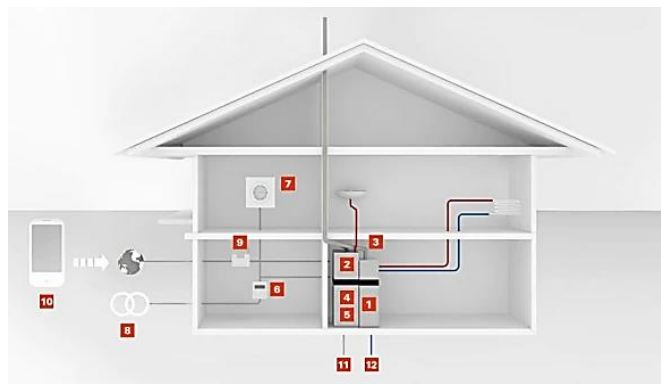


Figure II.14 Vitovalor PT2 en maison individuelle.

- [1] Module pile à combustible.
- [2] Chaudière d'appoint avec ballon d'eau chaude sanitaire en acier inoxydable de 220 litres.
- [3] Conduit d'évacuation des fumées/amenée d'air.
- [4] Compteur électrique intégré.
- [5] Interface de communication.
- [6] Armoire de commande.
- [7] Réseau électrique domestique.
- [8] Lampes extérieurs.
- [9] Internet.
- [10] Vitotrol App.
- [11] Gaz naturel.
- [12] Eau. [32]

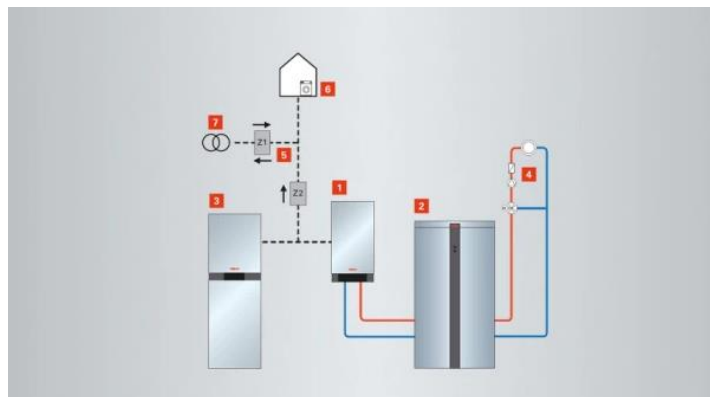


Figure II.15 Vue du système.

- [1] Chaudière à micro-cogénération.
- [2] Réservoir tampon d'eau primaire Vitocell 340-M.
- [3] Système de stockage d'énergie Vitocharge.
- [4] Circuit de chauffage.
- [5] Compteur électrique.
- [6] Réseau électrique à domicile / Consommateur.
- [7] Réseau public.

II.9.6 Commande à distance

La commande à distance grâce à Vicare App peut se faire :

- Sur une tablette ou un PC, affichage détaillé des informations de la chaudière et de la pile à combustible.
- Réglages des consignes et de la programmation horaire.
- Bilan énergétique et affichage des consommations.

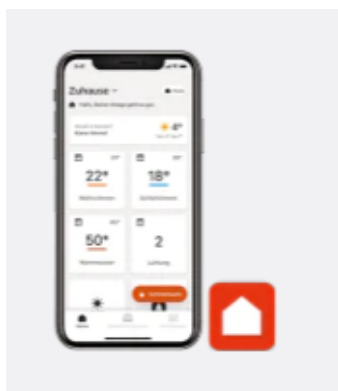


Figure II.16 Commande à distance du chauffage par pile à combustible par App.



Figure II.17 Dessin en coupe Vitovvalor PT2.

[1] Chaudière gaz à condensation pour couvrir les charges de pointe.

[2] Régulation pour la marche en fonction de la température extérieure avec grand écran tactile couleur 7 pouces.

[3] Module de pile à combustible.

II.10 Besoin en hydrogène

On a estimé les besoins en électricité de notre chalet après dimensionnement

- sans insertion pile vitovvalor pt2

On utilise la règle :

1 litre d'hydrogène → 2.4 kWh

X litres → 13 kWh

$$X = \frac{(1 \times 13)}{2.4} = 5.41 \text{ litres}$$

D'après la règle on a trouvé 5.41 litres d'hydrogène.

Donc 5.41 litres d'hydrogène → 13 kWh

- Avec pile vitovvalor pt2 :

1 litre d'hydrogène → 2.4 kWh

X litres → 16.5 kWh

Chapitre II : Dimensionnement de la pile PEMFC

$$X = \frac{(1 \times 16.5)}{2.4} = 6.87 \text{ litres}$$

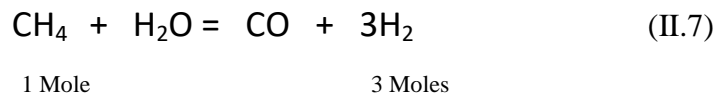
D'après la règle on a trouvé 6.87 litres d'hydrogène.

Donc 6.87 litres d'hydrogène \longrightarrow 16.5 kWh

II.11 Besoin en CH₄

Puisque les conditions ne sont pas précises, on va prendre les conditions normales de T et P (CNTP°).

A ces conditions, le volume occupé par n'importe quel gaz = 22,4 litres



H₂O est vapeur surchauffée,

Donc, mole de CH₄ est nécessaire pour produire 3 moles d'H₂

C'est-à-dire 22,4 litres de CH₄ sont nécessaires pour produire 3x 22,4 litre d'H₂

$$\begin{array}{ccc} 22,4 \text{ L de CH}_4 & \longrightarrow & 67,2 \text{ L d'H}_2 \\ \text{X Litres} & \longrightarrow & 6.87 \text{ litres} \\ \text{X} = \frac{(7 \times 22.4)}{67.2} & = & 2.22 \text{ litres} \end{array}$$

2, 22 litres de CH₄ sont nécessaires pour produire 6.87 litres d'H₂

Pour récapituler les informations ainsi obtenues, on propose le tableau II.3 ci-dessous :

Tableau II.3 récapitulation des paramètres de la pile Vitovalor pt2

	Consommation	Caractéristiques de pile Vitovalor pt2
Puissance électrique	12.89 KWh	16.5 KWh
Puissance thermique	1.06 kWth	1,1 kWth
Besoin en eau	132 Litres	220 Litres
Besoin en hydrogène	6.66 Litres	?
Besoin en CH ₄	2.22 Litres	?
Fonctionnement	24heurs	fonctionner 22 h et se régénérer 2 h

II.12 Conclusion

Ainsi que l'avons vu les piles à combustible apparaissent comme d'excellentes solutions technologiques pour les applications cogénération. A ce jour, dans le cas de la micro-cogénération domestique, la majeure partie des vents de nouveaux systèmes concernent les technologies pile à combustible. Il est donc légitime aujourd'hui de dire que cette technologie a désormais atteint la maturité techno-économique. La production décentralisée de l'électricité par la micro cogénération dans le secteur de l'habitation est une solution qui permet premièrement d'économiser l'énergie et préserver les réserves fossiles et deuxièmement de réduire les émissions du CO₂.

Dans ce chapitre nous avons fait le dimensionnement d'un chalet dans la région de Tikjda a Bouïra, Nous avons calculé les besoins en électricité, les besoins en eau et les besoins thermique de notre chalet, à travers ces calculs, nous avons choisi la technologie PEM vitovalor pt2 qui répond à nos besoins.

CHAPITRE III
Modélisation et simulation de la pile
PEMFC

III.1 Introduction

Pour subvenir aux besoins en énergie qui occupe une position stratégique dans toutes les activités humaines, et tenir compte de l'augmentation de la demande énergétique, le développement des nouvelles sources d'énergie qui pourraient être une solution énergétique du futur est devenu une nécessité.

Les systèmes qui interviennent dans la production et la transformation de l'hydrogène qui est un vecteur énergétique de futur, on trouve les piles à combustible, leur modélisation prend une part très importante dans leur développement car cela facilite la compréhension des phénomènes mis en jeu en leur sein. Il existe ainsi un grand nombre de modèles de piles à combustible, qui ont généralement chacun leurs propres spécificités et utilités, suivant les phénomènes étudiés. La modélisation offre un outil notable et indispensable pour approuver la conception et la performance des piles à combustible.

PEM d'une part, et à la présentation d'un exemple de simulation qui permette la détermination de la courbe de polarisation et celle de la puissance d'une pile à combustible PEM, ainsi la variation des pertes d'activation en fonction de courant, la chose qui permettra de bien comprendre les phénomènes essentiels qui se déroulent dans une pile à combustible.

III.2 Caractéristique tension - courant d'une PAC

Ce paragraphe étudie la réponse électrique en régime stationnaire de la PAC.

L'énergie électrique de la PAC dépend du déplacement des charges électriques (ions et électrons) entre l'anode et la cathode lors de la réaction chimique. Cette réaction implique une variation d'entropie, ΔS [kJ/(mol K)] et une enthalpie libre appelée énergie libre de Gibbs ΔG [J/mol]. Cette variation d'enthalpie est la partie récupérable du travail sous la forme d'énergie électrique. Une autre partie, $T_{PAC} \Delta S$, est l'énergie transformé en chaleur. Cela est représenté par l'équation (III.1)

$$\Delta G = \Delta H - T_{PAC} \Delta S \quad (III.1)$$

Avec :

ΔH : Variation de l'enthalpie de la réaction ou chaleur de réaction à pression constante, J/mol.

T_{PAC} : Température de fonctionnement de la PAC, K.

Chapitre III : Modélisation et simulation de la pile PEMFC

En sachant que ΔG correspond à m_{elec} mols d'électrons (2) mises en jeu lors de la réaction, la tension maximale de la cellule en circuit ouvert, $E_{\text{PAC MAX}}$, est donnée par l'équation (III.2).

$$\Delta G + m_{\text{elec}} F E_{\text{PAC MAX}} = 0 \quad (\text{III.2})$$

Où :

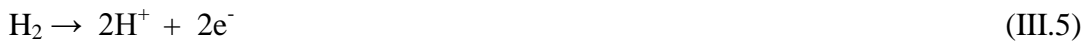
F est la constante de Faraday, 96485 C.

La variation de l'enthalpie libre dépend de la température et de la forme, liquide ou gazeuse, de l'eau obtenue. Dans des conditions standards de fonctionnement (pression : 10^5 Pa et température : 25 °C), la variation d'enthalpie libre est égale à $\Delta G = -237$ kJ pour chaque mole d'hydrogène consommée avec de l'eau liquide. Avec de l'eau gazeuse, sa valeur est égale à 229 kJ/mol H_2 . La tension obtenue est :

$$E_{\text{PACMAX}} = -\frac{-237.10^3}{2 \times 96485} = 1.23 \text{V} \quad \text{Eau liquide.} \quad (\text{III.3})$$

$$E_{\text{PACMAX}} = -\frac{-229.10^3}{2 \times 96485} = 1.18 \text{V} \quad \text{Eau sous forme de gaz.} \quad (\text{III.4})$$

En tenant compte de la réaction anodique (III.5) :



La valeur de tension maximale peut s'écrire sous la forme de l'équation (III.6) [Ger-96].

$$E^0 = E_{\text{PAC_MAX_Standard}} + \frac{\Delta S_{\text{standard}}}{2F} (T - 298.15) \quad (\text{III.6})$$

Où :

$\Delta S_{\text{Standard}}$ et $E_{\text{PAC_MAX_standard}}$ représentant respectivement sont la variation d'entropie standard (-0.164 kJ/(mol K)) et la tension maximale réversible standard (1.23 V). E^0 est le potentiel thermodynamique d'équilibre à une température quelconque (inférieure à 100°C). Cette tension maximale diminue, lorsque la température augmente. Les pressions partielles instantanées des gaz (P_{H_2} et P_{O_2}) influencent également la différence de potentiel selon la **loi de Nerst**.

$$E_{Rev} = E^0 + \frac{R \cdot T_{PAC}}{2 \cdot F} \ln \left(\frac{P_{H_2}}{P_0} \sqrt{\frac{P_{O_2}}{P_0}} \right) \quad (III.7)$$

Où :

P_0 est la pression standard, 10^5 Pa, E_{Rev} correspond au potentiel thermodynamique réversible de la réaction, R est la constante de gaz parfait qui vaut 8.314 [J·mol⁻¹·K¹] ou [kg·m²·s⁻²·mol⁻¹·K⁻¹].

Cependant, lorsque la cellule débite un courant, I_{PAC} , cette tension de sortie diminue selon l'équation (III.8). Cela est dû à plusieurs irréversibilités, décrites ci-dessous.

- **Surtensions d'activation à la cathode** η_{act_c} et à l'anode η_{act_a} . Cela résulte du contrôle d'une électrode par une cinétique électrochimique lente. Les surtensions d'activation sont directement liées à la vitesse des réactions électrochimiques. Elles sont plus élevées à la cathode.
- **Pertes ohmiques.** Elles traduisent les résistances au transport des électrons et des protons. Les pertes relatives au transport d'électrons ont lieu dans les plaques bipolaires, les interfaces de contact et dans la partie conducteur électronique des électrodes. La résistance électronique est habituellement constante, tandis que la résistance protonique est proportionnelle au courant et dépend fortement de l'état de la membrane. Les pertes se localisent dans la membrane principalement. Le calcul de ces pertes se fait avec la loi d'Ohm :

$$\text{Pertes ohmiques} = (R_{\text{électronique}} + R_{\text{protonique}}) I_{PAC}^2 = R_t I_{PAC}^2 \quad (III.8)$$

- **Surtension de concentration, η_{con} .** Dès qu'une espèce réactive est consommée dans l'électrode, une perte de potentiel se produit due à l'incapacité du matériau de maintenir la concentration. Donc, un gradient de répartition de la concentration de l'espèce existe dans l'électrode volumique. Cette surtension est particulièrement importante pour de fortes densités de courant. Notons que dans ce cas, apparaît également une limitation de potentiel dû au noyage des électrodes comme le montre dans l'équation (III.9)

$$V_{PAC}(I_{PAC}) = E_{Rev} - |\eta_{act_a}(I_{PAC})| - |\eta_{act_c}(I_{PAC})| - R_t \cdot I_{PAC} - |\eta_{con}(I_{PAC})| \quad (III.9)$$

La réponse électrique d'une cellule est influencée par tous ces phénomènes. Chacun d'eux est prépondérant selon la valeur de la densité du courant. La Figure III.1 illustre la réponse électrique en régime stationnaire qui est une image du rendement.

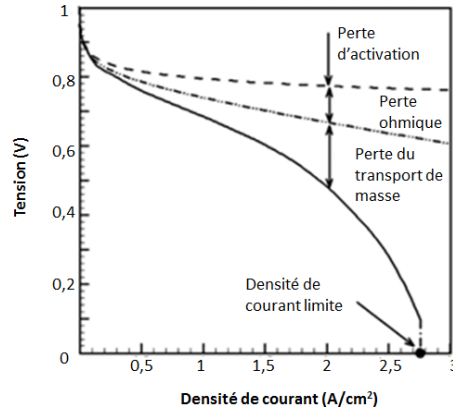


Figure III.1 Exemple de courbe de polarisation

Cette courbe de polarisation permet de constater que la diminution des surtensions à la cathode et de la résistance de la membrane sont des points fondamentaux en vue d'une amélioration des performances.

III.3 La modélisation de la pile à combustible

III.3.1 Modèle mathématique

Le modèle mathématique de la pile à combustible PEM est illustré à la figure (III.2). Le modèle est utilisé pour analyser les caractéristiques statiques et dynamiques de la pile à combustible PEM[34].

Selon la loi de tension de Kirchhoff, la tension de sortie d'une seule pile à combustible PEM peut être trouvée par l'équation (III.10) :

$$V_F = E_{NL} - V_{RA} - V_{RC} - V_{RO} \quad (\text{III.10})$$

Où :

V_F : Tension de sortie de la pile à combustible.

E_{NL} : Pas de tension de charge de la pile à combustible.

V_{RA} : Chute de tension due à la perte d'activation.

V_{RC} : Chute de tension due à une perte de concentration.

V_{RO} : Chute de tension due à une perte ohmique.

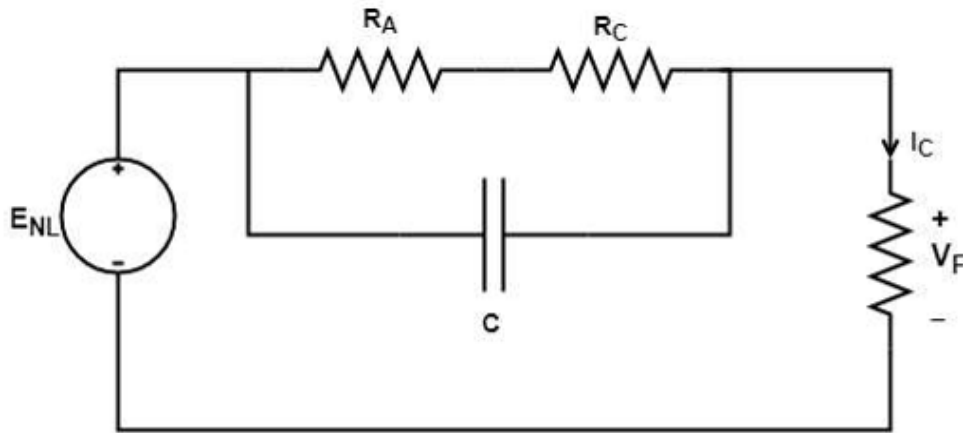


Figure III.2 modèle électrochimique simplifié de pile à combustible PEM

L'absence de charge de la pile à combustible définit sa tension réversible et est donnée par l'équation (III. 11)

$$E_{NL} = 1.23 - 8.5 \times 10^{-3} \times (T - 298) + 4.31 \times 10^{-5} \times \left[\ln(P_1) + \frac{1}{2} (P_2) \right] \quad (\text{III. 11})$$

P_1 : Pression partielle d'hydrogène.

P_2 : Pression partielle d'oxygène.

T : température de cellule.

La chute de tension due à la perte d'activation est donnée par l'équation (III.12) :

$$V_{RA} = -[\ell_1 + \ell_2 \times T + \ell_3 \times T \times \ln(CO_2)] \quad (\text{III.12})$$

Le bloc de pile à combustible Stack implémente un modèle générique paramétré pour représenter les types les plus populaires de piles à combustible alimentées en hydrogène et en air.

Le bloc représente deux versions du modèle de pile : un modèle simplifié et un modèle détaillé .nous pouvons basculer entre les deux modèles en sélectionnant le niveau dans le masque sous Niveau de détail du modèle dans la boîte de dialogue du bloc.

III.3.1.1 Le modèle simple

Le modèle simplifié représente une pile à combustible particulière fonctionnant dans des conditions nominales de température et de pression. Les paramètres du circuit équivalent peuvent être modifiés en fonction de la courbe de polarisation obtenue à partir de la fiche technique du fabricant. Il suffit de saisir dans le masque la valeur de la tension à 0 et 1 A, les points de fonctionnement nominal et maximal, pour que les paramètres soient calculés. Une diode est utilisée pour empêcher le flux de courant négatif dans la pile.

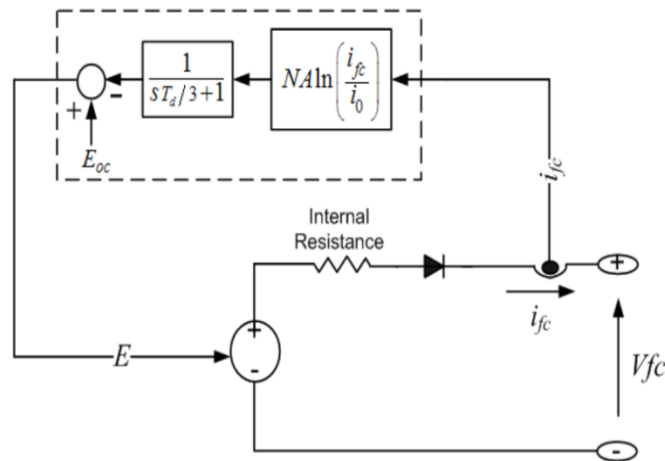


Figure III.3 Circuit électrique équivalent de la pile à combustible

III.3.1.2 Modèle détaillé

Le modèle détaillé représente une pile à combustible particulière lorsque les paramètres : pressions, température, les compositions et les débits de carburant et d'air varient. Nous pouvons sélectionner les paramètres à faire varier dans le volet Variation du signal de la boîte de dialogue de bloc. Ces variations affectent la tension en circuit ouvert (E_{oc}), le courant d'échange (i_0) et la pente de Tafel (A). E_{oc} , i_0 et A sont modifiés comme suit :

$$E_{OC} = K_c E_n \quad (III.13)$$

$$i_0 = \frac{zFK(P_{H_2} + P_{O_2})\Delta V - \frac{-\Delta G}{KT}}{R_h} \quad (III.14)$$

$$A = \frac{RT}{z\alpha F} \quad (III.15)$$

$$R = 8.3145 \text{ J/(mol K)}$$

$$F = 96485 \text{ A s/mol}$$

Chapitre III : Modélisation et simulation de la pile PEMFC

z : Nombre d'électrons en mouvement

E_n = tension de Nernst, qui est la tension thermodynamique des cellules et dépend des températures et des pressions partielles des réactifs et des produits à l'intérieur de la pile (V).

α = coefficient de transfert de charge, qui dépend du type d'électrodes et de catalyseurs utilisés

P_{H_2} = Pression partielle d'hydrogène à l'intérieur de la cheminée (Pa)

P_{O_2} = Pression partielle d'oxygène à l'intérieur de la cheminée (Pa)

k = constante de Boltzmann = $1,38 \times 10^{-23}$ J/K

h = constante de Planck = $6,626 \times 10^{-34}$ J s

Δv = Facteur volumique de la barrière d'activation (m³). La taille de la barrière d'activation

(ΔG) est calculée en supposant que $\Delta v = 1$ m³.

ΔG = Taille de la barrière d'activation qui dépend du type d'électrode et de catalyseur utilisé (J/mol) .

T = Température de fonctionnement (K).

K_c = Constante de tension dans les conditions nominales de fonctionnement.

Le circuit équivalent est le même que pour le modèle simplifié, sauf que les paramètres E_{oc} , i_0 et A doivent être mis à jour en ligne comme indiqué dans la figure (III.4) :

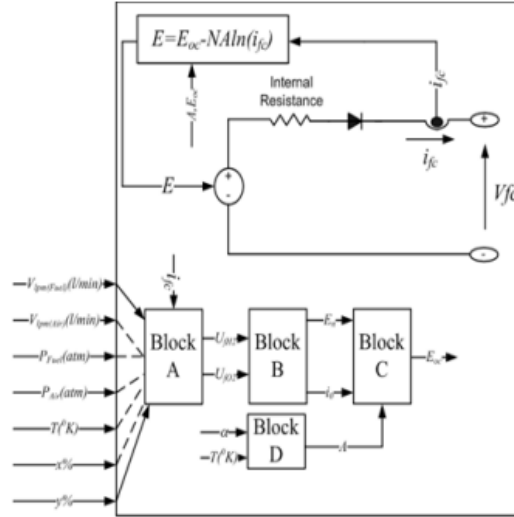


Figure III.4 Modèle simplifié de pile à combustible

Les taux de conversion (utilisations) de l'hydrogène (U_{fH_2}) et de l'oxygène (U_{fO_2}) sont déterminés dans les équations (III.16),(III.17)

$$\left\{ U_{fH_2} = \frac{n^r_{H_2}}{n^{in}_{H_2}} = \frac{60000RTNi_{fc}}{zFP_{fuel}V_{Ipm}(fuel)\chi\%} \right. \quad (III.16)$$

$$\left\{ U_{fO_2} = \frac{n^r_{O_2}}{n^{in}_{O_2}} = \frac{60000RTNi_{fc}}{2zFP_{air}V_{Ipm}(air)y\%} \right. \quad (III.17)$$

P_{fuel} = pression d'alimentation absolue du carburant (atm)

P_{air} = pression d'alimentation absolue de l'air (atm)

$V_{Ipm}(\text{carburant})$ = Débit de carburant (l/min)

$V_{Ipm}(\text{air})$ = Débit d'air (l/min)

x = Pourcentage d'hydrogène dans le carburant (%)

y = Pourcentage d'oxygène dans le comburant (%)

N = nombre de cellules La constante 60000 provient de la conversion du débit litre/min

utilisé dans le modèle en m³/s (1 litre/min = 1/60000 m³/s). Les pressions partielles et la tension de Nernst sont déterminées comme suit :

$$\left\{ \begin{array}{l} P_{H_2} = (1 - u_{fH_2})x\%P_{fuel} \\ P_{H_2o} = (w + 2y\%u_{fO_2})P_{air} \\ P_{O_2} = (1 - u_{fO_2})y\%P_{air} \end{array} \right. \quad (III.18)$$

Et :

$$E_n = \begin{cases} 1.229 + (T - 298) \frac{-44.43}{zF} + \frac{RT}{zF} \ln(P_{H_2} P_{O_2}^{1/2}) & \text{lorsque } T \leq 100^\circ\text{C} \\ 1.229 + (T - 298) \frac{-44.43}{zF} + \frac{RT}{zF} \ln\left(\frac{P_{H_2} P_{O_2}^{1/2}}{P_{H_2O}}\right) & \text{lorsque } T > 100^\circ\text{C} \end{cases} \quad (\text{III.19})$$

P_{H_2O} : Pression partielle de vapeur d'eau à l'intérieur de la cheminée (atm)

W : Pourcentage de vapeur d'eau dans le comburant

A partir des pressions partielles des gaz et de la tension de Nernst, les nouvelles valeurs de la tension en circuit ouvert (E_{oc}) et du courant d'échange (i_0) peuvent être calculées.

Les paramètres α , ΔG et Kc sont calculés sur la base de la courbe de polarisation dans des conditions de fonctionnement nominales avec quelques paramètres supplémentaires, tels que le rendement à faible pouvoir calorifique (PCI) de la cheminée, la composition du carburant et de l'air, les pressions et températures d'alimentation. Ils peuvent être facilement obtenus à partir de la fiche technique du fabricant.

Les taux nominaux de conversion des gaz sont calculés comme suit :

$$U_{fH_2} = \frac{\eta_{nom} \Delta h^0(H_2O(gaz))N}{zFV_{nom}} \quad (\text{III.20})$$

$$U_{fO_2} = \frac{60000RT_{nom}NI_{nom}}{2zFP_{air}V_{Ipm(air)nom}^{0.21}} \quad (\text{III.21})$$

où:

η_{nom} = Rendement PCI nominal de la cheminée (%).

$\Delta h^0(H_2O(gaz)) = 241,83 \times 10^3 \text{ J/mol}$.

V_{nom} = tension nominale (V).

I_{nom} = Courant nominal (A).

$V_{Ipm(air)nom}$ = Débit d'air nominal (l/min).

P_{airnom} = Pression nominale absolue d'alimentation en air (Pa).

T_{nom} = Température de fonctionnement nominale (K).

A partir de ces taux de conversion, les pressions partielles nominales des gaz et la tension de Nernst peuvent être dérivées. Avec E_{oc} , i_0 et A connus et en supposant que la

Chapitre III : Modélisation et simulation de la pile PEMFC

pile fonctionne à des taux constants de conversion ou d'utilisations dans des conditions nominales, α , ΔG et K_c peuvent être déterminés.

S'il n'y a pas de combustible ou d'air à l'entrée de la cheminée, on suppose que la cheminée fonctionne à un taux fixe de conversion des gaz (taux de conversion nominal), c'est-à-dire que l'alimentation en gaz est ajustée en fonction du courant de sorte que ils sont toujours fournis avec juste un peu plus que nécessaire par la pile à n'importe quelle charge.

Le courant maximal que la pile peut fournir est limité par les débits maximaux de carburant et d'air qui peuvent être atteints. Au-delà de ce courant maximum, la tension de sortie de la pile diminue brusquement à mesure que davantage de courant est consommé.

La dynamique de la pile à combustible est représentée si vous spécifiez le temps de réponse et les paramètres de dynamique d'écoulement (utilisation maximale et sous-dépassement de tension correspondant) dans le volet Dynamique de la pile à combustible.

Le temps de réponse (T_d) 95% est utilisé pour modéliser le phénomène de "charge double couche" dû à l'accumulation de charges à l'interface électrode/électrolyte. Cela n'affecte que la tension d'activation comme indiqué sur les circuits équivalents.

Où :

$$E_n = \begin{cases} E_n - K (U_{fo_2} - U_{fo_2}(nom)) & U_{fo_2} > U_{fo_2}(nom) \\ E_n & U_{fo_2} \leq U_{fo_2}(nom) \end{cases} \quad (III.22)$$

K = constante de sous-dépassement de la tension

$U_{fo_2}(nom)$ = utilisation nominale d'oxygène

K est déterminé dans l'équation (III.23):

$$K = \frac{V_u}{K_c (U_{fo_2(peak)} - U_{fo_2(nom)})} \quad (III.23)$$

Les tests d'étape et d'interruption de courant doivent être effectués sur une pile réelle pour représenter avec précision sa dynamique.

La figure (III.5) ci-dessous montre la réponse de la pile à ces tests et les paramètres requis (T_d , U_{fO2} (pic) et V_u).

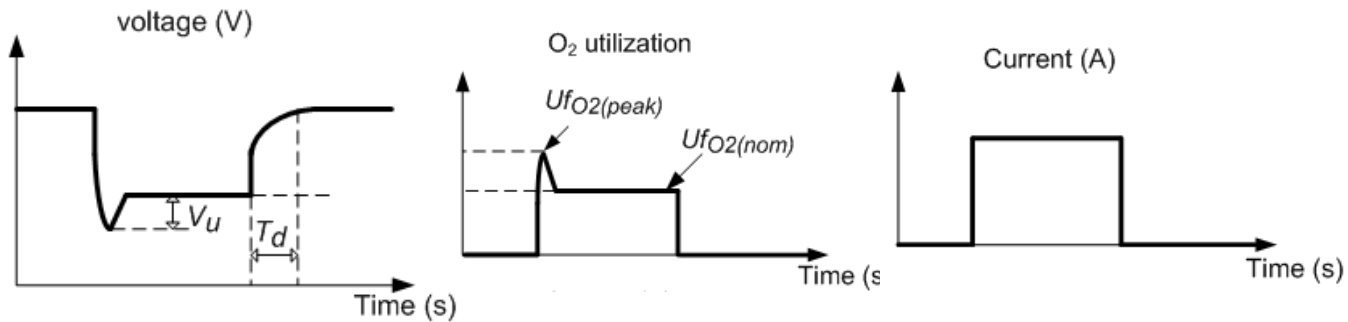


Figure III.5 la réponse de la pile à combustible

Le temps de réponse (T_d) dépend de la pile à combustible elle-même et est généralement indiqué sur la fiche technique. Les paramètres de dynamique d'écoulement (U_{fO2} (crête) et V_u) dépendent de la dynamique des équipements externes (compresseur, régulateur et charges) et ne sont pas fournis par les fabricants car leurs valeurs varient avec l'application de l'utilisateur. Pour la simulation, supposez des valeurs de U_{fO2} (crête) entre 60 % et 70 % et V_u entre 2 et 5 % de la tension nominale de la pile.

III.4 Paramètres de la fiche technique :

Pour cet exemple de pile à combustible de type PEMFC, on extrait les paramètres de la fiche technique du fabricant de pile NetStack PS6 utilisée .

La puissance nominale de la pile est de 6 kW et la tension nominale est de 45 V (voir dans l'annexe 1).

Les paramètres détaillés suivants sont déduits de la fiche technique.

- Tension à 0 A et 1 A [E oc ,V 1] = [65, 63]
- Point de fonctionnement nominal [I nom , V nom]=[133.3, 45]
- Point de fonctionnement maximal [I end ,V end]=[225, 37]
- Efficacité nominale de la cheminée (η nom) = 55 %
- Température de fonctionnement = 65 0 C
- Pression d'alimentation nominale [H2, Air]=[1,5 1]

Si la pression donnée est relative à la pression atmosphérique, ajouter 1 bar pour obtenir la pression absolue.

Chapitre III : Modélisation et simulation de la pile PEMFC

- Composition nominale (%) [H₂, O₂, H₂O(Air)] = [99.999, 21, 1]

Si l'air est utilisé comme oxydant, supposez 21 % d'O₂ et 1 % de H₂O au cas où leurs pourcentages ne seraient pas spécifiés.

- Nombre de cellules

S'il n'est pas spécifié, estimez-le à l'aide des formules (III.24):

$$N = \frac{2.96485 \cdot V_{nom}}{241,83 \cdot dix^3 \cdot \eta_{com}} \quad (III.24)$$

Dans ce cas :

$$N = \frac{2.96485 \cdot 45}{241,83 \cdot dix^3 \cdot 0,55} = 65,28 = 65 \text{ cellules}$$

- Débit d'air nominal

Si le débit d'air maximal est donné, le débit nominal peut être calculé en supposant une utilisation constante d'oxygène à n'importe quelle charge. Le courant consommé par la cellule dépend linéairement du débit d'air et le débit nominal est donné par la relation (III.25) :

$$V_{I_{p\ m(air)_{nom}}} = \frac{j_{e_{nom}} \cdot V_{I_{p\ m(air)_{maximum}}}}{j_{e_{fin}}} \quad (III.25)$$

Dans ce cas :

$$V_{I_{p\ m(air)_{nom}}} = \frac{133,3 \cdot 500}{225} = 297 \text{ litres/min.}$$

On suppose que le taux de conversion de l'oxygène est de 50 % (comme c'est généralement le cas pour la plupart des piles à combustible) et utilisez les formules (III.26) ci-dessous pour déterminer le débit d'air nominal.

$$V_{I_{p\ m(air)_{nom}}} = \frac{60000 R \cdot J_{nom} \cdot N \cdot j_{e_{nom}}}{2z \cdot F \cdot P_{air} \cdot 0,5 \cdot 0,21} \quad (III.26)$$

- Temps de réponse pile à combustible = 10 s

Note :

- Les paramètres [E_{oc}, V₁], [I_{nom}, V_{nom}] et [I_{end}, V_{end}] sont approximatifs et dépendent de la précision des points obtenus à partir de la courbe de polarisation. Plus la précision de ces paramètres est élevée, plus la tension de pile simulée est proche de la courbe de la fiche technique.

Avec les paramètres ci-dessus, la courbe de polarisation de la pile fonctionnant à un taux nominal fixe de conversion des gaz est fermée aux courbes de la fiche technique comme indiqué ci-dessous : La ligne pointillée bleue montre que la tension de pile simulée et la ligne pointillée verte montre la puissance de pile simulée.

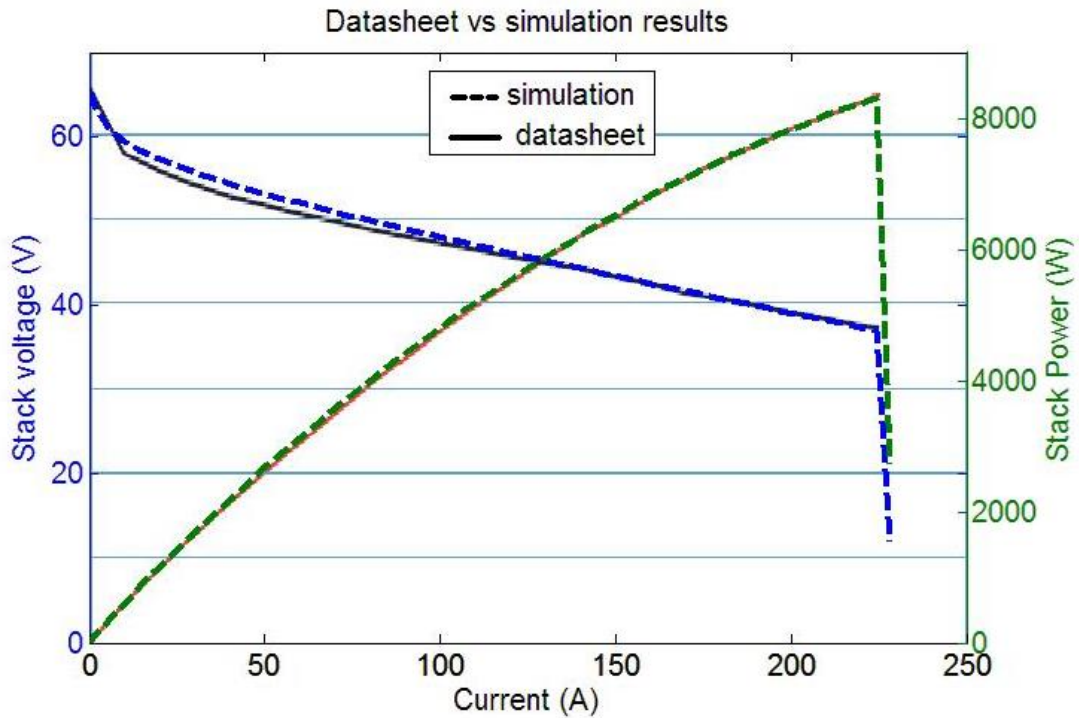


Figure III.6 la courbe de polarisation de la pile à combustible PEMFC

Au-dessus du courant maximal, le débit de gaz entrant dans la pile est maximal et la tension de la pile diminue brusquement à mesure que davantage de courant est consommé.

III.5 Modèle Simulink de pile à combustible PEM

Cet exemple montre le modèle d'empilement de pile à combustible à membrane échangeuse de protons (PEM) alimentant un convertisseur DC/DC de valeur moyenne de 100 Vdc.

La figure (III.7) montre le modèle complet de pile à combustible qui produit 6 kW et 45V DC. Le convertisseur élévateur DC/DC (Boost) régule la tension jusqu'à 100 v et il est chargé avec une charge RL pour visualiser le scénario en temps réel. La simulation a été effectuée pour obtenir les résultats des variations de l'efficacité de la pile à combustible lorsque les paramètres d'entrée de la pile à combustible sont chargés. Initialement pendant 10 secondes, l'entrée de carburant était constante, mais après 10 secondes, le commutateur

Chapitre III : Modélisation et simulation de la pile PEMFC

a changé la position et les paramètres d'entrée ont commencé à changer, tels que les changements de débit de carburant de 50 Imp. (litre par minute) à 85 Imp.

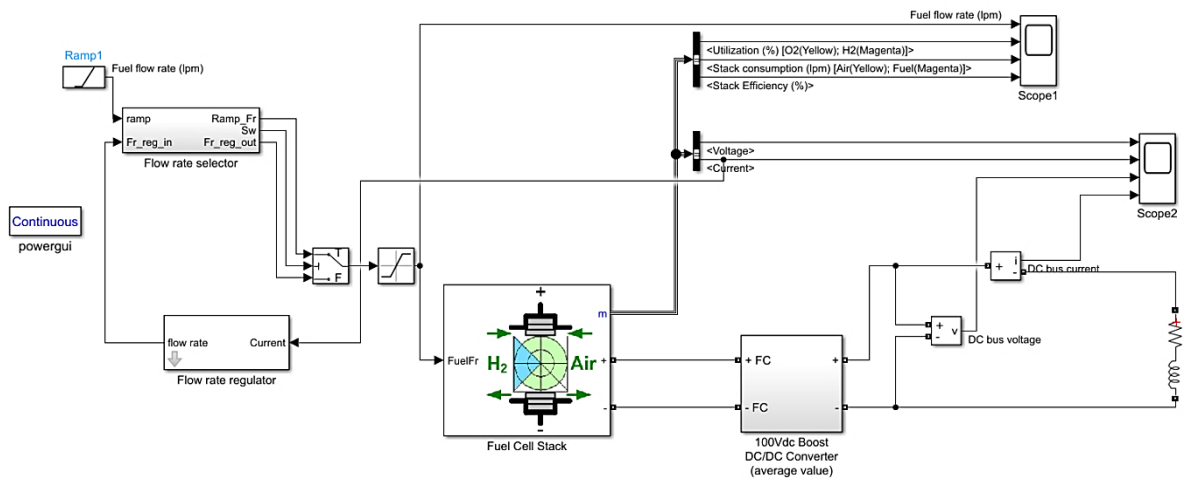


Figure III.7 Modèle Simulink de pile à combustible PEM

Le sélecteur de débit

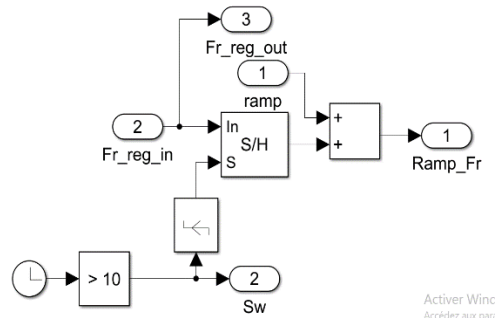


Figure III.8 schéma bloc 1 sélecteur de débit dans MATLAB SIMULINK

Le régulateur de débit

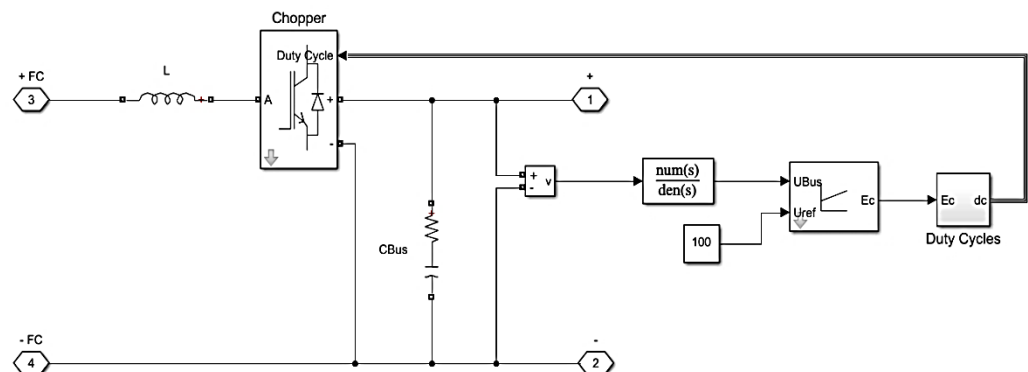
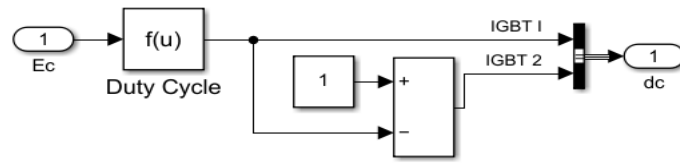


Figure III.9 schéma bloc 2 régulateur de débit dans MATLAB SIMILUNK

Le cycle de service :



FigureII.10 schéma bloc 3 du cycle de service

III.6 Résultats de la simulation du système à pile à combustible

Les résultats de la simulation obtenue sont réalisés sous l’environnement du logiciel Matlab/Simulink avec les paramètres physiques (donnés dans le Tableau III.1)

Tableau III.1 : Paramètres physiques de PEM

Paramètres du modèle pile à combustible PEM	
puissance de la pile	-Nominal = 5998.5 W - Maximale = 8325 W
Résistance de PEM	0.07833 ohms
tension d'une cellule	1.1288 V
Nominale utilisation d'Hydrogène H ₂	99.56%
Nominale utilisation d'Oxygène O ₂	59.3%
Nominale consommation du combustible H ₂	60.38 slpm
Nominale consommation de l'aire	143.7 slpm
Le courant	0.29197 A
Coefficient α	0.60645
Composition d'H ₂	99.95%
Composition d'O ₂	21%
Débit de carburant à utilisation nominale d'hydrogène	-Nominale = 50.06 Ipm -Maximale = 84.5 Ipm
Débit d'air à utilisation nominale d'oxydant	-Nominale = 300 Ipm -Maximale = 506.4 Ipm
Température [T]	338 Kelvin
Pression d'alimentation en carburant	1.5 bar
Pression d'alimentation en air	1 bar

III.7 Caractéristique courant-tension et courbe de puissance

Les différentes mesures de la tension de la pile à combustible pour une variation de courant permis de calculer la puissance de cette dernière, les résultats obtenus sont représentés en Figure (III.11)

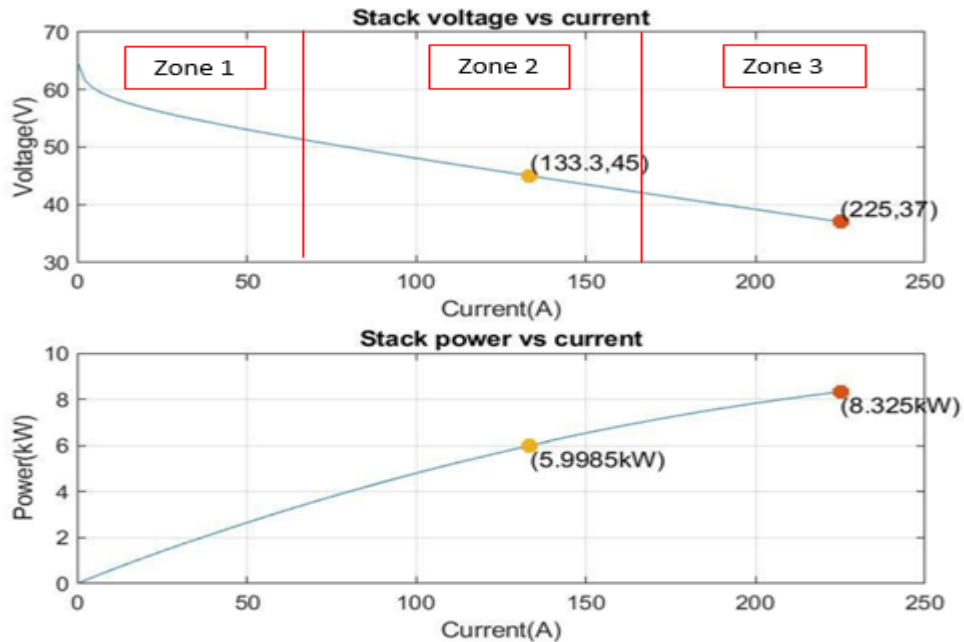


Figure III.11 courbe de polarisation de la pile à combustible

La figure(III.11) montre la courbe de polarisation d'une pile à combustible qui indique la variation de sa résistance avec ses flux de charge. En raison des caractéristiques inverses de la pile à combustible, provoque une chute de tension accrue en raison de l'augmentation des pertes chimiques internes.

Dans la première région, appelée région d'activation, la chute de tension est due à la lenteur de la réaction chimique à la surface des électrodes. La largeur de la région d'activation dépend de la température et de la pression de fonctionnement dans le système et donc du choix des types d'électrodes et du catalyseur.

La deuxième région, appelée région ohmique, indique les pertes résistives dues aux matériaux de résistance interne utilisés dans les empilements de piles à combustible ; anode, cathode et électrolyte.

Chapitre III : Modélisation et simulation de la pile PEMFC

Enfin, la troisième région est appelée région de concentration, ce qui indique les pertes de transport de masse dues au changement de concentration des réactifs, à mesure que le carburant s'épuise dans la pile.

La courbe de tension-courant présente une relation exponentielle entre 0 A et 133.3 A, au-delà de 133.3 A cette relation devient linéaire. Pour un courant de charge faible, la tension décroît exponentiellement avec le courant ascendant, ce processus exponentiel est caractéristique de tous les processus électrochimiques.

La courbe de puissance de la pile à combustible : pour un courant maximal de 225 A, la pile à combustible produit environ 9KW (puissance maximale). Si on fait une extrapolation des caractéristiques des courants plus importants (au-delà de 225 A), nous remarquons que la puissance maximale de la pile à combustible est élevée à traversé l'augmentation du nombre de cellules, et par conséquent le courant sera augmenté.

La tension et le courant de sortie de la pile à combustible est montré sur la figure (III.12)

La Figure (III.12) illustre la variation de tension et courant d'une stack de PEMFC en fonction du temps. On voit que la pile à combustible PEMFC atteint ce régime permanent tension = 50 V, courant = 140 après un temps de 10 sec.

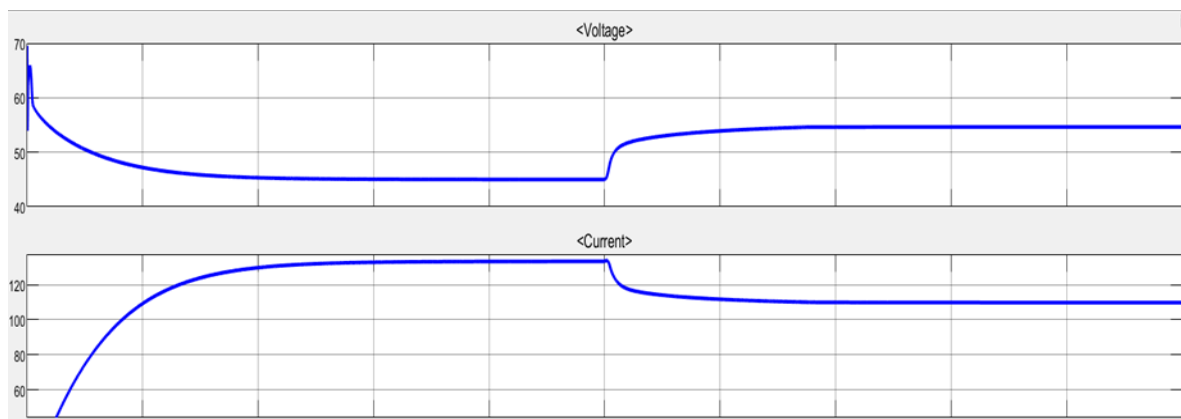


Figure III.12 tension et courant de pile à combustible

La tension de sortie de la pile à combustible est faible, par conséquent, le convertisseur élévateur est utilisé pour augmenter la tension continue et également pour réguler sa sortie, comme illustré à la figure (III.13). Initialement, au début de la simulation, il y a un pic jusqu'à 122 volt en raison de la moindre chute mais comme l'inducteur s'oppose au changement de courant et également à la fonction de transfert interfacée avec les

Chapitre III : Modélisation et simulation de la pile PEMFC

impulsions de l'IGBT, le rend stable et la tension reste constante. Après 10 s, l'alimentation en carburant est augmentée résultante de la tension, mais le régulateur la rend stable en 10 secondes et de la tension à la charge.

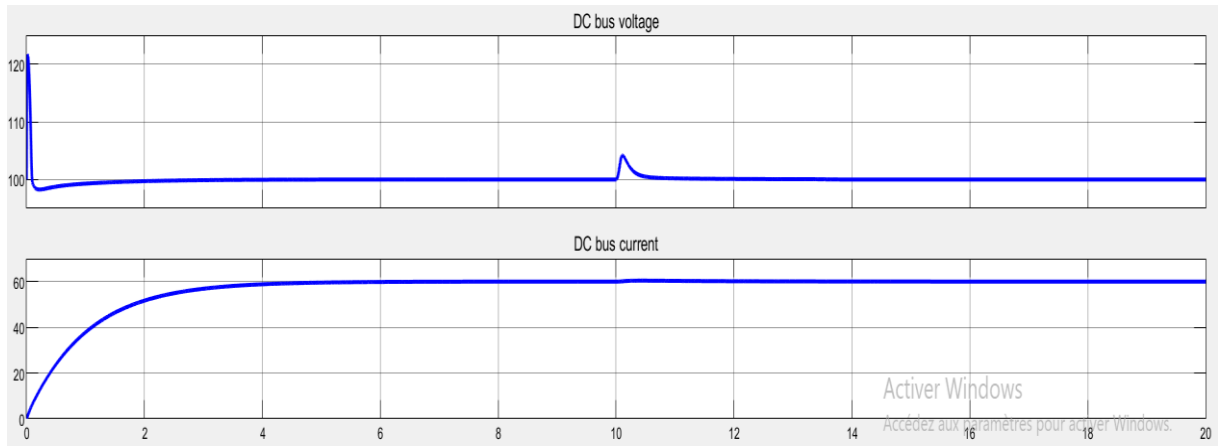


Figure III.13 Variation de tension et courant pour convertisseur élévateur DC/DC (Boost) en fonction de temps.

La figure (III.14) montre la quantité d'oxygène et d'hydrogène fournie à la pile en fonction de temps. Étant donné que 99,56 % de l'hydrogène du réservoir est fourni à la pile à combustible avec une utilisation constante de 60 % d'oxygène, comme le montre la figure (III.15), cela montre combien de H_2 et d' O_2 sont consommés pour donner une sortie. Au fur et à mesure que le débit varie, il doit y avoir des variations.

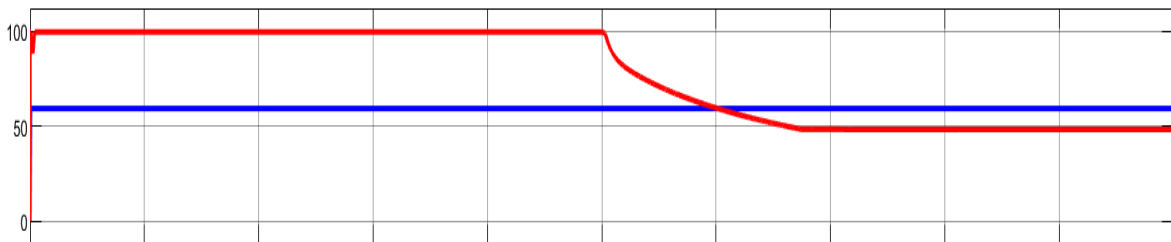


Figure III.14 utilisation de l'hydrogène et de l'oxygène

La courbe rouge (■) hydrogène H_2

La courbe bleue (■) oxygène O_2

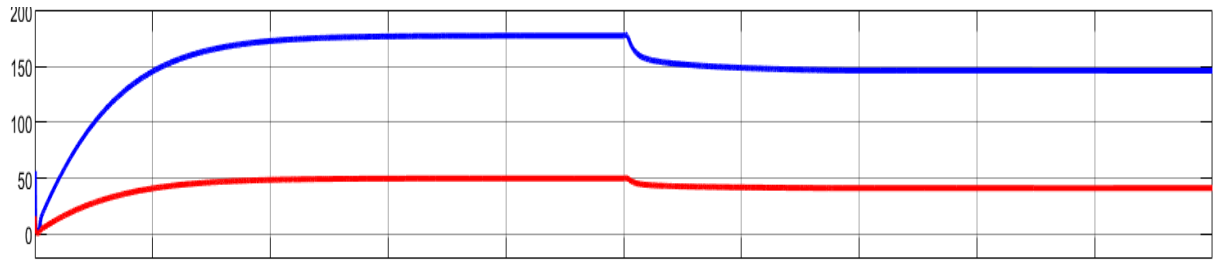


Figure III.15 consommation de la pile de combustible pour l'air et le combustible

La courbe bleue (■) l'air

La courbe rouge (■) le combustible H₂

La réaction lente dans la pile à combustible a donné plus de tension, donc son débit augmente et sa réaction de stabilité diminue. Donc, en raison de cette consommation d'hydrogène, le rendement du carburant diminue comme le montre la figure (III.16):

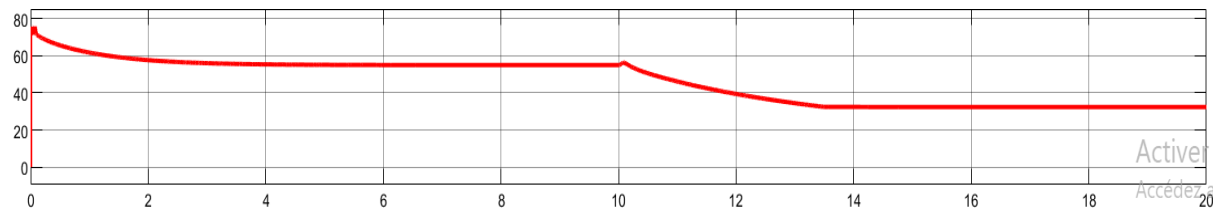


Figure III.16 rendement de pile à combustible

Rendement de la cellule PEM testée est de 55 %, mais lorsque le débit de carburant est lent, son rendement est diminué jusqu'à 32 %. Aussi la vitesse de réaction est faible et la pile ne s'active pas complètement comme le montre la figure (III.16). De plus, si le débit de carburant est augmenté, la pile à combustible n'est pas capable d'utiliser tout le carburant simultanément résultant le carburant d'entrée est élevé et le rendement est faible, de sorte que le rendement globale est réduit. Par conséquent, la pile à combustible doit fonctionner dans le dôme de saturation de ses caractéristiques, afin d'obtenir le maximum rendement.

III.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons établi un modèle mathématique d'une pile à combustible de type PEM, en passant en revue les différentes équations mathématiques permettant une bonne compréhension des phénomènes qui se déroulent dans la pile à combustible.

Nous avons ensuite présenté un exemple de simulation de caractéristiques de la pile à combustible. Et nous avons aussi discuté les résultats de simulation de la pile à combustible de type PEM telles que la polarisation et la puissance. La polarisation dépend de certains effets de pertes (pertes d'activation, pertes ohmiques, et les pertes de transport de masse) et elle est influencée par la température. La puissance relativement élevée de la PEM est considérée comme un avantage majeur pour ce type de piles.

Conclusion Générale

Conclusion générale

Nul doute que les piles à combustible participeront au bouquet énergétique du futur. La diversité et la modularité des technologies PAC leur permettent de toucher tous les domaines d'application. Cette technologie semble très évoluée et que cette source d'énergie attire l'intention de tout le monde car elle ne produit aucune pollution. On s'est intéressé plus particulièrement sur la pile PEM car elle offre une meilleure caractéristique.

Ainsi, la technologie choisie dans notre thème La Vitovalor PT2, Elle fonctionne selon le principe de cogénération de chaleur et d'électricité et produit aussi bien de l'électricité que de la chaleur. On utilise comme source d'énergie de l'hydrogène qui est préalablement produit à partir du gaz naturel, Cette technologie a une durée de vie garantie de dix ans. Ce qui correspond à environ 80 000 heures de service. Néanmoins, le module peut fonctionner jusqu'à 20 ans pour autant qu'une maintenance soit effectuée tous les 5 ans. Après un entretien, le fonctionnement de la pile à combustible est garanti pour cinq années supplémentaires.

Les travaux présentés dans ce mémoire consistent à l'étude et dimensionnement d'un système de stockage à pile à combustible dans un habitat.

Dans la première partie on a travaillé sur une recherche bibliographique sur les piles à combustible, ceci nous a mené à connaître le principe de fonctionnement de PAC et leur différents types et les domaines d'utilisation.

Après, Dans la deuxième partie la production décentralisée de l'électricité par la micro-cogénération dans le secteur de l'habitation est une solution qui permet premièrement d'économiser l'énergie et préserver les réserves fossiles et deuxièmement de réduire les émissions du CO₂. Le bon dimensionnement de la charge totale électrique, thermique et hydraulique (besoin en eau) pour alimenter un chalet nous a orientés vers une technologie de pile PEMFC de type Vitovalor pt2.

Dans la dernière partie de ce mémoire apporte la modélisation et simulation de la pile à combustible de type PEMFC. Tout d'abord, nous avons fourni une modélisation de pile à combustible, on a présenté le modèle mathématique et les équations mathématiques pour mieux comprendre les phénomènes qui se produisent dans la pile à combustible. Ensuite, on a simulé ce modèle Mathématique avec logiciel MATLAB SIMULINK qui nous a donné des résultats espérés et souhaitable.

Conclusion Générale

Ce mémoire nous permet d'identifier plusieurs perspectives que nous résumons dans ces lignes :

1. Les dimensions que nous utilisons dans notre chalet sont encore très simple, elles peuvent donc être enrichies d'autre dimensionnement de niveau supérieur en ajoutons autre options.
2. Nous pouvons tester le système pile à hydrogène dans plusieurs domaine pour les grandes échelles.
3. Nous pouvons également utiliser cette pile dans les applications de secours tell que les hôpitaux les usines ...

Cette technologie semble effectivement être la plus mûre et la plus proche du stade commercial. Elle est considérée actuellement comme étant la mieux adaptée pour plusieurs secteurs d'automobile.

BIBLIOGRAPHIE ET WEBOGRAPHI

- [1] Philippe Stevens, Frédéric Novel-Cattin, Abdel Hammou, Claude Lamy et Michel Cassir « Pile à Combustible », Techniques de l'ingénieur. Génie électrique, Août 2000.
- [2] Florence Lefebvre-Joud, Commissariat à l'Energie Atomique et aux Energies Alternatives (CEA), Grenoble Fuel Cells Technology: which may be the winners.
- [3] News Alerts on EU Research 02 08 2010 Fuel Cells and Hydrogen public-private partnership devotes €180 million to research and demonstration <http://ec.europa.eu/research/index.cfm?pg=newsalert&lg=en&year=2010&na=na-020810-fch> Dernière consultation le 15/03/2012.
- [4] Emanuel Florin Mogos : " Production décentralisée dans les réseaux de distribution.Etude pluridisciplinaire de la modélisation pour le contrôle des sources". Thèse de doctorat E.N.S d'Arts et Métiers Centre de Lille 2005.
- [5] <https://fr.scribd.com/document/522783806/Pile-a-combustible>.
- [6] <https://fr.scribd.com/document/52244473/pILE-DE-COMBUSTIE>.
- [7] [La pile à combustible \(insa-rouen.fr\)](http://insa-rouen.fr)
- [8] <https://ma-solution-chauffage.viessmann.fr/blog-expert/nouveaute-innovation/pile-combustible-chauffage>
- [9] <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/hydrogene-energie>
- [10] <https://www.quebec.ca/agriculture-environnement-et-ressources-naturelles/energie/production-appvisionnement-distribution/hydrogene-vert>
- [11] <https://www.h2life.org/fr/hydrogene/sources/vaporeformage>
- [12] <https://artsandculture.google.com/entity/m08z9m5?hl=fr>
- [13] [https://fr.wikipedia.org/wiki/Biomasse_\(%C3%A9nergie\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Biomasse_(%C3%A9nergie))
- [14] <https://docplayer.fr/55288339-Cours-piles-a-combustibles.html>
- [15] http://www.electrosup.com/pile_a_combustible_alcaline.php
- [16] SAISSET, Rémi. « Contribution à l'étude systémique de dispositifs énergétiques à composants électrochimiques. Formalisme Bond Graph appliqué aux piles à combustible, accumulateurs Lithium-Ion, Véhicule Solaire », Thèse de doctorat, Université de Toulouse, 2004.

[17] HAMIDATOU Taha KHENNOUR Sallah eddine « Etude d'un système de pile à combustible alimenté par hydrogène solaire photovoltaïque », Thèse de Master UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA 2018.

[18] http://www.electrosup.com/pile_a_combustible_a_oxyde_solide.php

[19] HAMMOUM Malika_HADDADI Thafsouth « MODELISATION ET SIMULATION D'UNE PILE A COMBUSTIBLE (SOFC) », Thèse de Master Université Mouloud Mammeri De Tizi-Ouzou 2012

[20] TAMRABET MONSAF « INFLUENCE DES ECOULEMENTS DES GAZ DANS LES CANAUX SUR LA CONSOMMATION DES REACTIFS DANS UNE PILE À COMBUSTIBLE DE TYPE PEMFC », MAGISTERE EN GENIE MECANIQUE, UNIVERSITE DE BATNA 2010.

[21] MAMMERI HOUARI_MOUSSAOUI MOHAMMED SALEM « Modélisation et simulation d'un système hybride (Photovoltaïque – Pile à combustible)», Thèse Master Université Mohamed Khider Biskra 2020

[22] YUCEFI Abdelhak _TELEMÇANI Belkacem « Modélisation d'une pile à combustible de type PEM», Thèse Master Université de M'sila 2017

[23] MEDDAH Salem « Modélisation et commande d'un véhicule électrique à piles à combustible », Thèse de MAGISTERE Université des Sciences et la Technologie d'Oran Mohamed BOUDIAF.

[24] IANKO VALERO EXPOSITO Ingénieur ENSIEG «INTERFAÇAGE ET CONTROLE COMMANDE DE PILES A COMBUSTIBLE POUR APPLICATIONS STATIONNAIRES ET TRANSPORT », Thèse Doctorat UNIVERSITÉ JOSEPH FOURIER 2004

[25] Tahar Hamaz. Outils de caractérisation et de diagnostic d'une pile à combustible de type PEM par mesure du champ électromagnétique externe. Automatique / Robotique. Université de Grenoble, 2014. Français. ffNNT : 2014GRENT074ff. fftel-01128850f.

[26] <https://www.xpair.com/lexique/definition/cogeneration.htm>

[27] <https://www.connaissancedesenergies.org/questions-et-reponses-energies/quest-ce-que-la-cogeneration>

[28] <https://www.dunod.com/sites/default/files/atoms/files/9782100587841/Feuilletage.pdf>

[29] <https://www.hvac-intelligence.fr/micro-cogeneration-pile-combustible/>

[30] <https://www.abcclim.net/calcul-bilan-thermique.html>

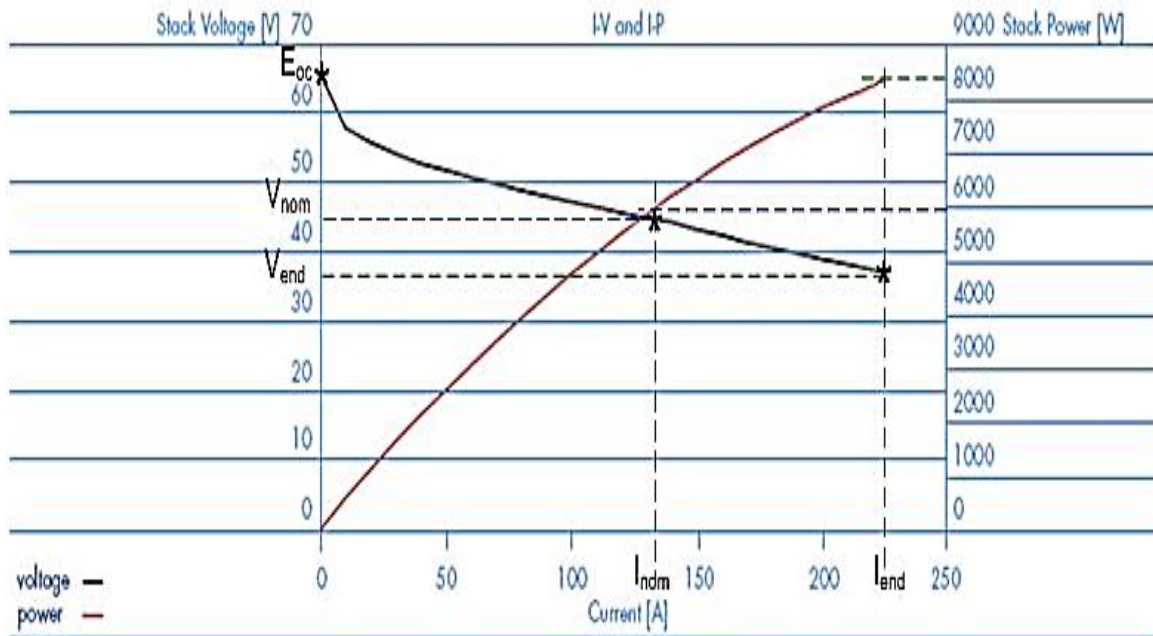
[31] <https://www.viessmann.be/fr/chauffage-batimentsresidentiels/cogeneration/microsysteme-pcce-avec-pile-a-combustible/vitovvalor-pt2/mode-de-fonctionnement-de-vitovvalor-pt2-300p.html>

[32] <https://www.viessmann.fr/fr/chauffage-maison-individuelle/cogeneration/pile-a-combustible/vitovvalor-pt2.html>



[33] Ianko VALERO EXPOSITO Ingénieur ENSIEG «INTERFAÇAGE ET CONTROLE COMMANDE DE PILES A COMBUSTIBLE POUR APPLICATIONS STATIONNAIRES ET TRANSPORT », Thèse Doctorat UNIVERSITÉ JOSEPH FOURIER 2004

[34] Modélisation from simulink MATLAB

Annexe 1 : Figure des paramètres de la fiche technique du fabricant de pile NetStack PS6 de NetStack



Annexe 2 : Fiche technique de vitovalor pt2

Vitovalor PT2	Type	F11T	F19T	F25T	F32T
Puissance thermique nominale (60/40 °C)	kW _{th}	0,9 – 11,4	0,9 – 19,0	0,9 – 24,5	0,9 – 30,8
Puissance électrique pile à combustible	W _{el} *	750	750	750	750
Puissance thermique pile à combustible	kW _{th} *	1,1	1,1	1,1	1,1
Niveau sonore	dB(A)	48	49	50	51
Rendement électrique pile à combustible	%	38			
Rendement total pile à combustible	%	jusqu'à 92 (PCI)			
Rendement nominal chaudière pour charge de pointe	%	jusqu'à 98 (PCS)			
Réservoir d'eau chaude en acier inoxydable	l	220			
Combustible		Gaz naturel E(H) / LL(L)			
Dimensions sans système d'échappement					
longueur (profondeur) x largeur x hauteur					
- Unité globale	mm	595 x 1200 x 1800			
- Appareil de base	mm	595 x 600 x 1800			
- Réservoir tour	mm	595 x 600 x 1800			
Hauteur de plafond minimale requise	mm	2000			
Poids					
- Poids total	kg	326			
- Appareil de base	kg	197			
- Réservoir tour	kg	129			
Encombrement	m ²	0,72			
Classe d'efficacité énergétique					
- Chauffage		A+++	A+++	A+++	A++
- Production d'eau chaude sanitaire, profil de soutirage XL		A+	A+	A+	A+