

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSIGEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



Université KASDI Merbah d'Ouargla

Faculté des Sciences Appliquées

Département de Génie Mécanique



Mémoire de master

Domaine : Sciences et techniques

Filière : Génie mécanique

Spécialité : Energétique

Présenté par :

Hicham ABAZ et Lahcene DIF

Thème

**Evaluation de la chaleur produit par une pile à
combustible PEMFC pour le chauffage d'air d'une
caravane**

Soutenu publiquement : Le 15/06/2021

Devant le jury :

Dr. SAIFI Nadia

Dr. DRID Mohammed Mabrouk

Dr. DOKKAR Boubekeur

M.C.A

M.C.B

M.C.A

UKM Ouargla

UKM Ouargla

UKM Ouargla

Président

Examineur

Encadreur

Année universitaire : 2020 / 2021

Remerciements

Tout d'abord, nous remercions dieu pour nous avoir donné le courage et la patience de mener ce travail,

*Nous tenons à remercier notre encadreur **Dr. DOKKAR boubekour** Maître de conférence et chercheur au laboratoire LVPRS à l'université Kasdi Merbah Ouargla, pour nous avoir proposé ce sujet, et pour sa contribution et son aide qui nous ont été indispensables pour la réalisation de ce modeste travail,*

*Nous tenons, enfin, à remercier les Honorables Membres du jury, d'avoir accepté de juger ce travail, le Président **Mme Dr. SAIFI Nadia** et monsieur **Dr. DRID Mohammed Mabrouk** comme examinateur.*

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail.

A mes très chers parents, pour leurs amour et sacrifices,

A mes adorables frères, pour leur patience,

*et tout la famille **Abaz** et **Dif** ,*

Pour leurs soutient et encouragements,

A mes proches amis

A tous nos enseignants du département de génie mécanique

Sommaire

Nomenclature.....	v
Liste des figures.....	vi
Liste des tableaux	viii
Introduction Générale.....	1

Chapitre 01 : Description général de la pile à combustible

1.1 Introduction.....	2
1.2 Historique de pile à combustible.....	2
1.3 Définition de la pile à combustible.....	4
1.4 Différents types des piles à combustible	5
1.4.1 Pile alcaline AFC.....	5
1.4.2 Pile à membrane échangeuse de protons PEMFC.....	5
1.4.3 Pile à méthanol direct DMFC	6
1.4.4 Pile à acide phosphorique PAFC.....	6
1.4.5 Pile à carbonate fondu MCFC.....	6
1.4.6 Pile à électrolyte solide SOFC	7
1.5 Les avantages et Les inconvénients de pile à combustible.....	7
1.6 Principe de fonctionnement PEMFC.....	9
1.6.1 Description de la cellule PEMFC.....	10
1.6.2 Domaines d'applications des piles PEMFC:.....	13
1.7 Conclusion	15

Chapitre 02 : Modélisation et simulation de la pile PEMFC

2.1 Introduction.....	16
2.2 Approche adoptée.....	16
2.3. Procédures mathématiques.....	16
2.3.1 Bilan des masses.....	16
2.3.2 Électrochimie de la pile	21
2.4 Rendement du système	23

Sommaire

2.5 Procédures numériques	24
2.6 Validation de modèle	25
2.7 Effet de la variation de la pression de la pile	25
2.8 Effet de la variation de l'humidification à l'anode.....	27
2.9 Conclusion	29

Chapitre 03 : Application sur l'alimentation et chauffage d'une caravane

3.1 Introduction.....	30
3.2 Transfert thermique	30
3.2.1 Définition	30
3.2.2 Les modes des transferts thermiques	30
3.3 Confort thermique	32
3.3.1 Paramètres du confort thermique	33
3.4 La caravane	34
3.4.1 Description général.....	34
3.4.2 Evaluation de besoin électrique pour les accessoires	35
3.4.3 Evaluation des besoins en chauffage	38
3.4.4 Calcul des flux de chaleur à travers les murs	40
3.4.5 Dimensionnement de la pile PEMFC	52
3.4.6 Calcul de besoin en hydrogène.....	55
3.5 Conclusion	56
Conclusion Générale.....	57

Nomenclature

Lettres latines

A	Surface [m ²]
C _p	Pouvoir calorifique à pression constante [J/kg.K]
D	Coefficient de diffusion [m ² /s]
e _i	L'épaisseur [m]
F	Constante de Faraday constant [Charge/mol]
I	densité de courant de la pile [A/m ²]
h	Coefficient de transfert de chaleur par convection [W/m ² .K]
L	Longueur de résistance [m]
M	Débit molaire [mol/s]
\mathcal{M}	masse molaire atomique [g/mol]
P	Pression [Pa]
R	Constante universelle des gaz [J/(mol.K)]
R _t	Résistance thermique [K/W]
RH	Humidité relative
S	la section de fil de résistance
T _{in}	Température à l'intérieur de la caravane [K]
T _{amb}	Température ambiante [K]
t	Temps de chauffage effectuée par la pile [s]
V	Tension de la cellule [V]
V _m	volume molaire de gaz dans les conditions standards [l/mol]

Symboles Grecques

ξ	Taux stœchiométrique
-------	----------------------

Nomenclature

λ	Conductivité thermique [W/m.K]
Φ	Flux de chaleur [W]
η	Rendement
σ	Conductivité ionique [$\Omega^{-1} \text{ m}^{-1}$]
ρ	Masse volumique [kg/m^3]
α	Coefficient de transport net d'eau dans la membrane

Suscriptions / Indices

α	Anode
c	Cathode
k	k ^{ième} élément
m	Membrane
s	supplémentaire
sat	Saturation
v	ventilation
oc	Circuit ouvert
w	Eau

Liste de figure

Chapitre 01 : Description général de la pile à combustible

Figure 1.1: Expérience de Sir W. Grove en 1839.....	2
Figure 1.2: Pile à combustible du programme Gemini.....	3
Figure 1.3: Principe d'une pile PEMFC.....	9
Figure 1.4: Les différents éléments de pile PEMFC.....	10
Figure 1.5: Détails d'une cellule EME.....	11
Figure 1.6: Plaque bipolaire.....	12
Figure 1.7: Décomposition d'un PEMFC.....	13
Figure 1.8: Pile à combustible portable pour recharger un Smartphone avec de l'eau.....	14
Figure 1.9: Intégration du système pile à combustible.....	14
Figure 1.10: unité de pile à combustible.....	15

Chapitre 02 : Modélisation et simulation de la pile PEMFC

Figure 2.1: Bilan des flux au côté l'anode.....	18
Figure 2.2: Bilan des flux au côté cathode.....	19
Figure 2.3: Effet de la variation de pression sur la polarisation.....	26
Figure 2.4: Effet de la variation de pression sur la puissance.....	26
Figure 2.5: Effet de la variation de pression sur le rendement.....	27
Figure 2.6: Effet de la variation d'humidification sur la polarisation.....	28
Figure 2.7: Effet de la variation d'humidification sur le rendement.....	28
Figure 2.8: Effet de la variation d'humidification sur la puissance.....	29

Chapitre 03 : Application sur l'alimentation et chauffage d'une caravane

Figure 3.1: Transfert de chaleur par conduction.....	31
Figure 3.2: Schéma du transfert de chaleur par convection.	32
Figure 3.3: Transfert de chaleur par rayonnement.....	32
Figure 3.4: le cycle de confort thermique.....	33
Figure 3.5: caravane d'un type Sterckeman.....	35
Figure 3.6: consommation électrique du réfrigérateur.....	36
Figure 3.7: consommation électrique de la télévision.....	37

Liste de figure

Figure 3.8: consommation électrique de l'ordinateur portable.....	37
Figure 3.9: consommation électrique de téléphone portable.....	37
Figure 3.10: consommation électrique de la lampe.....	38
Figure 3.11: consommation électrique des appareils électrique.....	38
Figure 3.12: Schéma de la caravane.....	39
Figure 3.13 : La variation de température à Ouargla pour la journée 04-01-2021.	40
Figure 3.14: Les composants et dimensions du premier mur.....	41
Figure 3.15: La variation du flux de chaleur du mur 1.....	42
Figure 3.16: Les composants et dimensions du deuxième mur.....	43
Figure 3.17: La variation du flux de chaleur du mur 2.....	43
Figure 3.18: Dessin simplifié pour le calcul de la résistance du mur 3.....	44
Figure 3.19: Les composants et dimensions du troisième mur.....	45
Figure 3.20: La variation du flux de chaleur du mur 3.....	45
Figure 3.21: Dessin simplifié pour le calcul de la résistance du mur 4.....	47
Figure 3.22: Les composants et dimensions du quatrième mur.....	47
Figure 3.23: La variation du flux de chaleur du mur 4.....	48
Figure 3.24: Les composants et dimensions du cinquième mur.....	49
Figure 3.25: La variation du flux de chaleur du mur 5.....	49
Figure 3.26: Les composants et dimensions du sixième mur.....	50
Figure 3.27: La variation du flux de chaleur du mur 6.....	51
Figure 3.28: La variation de flux de chaleur total de la caravane.....	52

Liste des tableaux

Chapitre 01 : Description général de la pile à combustible

Tableau 1.1: Les différents types de pile à combustible.....	7
Tableau 1.2: Densités massiques d'énergie théoriquement récupérables pour différents combustibles.....	8

Chapitre 02 : Modélisation et simulation de la pile PEMFC

Tableau 2.1: Les paramètres et les conditions de cas de base.....	24
Tableau 2.2: Comparaison des résultats.....	25

Chapitre 03 : Application sur l'alimentation et chauffage d'une caravane

Tableau 3.1: puissance des appareils électriques.....	36
Tableau 3.2: Les paramètres physiques des murs	41

Introduction général

Introduction général

L'exploitation démesurée des énergies fossiles présente une double menace sur notre planète ; d'une part elle expose la planète à l'épuisement de ses réserves naturelles et contribue à la dégradation par l'effet de serre et autres phénomènes à la dégradation du système climatique de notre planète. Il est devenu plus que nécessaire pour la population mondiale de trouver et améliorer des ressources d'énergies renouvelables, inépuisables et non polluants. Dans le domaine de parc roulant tel que les véhicules, les autobus et les caravanes, Il faut rechercher une mode de production de l'énergie propre et moins encombrant. Ainsi, parmi les candidats les plus promoteurs, on constate l'hydrogène. Ce gaz non polluant est utilisé pour la production d'électricité par le billais de la pile à combustible.

L'hydrogène est l'élément le plus abondant de notre univers, c'est un carburant non toxique dont la combustion ne rejette que de l'eau. Il est léger et énergétique, sa densité d'énergie (120 MJ/kg) est élevée comparée à celle de l'essence (45 MJ/kg). Sa densité d'énergie volumique est en revanche plus faible, en effet un litre d'essence équivaut, sur le plan énergétique, à 4,6 litres d'hydrogène comprimé à 700 bars [1]. Le développement de l'utilisation de l'hydrogène repose en grande partie sur la pile à combustible, une technologie d'avenir mais d'une application ancienne puisque elle fonctionne sur le mécanisme inverse de l'électrolyse de l'eau. Dans ce contexte, l'objet de notre travail se concentre sur l'évaluation de l'énergie produite et la chaleur dégagée d'une pile à combustible PEMFC pour effectuer le chauffage d'air d'une caravane.

Ce mémoire est divisé en trois chapitres, le premier chapitre est consacré à la présentation des piles à combustibles et leurs caractéristiques électriques et chimiques ainsi que les différentes technologies utilisées. Le deuxième chapitre traite l'analyse du modèle diphasique de la pile PEMFC et la simulation numérique de ce modèle, ainsi l'examen des effets de variation des paramètres opératoires sur la performance de la pile PEMFC. Enfin, le troisième chapitre présente la conception d'un système de chauffage d'une caravane. Ce système est basé sur l'intégration d'une résistance électrique et la récupération de chaleur dégagé par la réaction chimique dans le coté cathode de la pile.

Chapitre 1 :

Description générale de la pile à combustible

1.1 Introduction

L'hydrogène est l'élément chimique le plus abondant de l'univers et l'un des futurs vecteurs énergétiques potentiels pour stocker l'électricité. Il est particulièrement intéressant d'évaluer les énergies renouvelables ou de réduire les impacts environnementaux liés aux émissions de carbone. Dans le contexte actuel d'évolution du système électrique, il convient de s'appuyer sur des technologies de pointe utilisant l'hydrogène, en particulier la pile à combustible (PAC). Dans ce chapitre nous allons présenter l'état de l'art sur la pile à combustible historique, fonctionnement principal et les différents types qui existent actuellement [2].

1.2 Historique de pile à combustible

On parle souvent des piles à combustible comme étant une technologie nouvelle. Pourtant, son invention remonte au XIX^{ème} siècle et est généralement attribuée à Sir William Grove. Celui-ci expérimente en 1839 une cellule hydrogène-oxygène (figure 1.1) constituée d'électrodes de platine et d'un électrolyte acide (acide sulfurique).

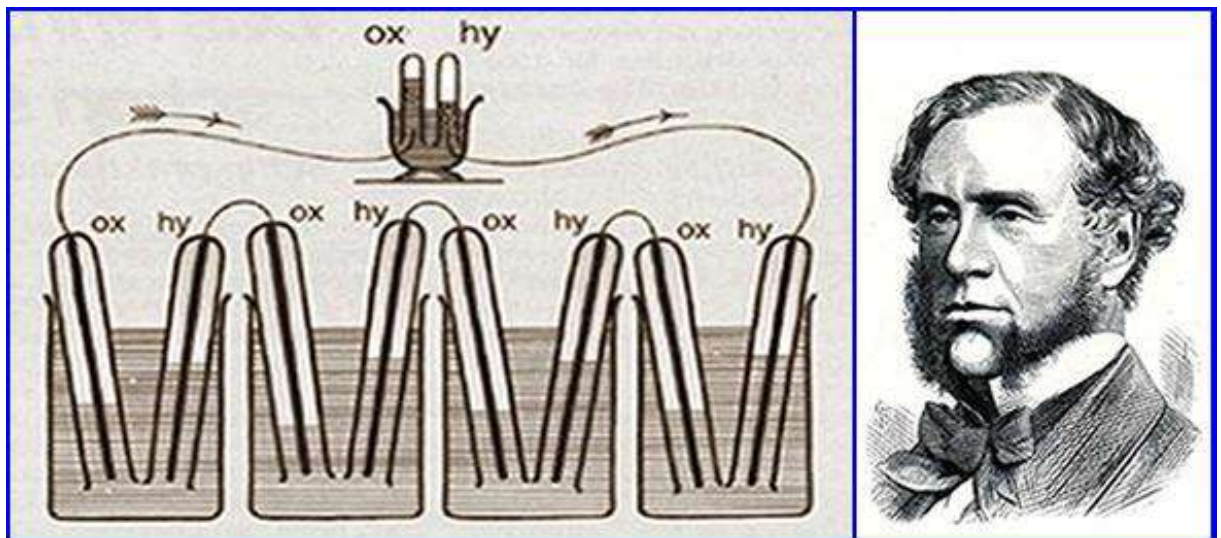


Figure 1.1:Expérience de Sir W. Grove en 1839.

Ce fut cependant Christian Friedrich Schoenbein qui, en 1838, observe par inadvertance le principe des piles à combustible en travaillant sur l'électrolyse. Dans son expérience, il utilisait un tube en U avec deux électrodes en platine. Grâce à un courant électrique, il parvint à obtenir de l'hydrogène et de l'oxygène. En coupant ce courant, il constata que ces gaz donnaient lieu à un courant électrique de sens inverse. Le principe de

Chapitre01 : Description général de la pile à combustible

l'électrolyse quant à lui, ayant été découvert dès 1806 par Sir Humphry Davy, obtenant de l'hydrogène et de l'oxygène à partir d'eau distillée dans des appareils en argent. Après quelques améliorations apportées à cette expérience, celle-ci tombe presque dans l'oubli au profit des machines thermiques, des accumulateurs et des piles électriques en vogue à cette période là. Cinquante ans plus tard, en 1889, L. Mond et C. Langer apportent des perfectionnements notamment avec l'introduction de catalyseurs² (platine) ou d'électrolytes pouvant être contenus dans des matrices poreuses en plâtre et en amiante. Ils baptisent cette technologie pile à combustible. En 1921, E. Baur met en évidence l'importance de la cinétique. Il met au point une cellule fonctionnant à haute température (1000°C), avec une anode de carbone, de l'oxyde de fer comme cathode, et des carbonates alcalins comme électrolytes. Mais c'est en 1956 que F.T. Bacon et J.S. Frost démontrent la faisabilité d'un groupe de puissance de 6 kW qui engendre une certaine effervescence surtout dans le secteur de la recherche spatiale où des réalisations technologiques des piles sont effectuées par la NASA pour l'alimentation électrique des programmes Gemini en 1963 (piles de type PEMFC de General Electric, (figure 1.2), Apollo en 1968 (piles AFC de Pratt et Whitney) et des navettes spatiales qui sont d'ailleurs toujours employées à ce jour.

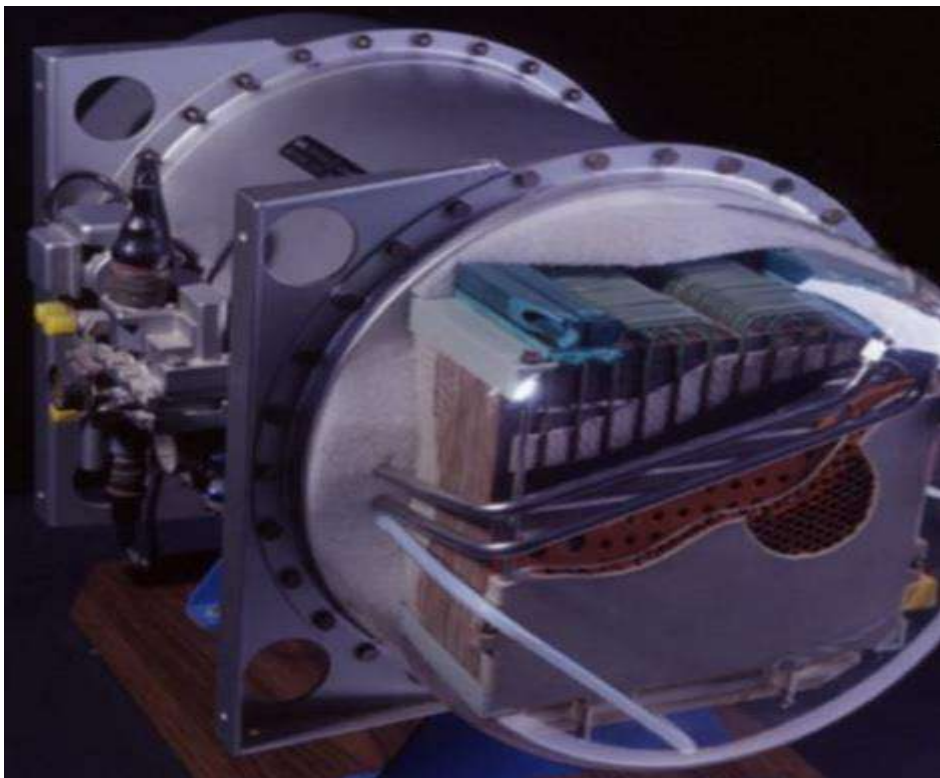


Figure 1.2: Pile à combustible du programme Gemini.

Des applications dans des programmes de la marine ont aussi vu le jour où une pile de 20 kW fut utilisée par l'U.S. Navy dans un sous-marin au milieu des années 60. Les premiers

pas dans des applications embarquées de piles à combustible dans des véhicules furent réalisés aux Etats Unis grâce à la construction d'un tracteur électrique avec une pile de type AFC de 15 kW en 1960. Puis en 1966, avec une pile de type AFC de 6 kW associée à des batteries plomb/acide, une Austin A40 à propulsion électrique a été réalisée avec une autonomie de 300 km. Celle-ci a fonctionné pendant 3 ans en effectuant plus de 16000 km.

La décennie 70 a essentiellement vu le développement et l'amélioration des différents composants constituant la pile à combustible et ses périphériques. D'ailleurs, c'est à cette période qu'apparaît la membrane Nafion qui est actuellement l'électrolyte le plus utilisé dans les piles de type PEMFC. De nombreux travaux sont alors menés pour l'emploi du méthanol,

De l'essence, du gaz naturel et de l'éthanol comme combustible pour les véhicules à pile embarquée avec reformeurs ainsi que du charbon, d'hydrocarbures légers pour la fabrication d'hydrogène par reformage pour des applications stationnaires. En 1977, une installation de 1 MW est mise en place à New York suivie d'une installation de 4,5 MW.

La décennie 80 a vu s'intensifier une activité de recherche et de développement Outre- Atlantique où la firme canadienne Ballard a été créée en 1987. Cette dernière, ayant fortement contribué au développement des piles PEMFC, est aujourd'hui leader dans le domaine de la pile à combustible. Parallèlement en Europe, on n'y croit pas trop et les travaux de recherche ralentissent.

C'est vers le début des années 90 que renaît l'intérêt pour les piles à combustible. En effet, l'industrie commença à reconnaître le potentiel commercial de ces dernières grâce aux progrès technologiques réalisés sur les membranes, les catalyseurs, le reformage, etc. Plusieurs prototypes de véhicules électriques et installations stationnaires voient le jour.

Aujourd'hui les industriels considèrent la pile à combustible comme une alternative attrayante aux sources d'énergie classiques. En effet, plusieurs études technico-économiques ont apporté des éclairages sur le potentiel de chacune des techniques de piles à combustible comparées aux moyens classiques que sont les moteurs thermiques et les turbines à gaz en cogénération. Au terme de ces études, il se confirme principalement que l'hypothèse qui pèse sur l'avenir des piles à combustible est la capacité des constructeurs à baisser les coûts de production et à améliorer leur durée de vie. On avance qu'à 1000 €/kW, elles ont, en stationnaire, un réel avenir [3].

1.3 Définition de la pile à combustible

Une pile à combustible est un générateur d'énergie électrique. Elle transforme directement l'énergie chimique du combustible en énergie électrique. C'est un système qui ne

produit pratiquement pas de nuisances sonores, puisqu'il ne comporte pas de composants mécaniques en mouvement, comme les turbines et les moteurs. De plus, le courant électrique est produit tant que la pile est alimentée conjointement en combustible (hydrocarbures, alcools, biomasse, gaz naturel, hydrogène) et en comburant (oxygène de l'air)[4].

1.4 Différents types des piles à combustible

On compte actuellement six types de piles à combustible qui se différencient selon la nature de leur électrolyte et le niveau de leur température de fonctionnement, leur architecture et les domaines d'application dans lesquels chaque type peut être utilisé.

- pile alcaline AFC (en Anglais *Alkaline fuel Cell*) ;
- pile à membrane échangeuse de protons PEMFC (en Anglais *Proton Exchange Membrane Fuel Cell*) ;
- pile à méthanol direct DMFC (en Anglais *Direct Methanol Fuel Cell*) ;
- pile à acide phosphorique PAFC (en Anglais *Phosphoric Acid Fuel Cell*) ;
- pile à carbonate fondu MCFC (en Anglais *Molten carbonate Fuel Cell*) ;
- pile à électrolyte solide SOFC (en Anglais *Solid Oxid Fuel Cell*).

1.4.1 Pile alcaline AFC

La AFC (Alkaline Fuel Cell) a été l'une des premières technologies de pile à combustible développées, et Ces piles à combustible utilisent une solution alcaline aqueuse (hydroxyde de potassium) comme électrolyte et peut utiliser une multitude de métaux non précieux comme catalyseur à l'anode et à la cathode. La haute performance des AFC est due au taux auquel les réactions chimiques se produisent dans la pile. taux de près de 60% de rendement dans les applications spatiales. La première pile a été fabriquée en 1965 et elle avait une puissance de 5 kW[5].

1.4.2 Pile à membrane échangeuse de protons PEMFC

La PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cell) est actuellement le type de piles le plus étudié et utilisé dans l'ensemble des applications. Pour fonctionner, vous n'avez besoin que d'hydrogène, d'oxygène et d'eau, et d'aucuns fluides corrosifs comme d'autres piles à combustible. On les trouve également sous diverses appellations : SEFC (Solid Electrolyte Fuel Cell) ou encore IEMFC (Ion Exchange Membrane Fuel Cell), SPEFC (Solid Polymer Electrolyte Fuel Cell). La faible température de fonctionnement (60-100°C) ainsi que

l'insensibilité au CO₂ sont les principaux atouts des PEMFC. Ces caractéristiques autorisent de fait l'utilisation d'hydrogène obtenu par reformage de méthanol et de l'air ambiant comme comburant [6].

1.4.3 Pile à méthanol direct DMFC

La DMFC (Direct Méthanol Fuel Cell) utilise directement méthanol liquide (CH₃OH) comme combustible.

Le méthanol doit être dissous dans l'eau avant d'entrer dans la pile. Cette action se déroule de lieu de manière « directe », où le méthanol est transformé par un dispositif externe en hydrogène et en dioxyde de carbone.

L'oxydation du méthanol à l'anode se passe très lentement. Cela provoque une perte de tension importante à l'anode et donc un rendement plus faible par rapport aux autres piles à combustible. De plus, la membrane de cette pile peut absorber une quantité de combustible non négligeable, et une réaction directe, qui ne produit que de la chaleur, peut avoir lieu à la cathode. Par contre, le méthanol présente un intérêt important et prometteur : il est facile à stocker, à transporter et à charger dans les conditions normales [7].

1.4.4 Pile à acide phosphorique PAFC

La PAFC (Phosphoric Acid Fuel Cell) utilise comme électrolyte, l'acide phosphorique liquide (H₃PO₄). L'acide est immobilisé dans une matrice de particules de carbure de silicium liées par du téflon (PTFE). Les électrodes sont constituées de papier carbone enduit de platine finement dispersé. La pile à combustible à acide phosphorique est la première génération des piles modernes. Elle est l'une des piles les plus matures et la première à être commercialisée. Ce type de piles à combustible est généralement utilisé pour les applications stationnaires, mais quelques PAFC sont utilisées pour alimenter les grands véhicules comme les bus. Les PAFC sont plus tolérantes aux impuretés des carburants fossiles reformés à l'hydrogène que les PEMFC. Elles ont un rendement de 85% quand elles sont utilisées pour la cogénération de l'électricité et de la chaleur mais moins efficaces lorsqu'elles ne produisent que de l'électricité (37%-42%) [5].

1.4.5 Pile à carbonate fondu MCFC

La MCFC (Molten carbonate Fuel Cell) la différence entre les pile MCFC et les pile antérieures est l'utilisation d'un mélange comme électrolyte eutectique de carbonates de lithium et de potassium (Li₂CO₃ - K₂CO₃) ainsi que par le comburant (mélange air +CO₂).

Chapitre01 : Description général de la pile à combustible

Fonctionnant à 650°C dans un milieu très corrosif, les électrodes sont en nickel à l'anode et en oxyde de nickel à la cathode, sans métaux précieux. orientent leur utilisation vers des applications stationnaires avec cogénération. Des unités de 2 MW (Santa-Clara, Californie, alimentant 2000 foyers) ont été testées, ainsi qu'une de 250 kW en Allemagne (1998) et une autre de 1 MW à Kawagoe (Japon). Les industriels présents dans ce secteur sont MC Power, IFCC (Etats-Unis), BCN (Pays Bas), Ansaldo (Italie), Hitachi, Mitsubishi [6].

1. 4.6 Pile à électrolyte solide SOFC

La SOFC (Solide Oxyde Fuel Cell) est adaptées aux demandes de puissance importantes et stables dans le temps. Leur démarrage demande des heures, et la température très élevée ne permet pas un changement brusque de charge. Elles ont un rendement électrique autour de 50 à 60%. Dans les applications destinées à capturer et utiliser la chaleur dégagée par le système, le rendement peut atteindre 80 à 85% [7].

Le tableau (1-1) en présente les principales caractéristiques, ainsi que les domaines d'applications associés.

Tableau 1.1: Les différents types de pile à combustible[8].

	PEMFC	DMFC	PAFC	AFC	SOFC	MCFC
	Base Temperature			Haute Temperature		
Temperature	70 à 100°C	70 à 90°C	150 à 220C	50 à 250°C	700 à 1050°C	600 à 800°C
Electrolyte	Membrane en polymère solide	Membrane en polymère solid	Acide phosphorique liquid	Potasse (KOH) liquide	Céramique solide	Sel de carbonate fondu liquide
Combustibles possibles	Hydrogène	Méthanol	Hydrogène, gaz naturel (reformage)	Hydrogène	Hydrogène, gaz naturel, méthanol...	Hydrogène, gaz naturel, méthanol...
Gamme de puissance	1W à 10MW	1W à plusieurs kW	200kW à 10MW	1W à 100kW	1kW à 100MW	500kW à 10MW
Rendement Electrique	30 – 45%	30 – 45%	35 – 45% 75% en cogénération	55 – 60%	50 – 55% 70% en Cogeneration	50 – 60%
Applications	Spatial, Transport, Stationnaire, Equipements portable	Transport, Equipements portable	Stationnaire, Cogénération, Transport	Spatial, Défense, Equipements portables	Stationnaire Cogénération	Stationnaire, Cogénération
Principaux constructeurs	Ballard Nuvera Axane* Helion* (*français)	Siemens Hitachi Sanyo	Siemens Ifc (onsi) Fuji	Siemens Fuji Zevco Ifc	Siemens- Westinghouse Sulzer	IFC Hitachi Fuji

1.5 Les avantages et Les inconvénients de pile à combustible

Les avantages essentiels d'une pile a combustible, comparativement aux machines thermiques, se résument pour l'essentiel a :

Chapitre01 : Description général de la pile à combustible

- un fonctionnement silencieux (peu d'organes en mouvement, si ce n'est des pompes de circulation), et non polluant
- un rendement énergétique élevé, non limité par le théorème de Carnot, qui peut atteindre actuellement 60 %,
- une grande souplesse d'utilisation due, d'une part à une fabrication modulaire d'éléments de dimensions et de formes variées, et d'autre part à un démarrage et arrêt quasi-instantanés pour les piles à basse température (inférieure à 200°C),
- une grande densité massique d'énergie, qui est un avantage particulièrement important à considérer pour des applications à l'espace ou à des véhicules électriques terrestres [9].

Les densités massiques d'énergie théoriquement récupérables pour différents combustibles sont données dans le Tableau (1.2) :

Tableau 1.2: Densités massiques d'énergie théoriquement récupérables pour différents combustibles[9].

Combustible	Densité d'énergie (kWh/kg)
H ₂ seul	32.8
H ₂ en bouteille	0.42
CH ₃ OH	6.1
(CH ₂ OH) ₂	5.2
NH ₃	5.7
NH ₂ -NH ₂	2.6
Essence	10.5

À côté de ces avantages indéniables, les piles à combustible présentent un certain nombre d'inconvénients, qui limitent leur développement :

- Densité de puissance assez faible, souvent inférieure à 100 W/kg, notamment pour les piles à alcool, dont la puissance spécifique ne dépasse pas 50 mW / cm² d'électrode (ce qui correspondrait grosso modo à une densité de puissance de 50 W/kg),
- Utilisation de métaux catalytiques précieux (Pt, Pd, Ag, ...) en quantité trop importante (3 à 4 g de Pt/kW pour une pile H₂/air de type PAFC, et 20 à 100 g de Pt/kW pour une pile CH₃OH/air), ce qui entraîne un coût exorbitant pour les applications civiles,
- Difficultés de stockage des combustibles gazeux (en particulier l'hydrogène), ce qui nécessite l'utilisation, soit de tubes comprimés (la densité d'énergie théoriquement récupérable chute alors), soit de composés hydrogènes (NH₃, CH₃OH, ...) qui libèrent l'hydrogène par craquage ou par reformage catalytique [9].

1.6 Principe de fonctionnement PEMFC

La pile PEMFC est choisie pour l'alimentation et le chauffage car elle se caractérise par un démarrage rapide et un électrolyte solide. Ces deux avantages font que la pile PEMFC est un candidat très convenable pour un parc roulant tel que la caravane. Dans ce qui suit, on établit une étude détaillée de ce type de pile.

Une pile à combustible fonctionne sur le principe inverse de l'électrolyse de l'eau. Des réactifs chimiques permettent la production d'énergie électrique. La pile à combustible à électrolyte à membrane polymère convertit l'hydrogène et l'oxygène en énergie électrique. Cette réaction d'oxydoréduction correspond à l'électrolyse de l'eau inversée [10] :

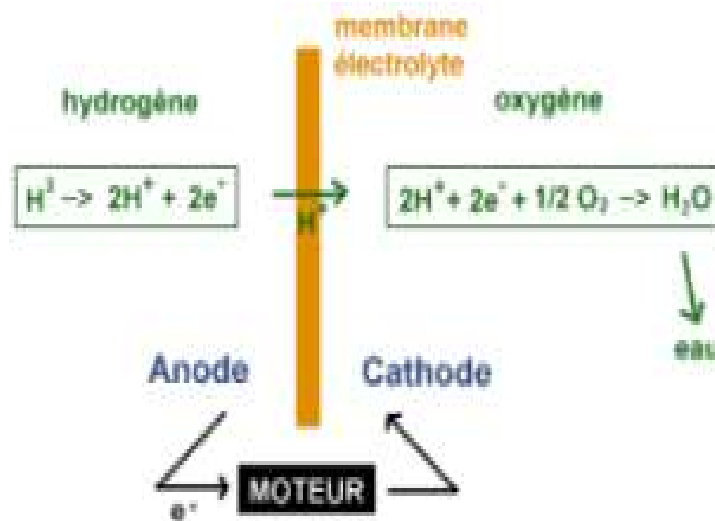
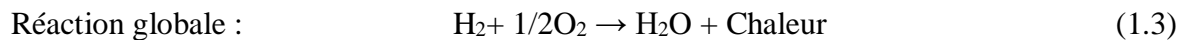
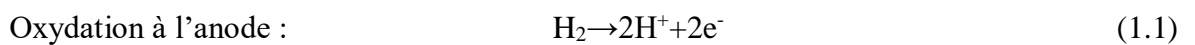


Figure 1.3: Principe d'une pile PEMFC[10].

L'électricité est produite par les deux électrons libérés par la molécule d'hydrogène. Les protons d'hydrogène traversent la membrane séparant l'anode de la cathode et se recombinaient à la cathode avec les électrons et les atomes d'oxygène. Idéalement, les seuls produits secondaires de la réaction sont de l'eau et de la chaleur. Le schéma de principe d'une cellule élémentaire de pile à combustible est présenté en (figure 1.3). La membrane est le cœur de la cellule élémentaire : il s'agit d'un électrolyte en polymère qui est perméable aux protons d'hydrogène et imperméable aux gaz. Pour garantir la perméabilité aux protons, la membrane doit être en permanence humidifiée.

1.6.1 Description de la cellule PEMFC

La cellule de base d'une pile à combustible est constituée d'un empilement de deux électrodes poreuses séparées par un électrolyte solide. De chaque côté de l'électrode, on trouve deux couches de diffusion et deux plaques bipolaires (voir figure 1.4).

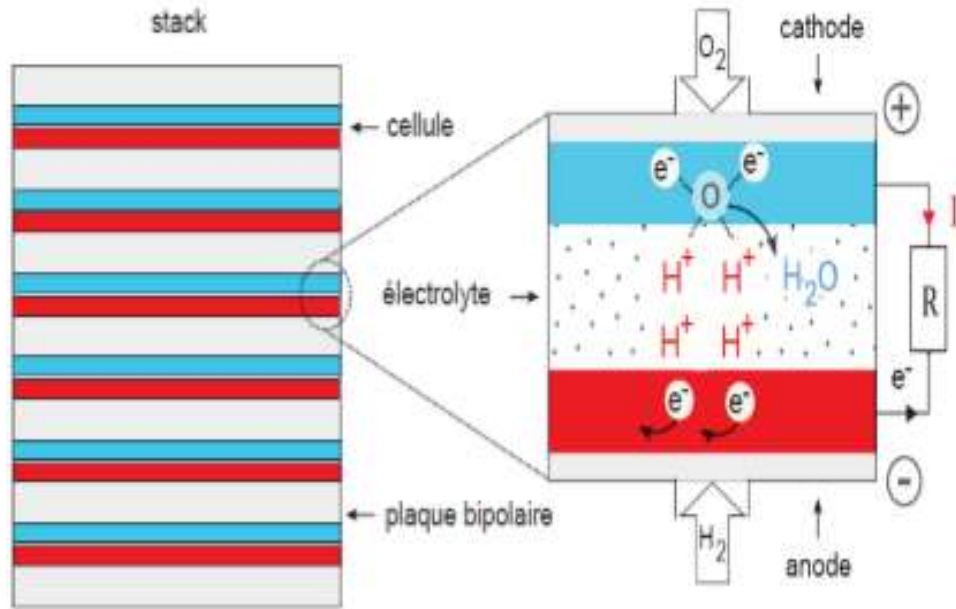


Figure 1.4: Les différents éléments de pile PEMFC.

a. Électrolytes (membrane)

L'électrolyte, ou membrane, constitue un des éléments principaux de la pile PEMFC. Son rôle est multiple et les performances de la pile dépendent fortement de ses caractéristiques mécaniques, électriques et chimiques. Elle assure notamment la séparation des deux compartiments anodique et cathodique (voire figure 1.5) [10].

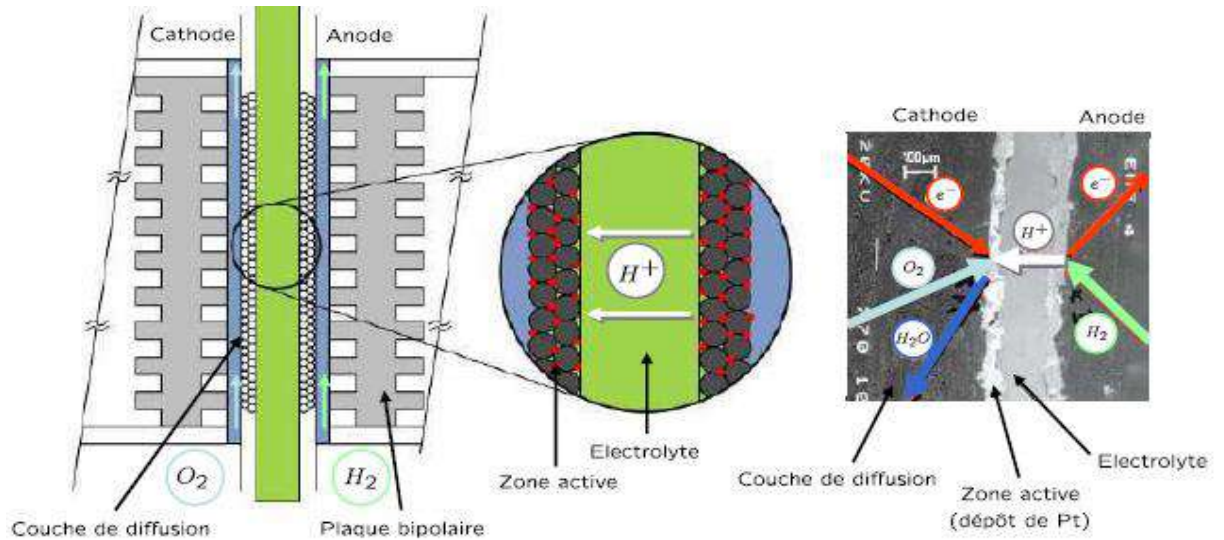


Figure 1.5: Détails d'une cellule EME[11].

b. Les électrodes

Les électrodes doivent pouvoir assurer le transfert des protons depuis les sites catalytiques d'oxydation de l'hydrogène vers les sites de réduction de l'oxygène via la membrane. De même, les électrons produits par l'anode doivent pouvoir être évacués puis redistribués à la cathode par le circuit extérieur. Ainsi, les électrodes doivent assurer une bonne conductivité ionique et électronique. Pour cela, elles sont constituées d'un mélange intime de carbone (Conducteur électronique), d'électrolyte (conducteur protonique) et de platine (catalyseur).

- **L'anode** : On réalise l'oxydation de l'hydrogène, selon la réaction précédente (pour une pile acide)
- **La cathode** : On réalise la réduction de l'oxygène, selon la réaction précédente
- **Le catalyseur**: pour que les deux demi-réactions soient possibles, il faut un catalyseur (c'est-dire un composé capable d'augmenter la vitesse de réaction, sans être consommé par lui-même). Afin que le catalyseur puisse travailler efficacement, la création de zones actives doit être assurée. Ces zones mettent en présence à la fois le gaz réactif, les électrons, les protons et le catalyseur, cela se réalise au niveau de l'interface électrode-électrolyte [10].

c. Plaques bipolaires

Ces plaques sont dites bipolaires car elles assurent simultanément l'alimentation en gaz (H_2 et O_2) des deux cellules les encadrant dans le cas d'empilement de cellules. Ainsi, une plaque apporte l'oxygène du côté cathodique et l'hydrogène du côté anodique de la cellule

suivante et l'évacuation de l'eau produite par la réaction. Ces plaques sont composées de graphite à haute densité. Elles, sont disponibles commercialement mais à des prix très élevés (voir figure 1.6).

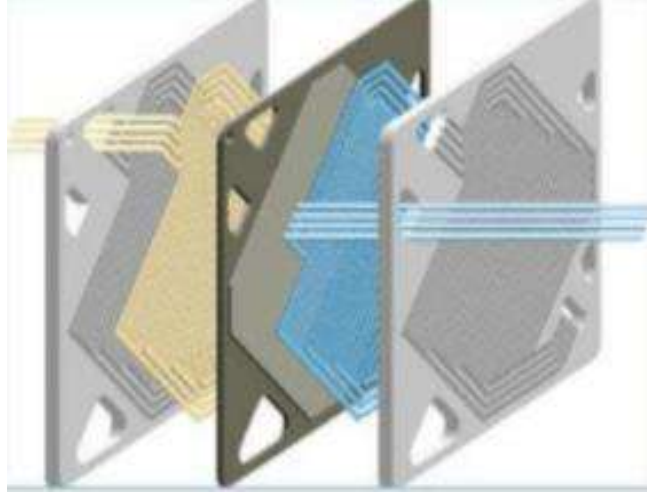


Figure 1.6: Plaque bipolaire.

d. Couches de diffusion(Backing)

Entourant les électrodes, les couches de diffusion, d'une épaisseur comprise entre 300 μm et un millimètre ont un triple rôle. Elles doivent tout d'abord permettre la distribution et la diffusion des réactifs depuis les plaques bipolaires jusqu'aux électrodes, ainsi que permettre le transfert des électrons de l'anode ou de la cathode vers les plaques bipolaires. Elles assurent enfin un rôle essentiel dans la gestion de l'eau en permettant à la fois qu'elle soit évacuée et qu'elle humidifie la membrane. Elles doivent donc être à la fois conductrices de courant et de structure poreuse. La porosité peut varier entre 40 et 80% selon leur nature et leur application. La nature poreuse de ces supports permet aux réactifs de diffuser, ce qui leur permet d'entrer plus efficacement en contact avec la surface entière de l'électrode puis de la membrane (voir figure 1.7) [10].

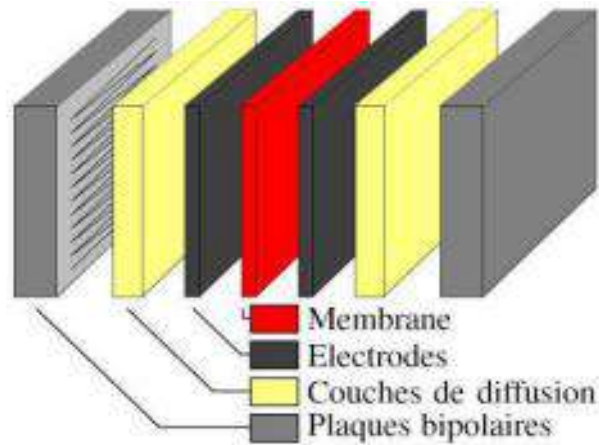


Figure 1.7: Décomposition d'un PEMFC.

e. Assemblage Membrane – Electrodes

Les électrodes sont à base d'un matériau carboné sur lequel sont déposés des grains de platine jouant le rôle de catalyseur. Leur épaisseur est de l'ordre de quelques dizaines de micromètres. Le processus de réalisation conduit à les déposer sur la membrane où elles s'imbriquent fortement. Une fois ce processus réalisé, l'ensemble constitue ce que l'on appelle l'Assemblage Membrane Electrodes

Les travaux actuels portent sur :

- La réduction de la quantité de platine qui est un matériau onéreux
- La réduction de l'épaisseur de la membrane qui en s'opposant à la circulation des ions intervient pour une part non négligeable dans la résistance interne du système
- La recherche de matériaux de membrane pouvant fonctionner à des températures supérieures aux 40 – 90 degrés actuels [10].

1.6.2 Domaines d'applications des piles PEMFC:

La pile PEMFC fonctionne à basse température et est donc simple à utiliser. Cette basse température et l'utilisation d'un électrolyte solide ne posent pas de problèmes de fabrication (dilatation de parties du système, corrosion...). Elle a donc attiré l'attention des industriels dans différents secteurs où ces propriétés sont un atout important (applications portables, transport automobile, petites cogénérations...).

Pour les applications portables la pile PEMFC alimentée en hydrogène pur est destinée à remplacer les batteries afin de donner une autonomie supérieure et un rechargement instantané par remplacement du réservoir de carburant (voir figure1.8) [12].



Figure 1.8: Pile à combustible portable pour recharger un Smartphone avec de l'eau [2].

Dans le domaine des transports, la pile PEMFC 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 (voir figure 1.9).

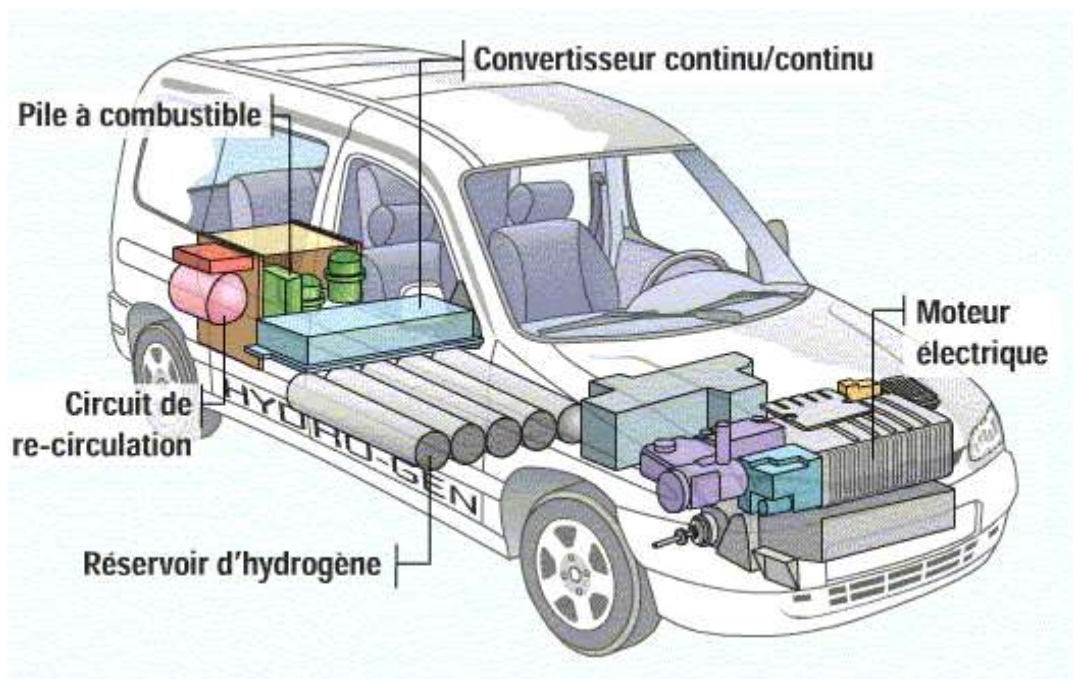


Figure 1.9: Intégration du système pile à combustible [13].

Les applications stationnaires sont aussi concernées par les piles PEMFC. Essentiellement en petite et moyenne puissance où la basse température de fonctionnement et les possibilités de fonctionner en régime variable sont des avantages. Elles sont alors généralement alimentées en gaz naturel, l'hydrogène étant produit par reformage (voir figure 1.10) [12].



Figure 1.10: unité de pile à combustible [14].

1. 7 Conclusion

La pile à combustible est apparue comme une alternative en faveur de la protection de l'environnement contre la pollution et l'effet de serre qui ont endommagé l'équilibre écologique. La pile à combustible existe sous différents types, chacun est utilisé dans un domaine. Dans ce chapitre nous avons défini et présenté l'historique de la pile à combustible et expliqué le fonctionnement de toutes les types de piles qui existent. Le phénomène physique est présenté par les équations simples d'oxydation/réduction des réactions. Le bon rendement et l'autonomie de la pile sont des avantages apparus dans les différentes applications.

Chapitre 02:

Modélisation et simulation de la pile PEMFC

2.1 Introduction

Le deuxième chapitre, présente un modèle diphasique de la pile PEMFC pour montrer l'effet de présence d'eau dans les électrodes sous deux formes liquide et vapeur. Le modèle englobe un ensemble de cellules avec leurs accessoires de conditionnements des réactants. La résolution des équations régissant est effectuée à l'aide d'un programme conçu par Matlab. Afin de montrer la performance de la pile, les courbes de la polarisation, la puissance et le rendement sont examinés.

2.2 Approche adoptée

Dès les premiers modèles comme celui de Siplinger et al. [15] et Bernardi et al. [16] et qui considèrent le flux comme monophasique, ils donnent une approximation acceptable dans un intervalle de courant limité. Généralement, les tendances sont orientées vers des modèles à deux phases comme celui de Siegel et al. [17], Y. Wang et al. [18] Mais ce sont des modèles plus compliqués et prend beaucoup d'espace mémoire lors du calcul.

Le modèle actuel est moins compliqué et est basé sur l'étude établie et validée par Nguyen et White [19]. En plus des hypothèses énumérées dans la réf. [19], ce modèle ne donne pas en compte les variations spatiales des variables du flux. De plus, la présence d'eau sous deux formes liquide et vapeur est prise en compte. La température appropriée est prise en considération dans cette étude. La première étape consiste à dériver un modèle qui peut être utilisé ultérieurement pour l'optimisation. Ce modèle devrait bien fonctionner en termes de précision, donc assez simple pour supporter des calculs répétés dans le processus d'optimisation.

2.3. Procédures mathématiques

2.3.1 Bilan des masses

Dans ce modèle simplifié, la dépendance spatiale des variables dans les canaux d'écoulement est négligée. Nous contrôlons essentiellement le flux de gaz et d'eau sous forme de vapeur et de liquide. Ainsi que la température de la pile est considérée comme constante. Par conséquent, les équations différentielles gouvernantes seront réduites à des équations algébriques. Pour une densité de courant donnée, les bilans massiques d'hydrogène et

d'oxygène sont calculés par la différence entre le débit entrant et le débit consommé par la réaction chimique:

- Bilan de masse hydrogène:

$$M_{H_2} = M_{H_2,in} - \frac{AI}{2F} \quad (2.1)$$

- Bilan de masse d'oxygène :

$$M_{O_2} = M_{O_2,in} - \frac{AI}{4F} \quad (2.2)$$

Le nitrogène est considéré comme gaz inerte, donc il ne participe pas à la réaction, ainsi, le débit entrant est égal au débit sortant.

$$M_{N_2} = M_{N_2,in} \quad (2.3)$$

Les débits des réactifs entrant dans les canaux sont choisis en fonction du débit consommé par la réaction chimique augmenté du débit stœchiométrique. Les débits d'hydrogène et d'air sont respectivement exprimés comme suit:

$$M_{H_2,in} = \xi_{H_2} \frac{AI}{2F} \quad (2.4)$$

$$M_{O_2,in} = \xi_{Air} \frac{AI}{4F} \quad (2.5)$$

Les débits de l'eau dans les écoulements avec la présence des phases de liquide et vapeur sont affectés par les facteurs suivants [20] [21] [15] [16] :

- la production de l'eau à la cathode par réaction électrochimique,
- Le transport de l'eau de l'anode à la cathode par l'intermédiaire de la force électro-osmose.
- La diffusion en amont de l'eau de la cathode vers l'anode,
- La condensation et l'évaporation de l'eau.

L'équilibre de l'eau dans le côté anode est formulé par l'équation (1.1) qui montre que la vapeur d'eau entrant dans le canal d'anode s'échappe comme vapeur ou liquide condensé ou passe à travers la membrane vers la cathode (voir figure 2.1) :

$$M_{w,a}^V = M_{w,a,in}^V - M_{w,a}^l - \alpha \frac{AI}{F} \quad (2.6)$$

Où α est le ratio des molécules d'eau nettes traversant la membrane rapporté au flux des protons.

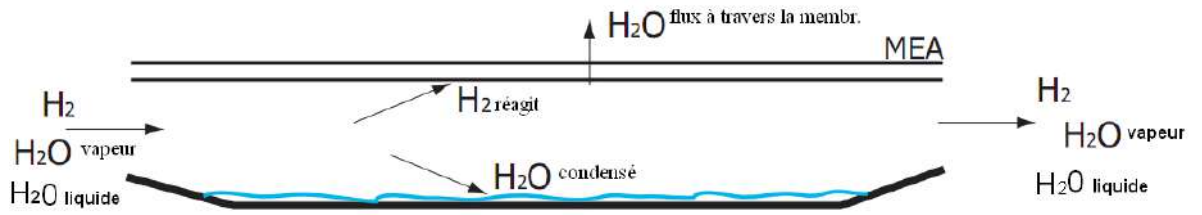


Figure 2.1: Bilan des flux au côté l'anode.

Dans le fonctionnement de la pile, on constate deux cas qui se présentent dans le canal anode :

- Le premier_cas: si à la fois des phases liquide et vapeur d'eau sont présentes dans le canal anodique, c'est-à-dire $M_{w,a}^l \neq 0$, et puisque nous considérons un régime stationnaire de sorte que l'équilibre est établi entre la phase liquide et la vapeur, donc la vapeur est saturée et le débit de vapeur d'eau est:

$$M_{w,a}^V = M_{H_2} \frac{p_w^{sat}}{p - p_w^{sat}} \quad (2.7)$$

Le débit d'eau liquide condensée quittant le canal d'anode, $M_{w,a}^l$, est la différence entre le reste des débits entrant et sortant de l'anode et qui peut être calculé par l'équation suivante:

$$M_{w,a}^l = M_{w,a,in}^V - M_{w,a}^V - \alpha \frac{AI}{F} \quad (2.8)$$

- Le deuxième cas : Si l'eau liquide n'est pas présente dans le canal d'anode, c.-à-d. $M_{w,a}^l = 0$, l'équilibre entre le liquide et les phases de vapeur de l'eau n'existe pas. Le débit de vapeur $M_{w,a}^V$ peut être calculé à partir de l'équation suivante :

$$M_{w,a}^V = M_{w,a,in}^V - \alpha \frac{AI}{F} \quad (2.9)$$

De la même manière, nous effectuons l'analyse de la situation côté cathode (voir figure 2.2), de sorte que le bilan hydrique dans ce canal comprend les débits de vapeur d'eau et d'eau condensée sortant par le canal cathode, la vapeur d'eau provenant de l'anode vers le canal cathodique, et l'eau produite à la cathode par la réaction électrochimique, et le bilan total peut être exprimée comme suit:

$$M_{w,c}^V = M_{w,c,in}^V - M_{w,c}^l + \alpha \frac{AI}{F} + \frac{AI}{2F} \quad (2.10)$$

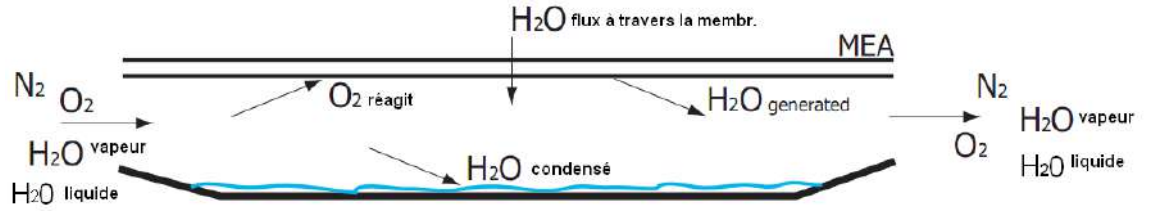


Figure2.2 : Bilan des flux au côté cathode.

- Le premier cas : Si les deux phases liquide et vapeur d'eau sont présentes dans le canal de cathode, c.-à-d. . $M_{w,c}^l \neq 0$, le débit de vapeur est :

$$M_{w,c}^V = (M_{O_2} + M_{N_2}) \frac{P_w^{sat}}{P - P_w^{sat}} \quad (2.11)$$

Le débit d'eau liquide condensé sortant du canal cathode, $M_{w,a}^l$, peut être exprimé par :

$$M_{w,c}^l = M_{w,c,in}^V - M_{w,c}^V + \alpha \frac{AI}{F} + \frac{AI}{2F} \quad (2.12)$$

- Le deuxième cas : Si l'eau liquide n'est pas présente dans le canal d'anode, c.-à-d. le débit d'eau liquide, $M_{w,c}^l$, est nul. Le débit de vapeur $M_{w,c}^V$ peut être calculé à partir de l'équation suivante :

$$M_{w,c}^V = M_{w,c,in}^V + \alpha \frac{AI}{F} + \frac{AI}{2F} \quad (2.13)$$

Le débit de vapeur d'eau entrant dans le canal d'anode peut être calculé en fonction de l'humidité relative de l'hydrogène :

$$M_{w,a,in}^V = \frac{y_{w,a,in}}{1 - y_{w,a,in}} M_{H_2,in} \quad (2.14)$$

$$y_{w,a,in} = RH_{H_2} \frac{p_w^{sat}}{P} \quad (2.15)$$

De la même façon le débit de vapeur d'eau entrant dans le canal de cathode peut être calculé en fonction de l'humidité relative de l'air :

$$M_{w,c,in}^V = \frac{y_{w,c,in}}{1 - y_{w,c,in}} M_{Air,in} \quad (2.16)$$

$$y_{w,a,in} = RH_{Air} \frac{p_w^{sat}}{P} \quad (2.17)$$

Où $y_{w,a,in}$ et $y_{w,c,in}$ sont respectivement les fractions molaires de la vapeur d'eau par rapport au gaz humides qui entrent dans l'anode et la cathode, P c'est la pression des mélanges gaz-vapeur dans les canaux.

La pression de saturation de vapeur d'eau mesurée en unité "atm" varie en fonction de la température (T °C) suivant la relation [22] :

$$P_w^{Sat} = 10^{-2,18+2,95*10^2T-9,18*10^{-5}T^2+1,44*10^{-7}T^3} \quad (2.18)$$

Pour déterminer les débits s'échappant de l'empilement, il faut d'abord calculer le coefficient α représentant le rapport net des molécules d'eau traversant la membrane, qui est la différence entre les coefficients électro-osmotiques et celui de retour par gradient de concentration [15] :

$$\alpha = n_d - n_b$$

Le coefficient électro-osmotique varie en fonction de l'activité d'eau :

$$n_d = 0,0049 + 2,024a_a - 4,53a_a^2 + 4,09a_a^3$$

L'activité d'eau à l'anode et la cathode s'obtient respectivement par les relations [22] :

$$a_a = \left(\frac{M_{w,a}^V}{M_{w,a}^V + M_{H_2}} \right) \frac{P}{P_w^{Sat}}$$

$$a_c = \left(\frac{M_{w,c}^V}{M_{w,c}^V + M_{O_2} + M_{N_2}} \right) \frac{P}{P_w^{Sat}}$$

Le coefficient de retour par gradient de concentration d'eau [20] :

$$n_b = \frac{F}{I} D_w \frac{(c_{w,c} - c_{w,a})}{t_m}$$

Le coefficient de diffusion d'eau dans la membrane est exprimé par la relation [23] :

$$D_w = n_a D_0 \exp \left[2416 \left(\frac{1}{303} - \frac{1}{273 + T} \right) \right]$$

La concentration d'eau aux interfaces de la membrane sur les deux côtés anode et cathode sont respectivement exprimés par les relations [24] :

$$c_{w,a} = \frac{\rho_{m,dry}}{M_{m,dry}} (0,300 + 10,8a_a - 16,0a_a^2 + 14,1a_a^3)$$

$$c_{w,c} = \frac{\rho_{m,dry}}{M_{m,dry}} (0,300 + 10,8a_c - 16,0a_c^2 + 14,1a_c^3)$$

Avec $\rho_{m,dry}$ et $M_{m,dry}$ sont respectivement la masse volumique et la masse molaire de la membrane sèche.

Remarque : on constate que le coefficient α dépend des débits de vapeur d'eau qui varient de leurs tours en fonction du coefficient α . A cet effet ce la détermination de ce dernier coefficient nécessite la résolution d'une équation implicite $\alpha = g(\alpha)$.

2.3.2 Électrochimie de la pile

La tension effective des cellules peut être exprimée comme la différence entre la tension thermodynamique réversible des cellules et les pertes dues aux différentes surtensions :

$$V_{cel} = V_{rev} - V_{act} - V_{ohm} - V_{con} \quad (2.19)$$

- La tension thermodynamique réversible : cette tension est basée sur l'équation de Nernst [23].

$$V_{rev} = V_{oc} + \frac{R(273 + T)}{2F} \ln \left(\frac{P_{H_2} P_{O_2}^{0,5}}{P_{H_2O}} \right)$$

Avec V_{oc} est la tension de circuit ouvert.

- La surtension d'activation représente la perte de tension due au taux de réactions sur la surface des électrodes, tout en supposant que cette surtension est principalement située à la cathode [23] :

$$V_{act} = \frac{R(273 + T)}{0,5F} \ln \left(\frac{I}{I_0 P_{O_2}} \right)$$

Avec I_0 est la densité de courant d'échange.

- La surtension ohmique représente la chute de tension due à la résistance à l'écoulement des protons dans l'électrolyte [23].

$$V_{ohm} = \frac{I t_m}{\sigma_m}$$

Avec t_m est l'épaisseur de la membrane,

La résistance de la membrane σ_m est exprimée par la relation [22] :

$$\sigma_m = \left(0,00514 \frac{M_{m,dry}}{\rho_{m,dry}} \lambda_m - 0,00324 \right) \exp \left\{ 1268 \left(\frac{1}{303} - \frac{1}{273 + T} \right) \right\}$$

Avec λ_m la contenance d'eau dans la membrane. Dans la littérature, on trouve plusieurs approches utilisées pour la détermination de la contenance d'eau dans la membrane. Golbert1 et al. [25] prend comme celle de l'anode, L.Wang et al.[26] calcule avec la même valeur de la cathode et Pukrushpan [27] utilise la valeur moyenne de l'activité d'eau entre l'anode et la cathode :

$$a_m = \frac{a_a + a_c}{2}$$

Dans ce travail on a opté à cette dernière approche.

La contenance d'eau est donnée par la relation suivante Springer et al. [22] :

$$\lambda_m = 0,043 + 17,81a_m - 39,85a_m^2 + 36,0a_m^3$$

La surtension ohmique représente la perte de tension due à la limitation de transport de la masse [28] :

$$V_{con} = \beta I^K \ln\left(\frac{I_L}{I_L - I}\right)$$

Avec βI^K est le terme d'amplification de transport de masse lié à la surtension, exprimé en unités de tension, et I_L est la densité de courant de limitation.

En substituant des différents termes précédents dans l'équation (2.19) on obtient l'expression de la tension de cellule :

$$V_{cel} = V_{oc} + \frac{R(273+T)}{2F} \ln\left(\frac{P_{H_2} P_{O_2}^{0,5}}{P_{H_2O}}\right) - \frac{R(273+T)}{0,5F} \ln\left(\frac{I}{I_0 P_{O_2}}\right) - \frac{I t_m}{\sigma_m} - \beta I^K \ln\left(\frac{I_L}{I_L - I}\right) \quad (2.20)$$

- La pression partielle d'une espèce "i" dans les mélanges gazeux est calculée par la relation [22] :

$$P_i = \frac{M_i}{\sum M_i} P$$

- Pression d'hydrogène

$$P_{H_2} = \frac{M_{H_2}}{(M_{H_2} + M_{w,a}^V)} P$$

- Pression d'oxygène

$$P_{O_2} = \frac{M_{O_2}}{(M_{O_2} + M_{N_2} + M_{w,c}^V)} P$$

- Pression de vapeur d'eau

$$P_{H_2O} = \frac{M_{W,c}^V}{(M_{O_2} + M_{N_2} + M_{W,c}^V)} P$$

2.4 Rendement du système

Pour évaluer les performances d'une pile à combustible, l'efficacité est généralement utilisée comme indicateur. L'efficacité du système est définie comme le rapport entre la puissance nette produite et la puissance propre du carburant:

$$\eta = \frac{W_{stack} - W_{prs}}{W_{fuel}} \quad (2.21)$$

- La puissance propre du carburant :

$$W_{stack} = n_{cel} \xi_{H_2} \frac{AI}{4F} LHV \quad (2.22)$$

Avec LHV est le pouvoir calorifique inférieur de l'hydrogène, et n_{cel} est le nombre de cellules. Dans les calculs on prend le nombre $n_{cel} = 1$, mais la surface A représentera toute la surface active de MEA.

- La puissance brute produite par la pile [29] :

$$W_{stack} = n_{cel} AIV \quad (2.23)$$

- La puissance parasite c'est la somme des puissances consommées par le compresseur et les autres accessoires d'humidification et de refroidissement [30] :

$$W_{prs} = W_{comp} + W_{others} \quad (2.24)$$

- La puissance W_{comp} consommée par le compresseur [30] :

$$W_{comp} = \frac{c_p T_e}{\eta_c \eta_{mt}} \left\{ \left(\frac{P}{P_{in}} \right)^{0,286} - 1 \right\} m_{air} \quad (2.25)$$

Avec le débit massique d'air [30] :

$$m_{air} = 3,57 * 10^{-7} n_{cel} \xi_{air} AI \quad (2.26)$$

- Les autres pertes de puissance W_{others} sont supposées par Pei et al. [31] égal à 2 kW sur la base d'une cellule produisant une puissance de 62,5 kW. Au lieu de cette valeur, nous

prendrons W_{others} de l'ordre de 5% de la puissance nominale produite par la batterie. on suppose que les rendements du compresseur et du moteur électrique sont constants, comme l'approche adoptée par d'autres auteurs [29] :

$$W_{others} = 0,05W_{stack} \quad (2.27)$$

2.5 Procédures numériques

Pour une surface donnée on fixe une valeur de la densité du courant et on procède à la détermination des débits entrants des réactants. En suite on cherche la racine de l'équation implicite $\alpha = g(\alpha)$ à l'aide d'une opération itérative, et puis on aborde le calcul des débits sortant et la tension correspondante. La solution numérique des équations de conservation est calculée par un programme conçu avec le logiciel MATLAB. Les résultats de calcul des itérations convergent avec une erreur relative de 1.e-4. Les valeurs des paramètres physiques utilisés dans le modèle et les conditions de cas de base sont présentées sur le tableau (2.1).

Tableau 2.1: Les paramètres et les conditions de cas de base [23].

Désignation	Valeur	Unité
Constante d'amplification (β)	0,085	V/cm ² A ⁻¹
Exposant de constante d'amplification (k)	1.1	
Densité du courant limite (I_L)	1.4	Acm ⁻²
Pouvoir calorifique inférieur d'hydrogène (LHV)	24 x 10 ⁵	Jmol ⁻¹
Densité de courant d'échange à la cathode (I_0)	0.01	Acm ⁻²
Tension de circuit ouvert (V_{oc})	1.1	V
Coefficient de diffusion d'eau dans la membrane (D_0)	5,5 x 10 ⁻⁷	cm ² s ⁻¹
Masse volumique de la membrane sèche $\rho_{m,dry}$	2	gcm ⁻³
Masse molaire de la membrane sèche $M_{m,dry}$	1100	gmol ⁻¹
Épaisseur de la membrane (t_m)	5 x 10 ⁻³	Cm
Rendement du compresseur (η_c)	0,85	
Température d'entrée au compresseur (T_e)	15 °C	°C
Pression d'entrée au compresseur (P_{in})	1	Atm
Rendement du moteur électrique (η_{mt})	0,85	
Pouvoir calorifique de l'air (c_p)	1004	JK ⁻¹ kg ⁻¹
Température de fonctionnement T	80	°C
Humidités relative anode /cathode RH	100/50	%
Taux stœchiométrique anode /cathode ξ	1,25/2	
Pression de la cellule P	2	Atm

2.6 Validation de modèle

Pour une puissance nominale de la pile de 50 kW on a effectué une comparaison (voir tableau 2.2) avec le travail effectué par Sheila et al. [23], qui montre une bonne concordance. L'évaluation est effectuée pour un cas de base correspondant à une pile ayant un MEA d'une surface active totale de $25 \times 10^4 \text{ cm}^2$ avec une alimentation en hydrogène pur et de l'air ambiant.

Tableau 2.2: Comparaison des résultats.

Rubrique	Résultats obtenues	Résultats de Sheila et al. [23]
Rendement (%)	44,12	44,18
Surface (cm^2)	250000	250000
Courant (A/cm^2)	0,25	0,25
Tension (V)	0,79	0,788
RH de H2 (%)	100	100
RH de l'air (%)	50	50
Stœchiométrie anode	1,25	1,25
Stœchiométrie cathode	2	2
Pression de la pile (atm)	2	2

2.7 Effet de la variation de la pression de la pile

Les figures 2.3, 2.4 et 2.5 montrent l'effet de la variation de la pression opératoire sur les courbes de polarisation, la densité de puissance et le rendement de système, respectivement. La courbe de polarisation représente la même allure que le rendement de système. D'une part, on constate la chute de la tension et le rendement avec l'augmentation de la densité de courant, cela est dû à l'apparition de surtensions citées précédemment dans la section 2. D'autre part, la densité de puissance accroit avec l'augmentation de densité de courant et qui atteint son maximum dans un intervalle relativement élevé de la densité de courant. Les courbes de polarisation montrent également qu'on aura des gains de tension quand la pression augmente. Cependant, la pression n'a pas un effet significatif sur le rendement de système parce que l'augmentation de la tension sera pénalisé par l'augmentation de la puissance parasite qui de son tour accroit en fonction de la pression. En outre, l'augmentation de pression provoque une hausse appréciable de puissance dans la zone des densités de courant élevées. Les résultats obtenus sont en bon concordance avec celles trouvés dans les travaux de L. Wang et al. [26] et Sheila et al. [23].

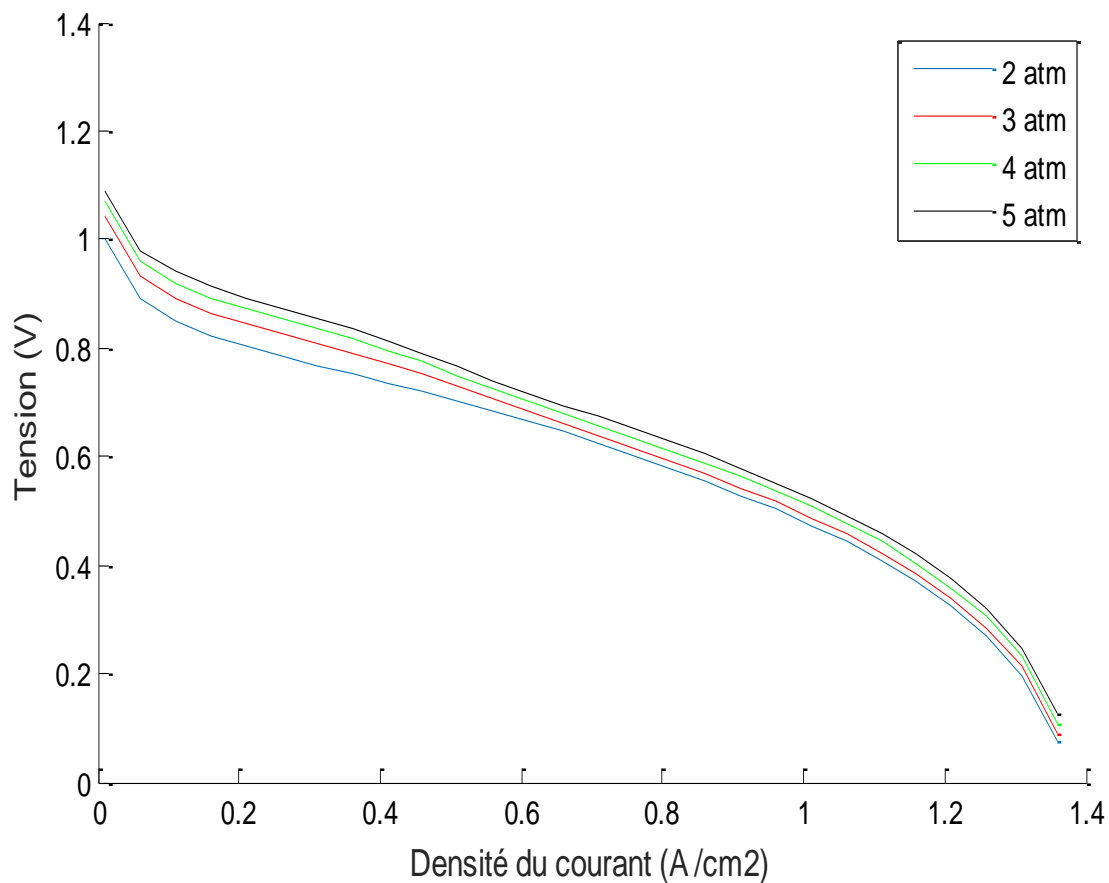


Figure 2.3: Effet de la variation de pression sur la polarisation.

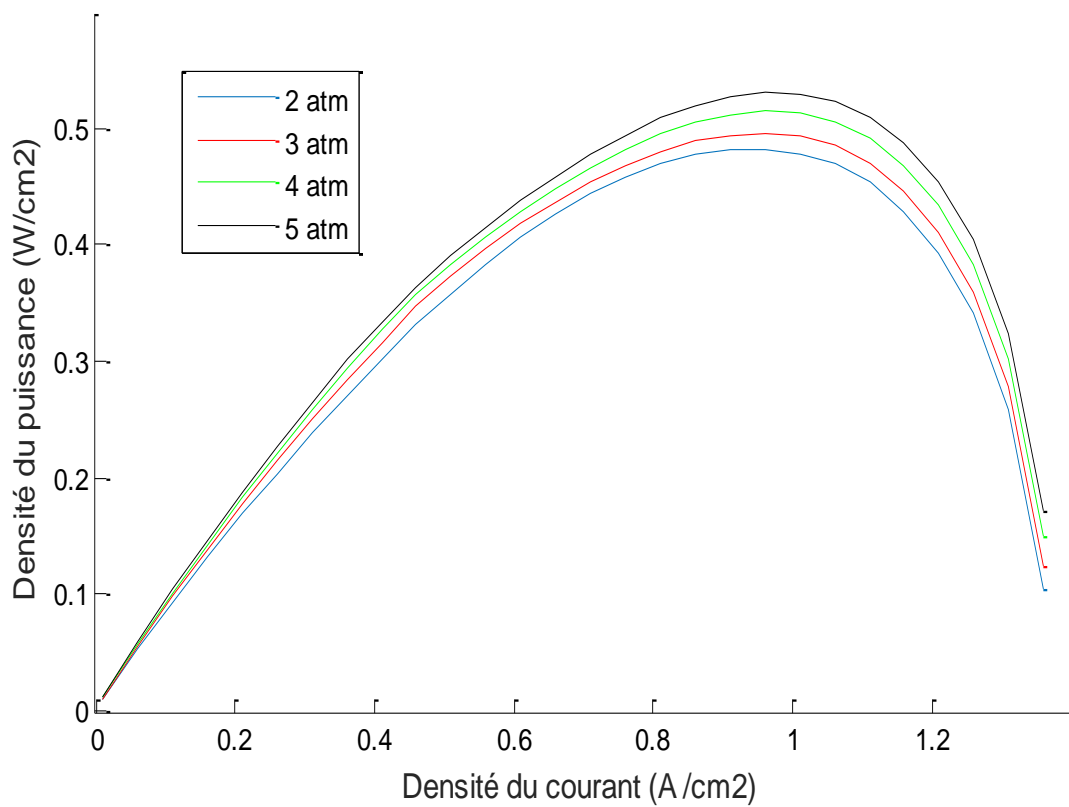


Figure 2.4: Effet de la variation de pression sur la puissance.

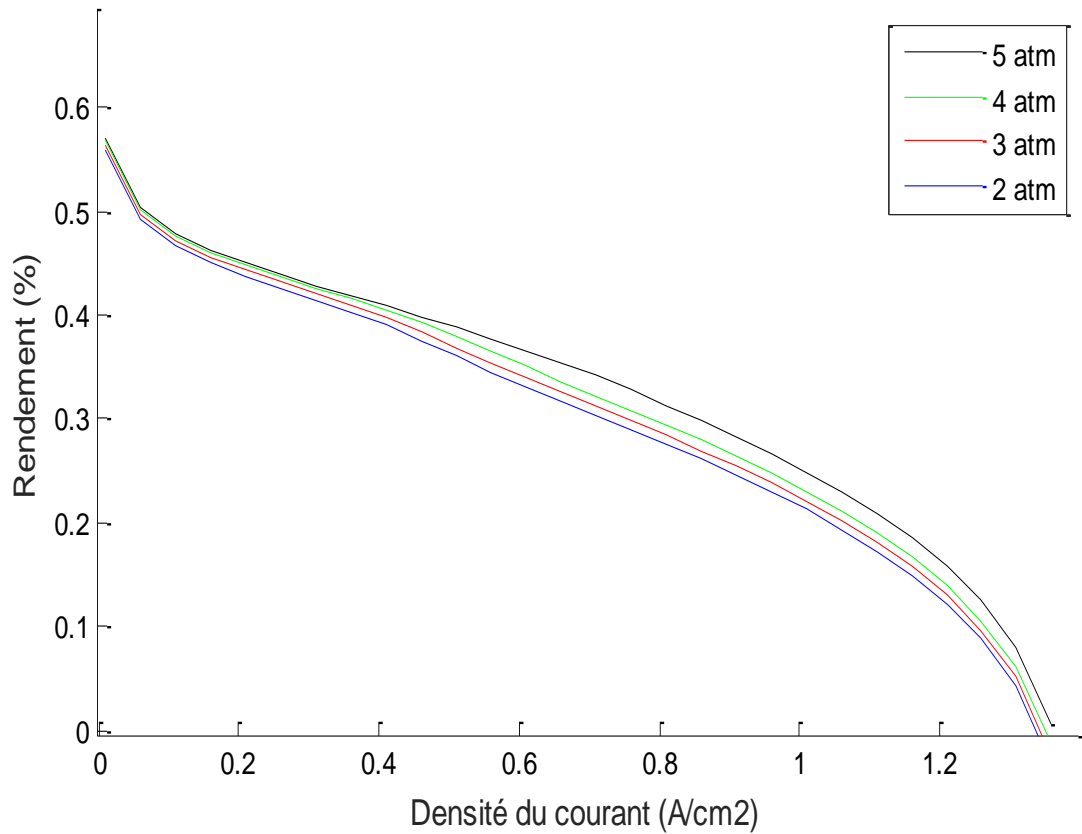


Figure 2.5: Effet de la variation de pression sur le rendement.

2.8 Effet de la variation de l'humidification à l'anode

Le paramètre humidification des réactants joue un rôle important dans l'amélioration de la performance de la pile. On a examiné uniquement celle de l'anode car on considère qu'au côté cathode l'humidification dans la plus part des cas est assurée par la vapeur remportée par l'air ambiant. Donc la majorité d'énergie dépensée dans l'humidification des réactants se concerne en premier lieu l'hydrogène. La rationalisation de cette dépense va entraîner un gain d'énergie. Les résultats obtenus (voir figures 2.6, 2.7, 2.8) montrent un léger chute est enregistré sur les trois courbes. Une étude d'optimisation est nécessaire pour voir à quel niveau de réduction de l'humidification on peut descendre.

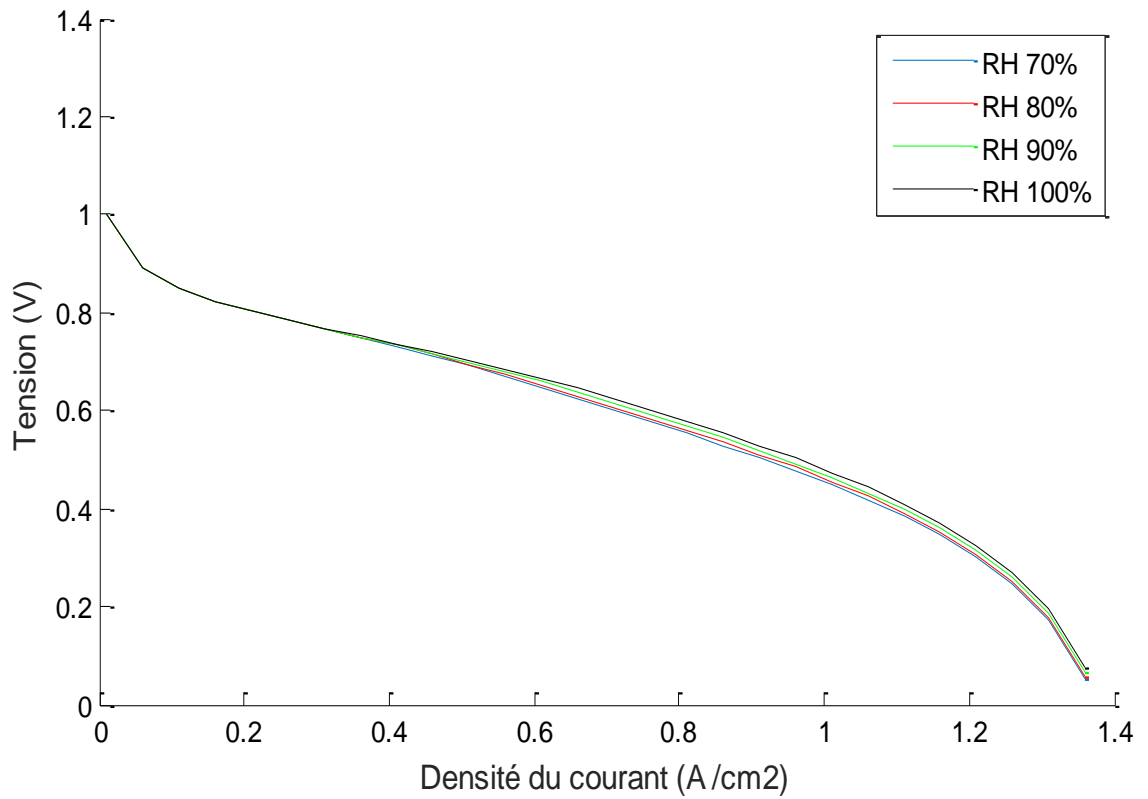


Figure 2.6 : Effet de la variation d'humidification sur la polarisation.

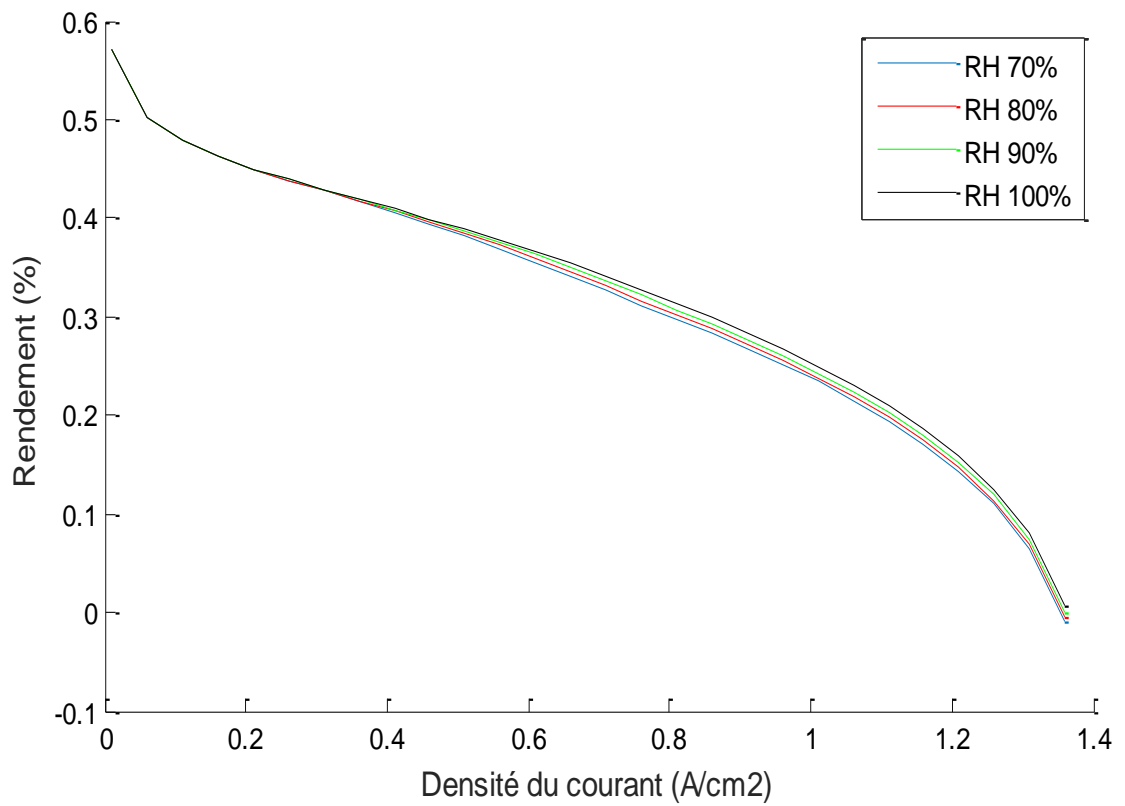


Figure 2.7: Effet de la variation d'humidification sur le rendement.

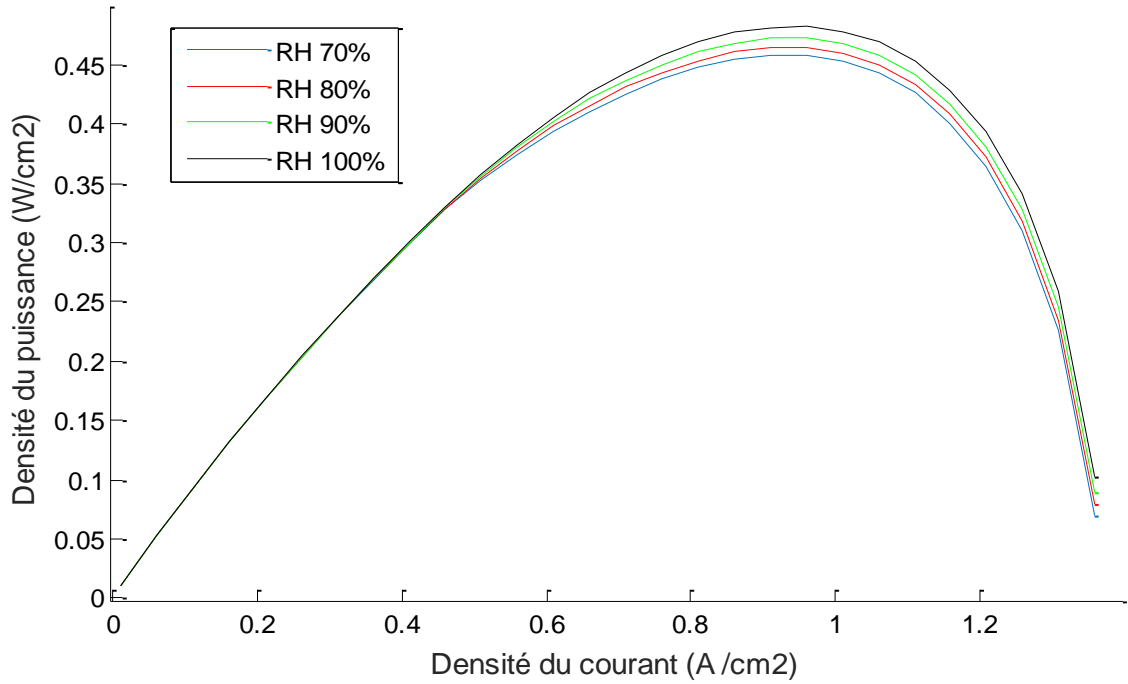


Figure 2.8: Effet de la variation d'humidification sur la puissance.

2.9 Conclusion

En analysant la courbe de polarisation du modèle diphasique, on constate que la tension enregistre une chute très rapide à la forte densité de courant.

Les résultats obtenus indiquent que pour atteindre un rendement élevé, le système doit fonctionner à la basse densité de courant. La basse densité de courant coïncide avec une basse densité de puissance, cela signifie qu'il faut un plus grand système caractérisé par une plus large surface active pour améliorer la puissance. Réciproquement, pour la même puissance produite, un petit système exige une densité de puissance élevée, ce qui nécessite une densité de courant élevée, et par conséquent on tombe dans l'intervalle à un rendement faible. Cela implique que le rendement et la taille sont des objectifs opposés. Une étude d'optimisation est nécessaire pour examiner les conditions de fonctionnement favorable pour atteindre un rendement élevé avec un faible encombrement de la pile.

Chapitre 03:

**Application sur l'alimentation et chauffage
d'une caravane**

3.1 Introduction

Dans ce chapitre, on aborde les applications sur l'alimentation et chauffage des locaux. On effectue le calcul des besoins en énergie électrique et le flux de chaleur nécessaires pour chauffer la caravane afin d'obtenir le confort thermique. Ainsi, on entame le dimensionnement de la pile à combustible et le calcul d'hydrogène nécessaire pour alimenter la caravane en énergie et en chauffage tout en utilisant les paramètres physiques des matériaux de construction de la caravane.

3.2 Transfert thermique

3.2.1 Définition

Le transfert thermique peut être défini comme la transmission de l'énergie d'une région à une autre sous l'influence d'une différence de température. Il est régi par une combinaison de lois physiques. La littérature traitant du transfert de chaleur reconnaît essentiellement trois modes de transmission thermique : la conduction, la convection et le rayonnement [32].

3.2.2 Les modes des transferts thermiques

On distingue habituellement trois modes de transfert de chaleur

a. Transfert par conduction

L'échange de chaleur entre deux points de solide ou de liquide (ou de gaz) n'est pas transparent et opaque (voir figure 3.1). L'énergie de vibration (ou d'induction) se déplace d'un atome à l'autre (molécule à molécule). C'est un processus de transfert lent, exprimé dans l'équation suivante [33].

$$\varphi = -\lambda A \frac{dt}{dx} \quad (3.1)$$

Le $\frac{dt}{dx}$ gradient de température au point x considéré.

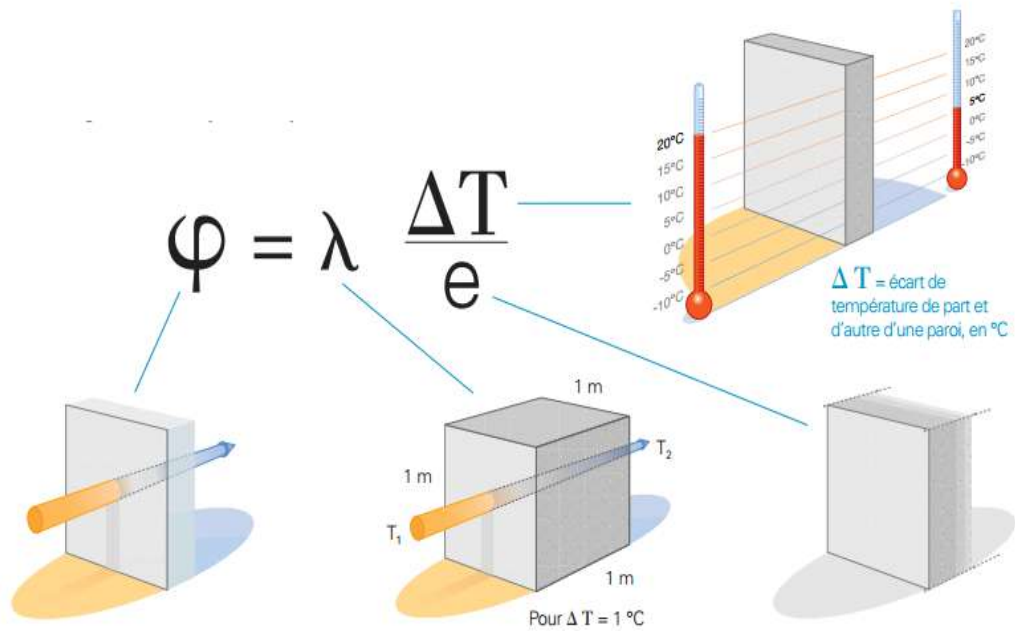


Figure 3.1 : Transfert de chaleur par conduction [32].

b. Transfert par convection

Les phénomènes de convection interviennent dans la transmission de la chaleur chaque fois qu'un fluide se déplace par rapport à des éléments fixes. Lorsque se produit au sein du fluide des courants du simplement aux différences de densité résultant des gradients de température, on dit que la convection est naturelle ou libre. Par contre, si le mouvement du fluide est provoqué par une pompe ou un ventilateur, le processus est appelé convection forcée (voir figure 3.2). il est exprimé par l'équation suivante [32]:

$$\phi = h A (T_{\infty} - T_s) \quad (3.2)$$

Où

h : le coefficient de transfert de chaleur par convection .

A : surface d'échange.

T_{∞} : température du fluide.

T_s : température de la paroi.

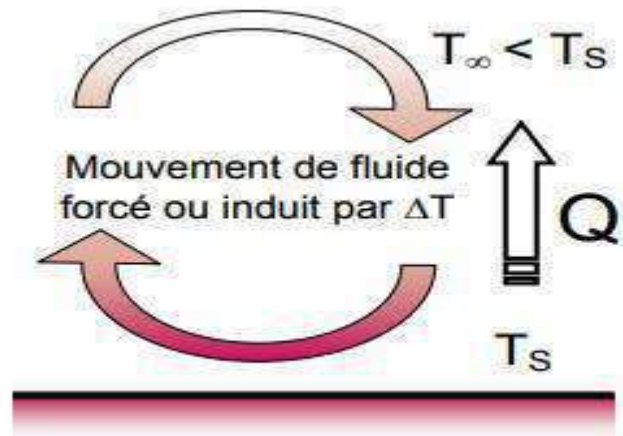


Figure 3.2 : Schéma du transfert de chaleur par convection [33].

c. Transfert par rayonnement

Le rayonnement est un phénomène caractérisé par un transfert thermique ne nécessitant aucun milieu intermédiaire. Le flux de chaleur est de nature électromagnétique et transite par le rayonnement infrarouge. Les rayons se propagent en ligne droite dans l'espace jusqu'à ce qu'ils soient interceptés par un solide. La transmission de chaleur par rayonnement est le procédé utilisé par le soleil pour réchauffer notre planète. Les braises tièdes n'émettent plus de clarté mais continuent à rayonner de la chaleur pendant des heures seulement sous forme de radiations infrarouges (voir figure 3.3) [32].

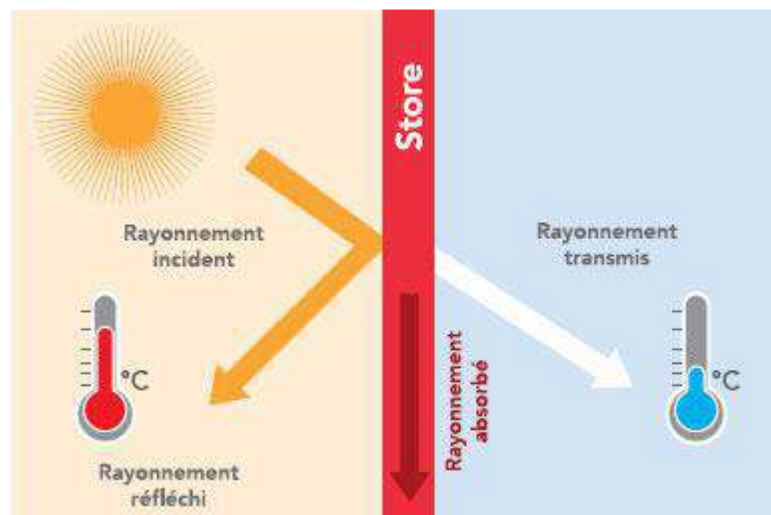


Figure 3.3: Transfert de chaleur par rayonnement.

3.3 Confort thermique

Dans les milieux bâtis, le confort thermique constitue une exigence essentielle, à laquelle le concepteur doit apporter les réponses nécessaires. L'environnement thermique, est

caractérisé par quatre grandeurs physiques : la température de l'air, l'intensité de rayonnement solaire, l'humidité et la vitesse de l'air.

Ces variables, réagissent avec l'activité et la vêtue du corps humain pour établir son état thermique, et constituent ensemble les six paramètres de base des échanges thermiques entre l'homme et son environnement (voir figure3.4) [34].

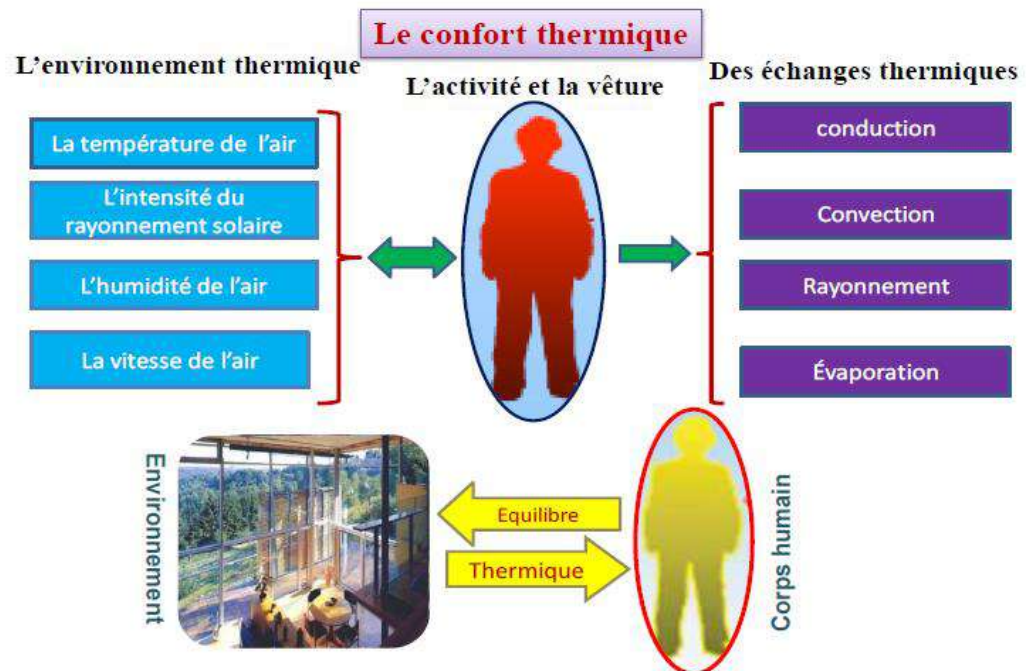


Figure 3.4 : le cycle de confort thermique[35].

3.3.1 Paramètres du confort thermique

a. Température

Compte tenu de son importance dans l'intensité des échanges thermiques, il est naturel de s'intéresser à la température qui caractérise l'ambiance du logement on distingue:

1. La température de l'air ambiant.
2. La température des parois.
3. La température ressentie.

b. Humidité relative

L'air contient de la vapeur d'eau. Le taux d'humidité (qui varie de 0 à 100%), mesure la quantité d'eau. Plus la température augmente, plus l'air peut contenir de la vapeur d'eau : à 15°C, l'air contient 10g de la vapeur d'eau par kg d'air, alors qu'à 20°C, cette quantité passe à

15g. Entre 30 et 70%, l'humidité relative pèse peu sur la sensation de confort thermique. Nous restons dans la zone de confort. Sous 20%, l'air est trop sec et au delà de 80%, trop humide.

c. vitesse de l'air

La vitesse de l'air joue un grand rôle dans les échanges convectifs et évaporatoires, elle intervient dans la sensation de confort thermique de l'occupant des qu'elle est supérieure à 0,2 m/s Toutefois, à l'intérieur des caravanes, ces vitesses demeurent limitées, ne dépassant pas généralement cette vitesse, sauf en cas de mauvaise conception du, en revanche, être tenue pour responsable de l'apparition d'inconforts locaux, liés à la présence de courants d'air froids ou chauds localisés.

3.4 La caravane

3.4.1 Description général

Une caravane est une remorque tractée par un véhicule routier proposant un espace d'habitation confortable et protégé. Elle permet de jouir de sa propre « maison » durant un voyage ou pendant les vacances, sans devoir faire halte dans un hôtel et pouvoir rester dans des endroits où aucun hébergement n'est proposé.

En général, les touristes visitent les régions du sud algérien (grand désert comme la région d'Ouargla) pour passer leurs vacances d'hiver en utilisant des caravanes. Parmi les types de caravanes utilisés, on constate celles de la marque Sterckeman de 4,3 mètres de long, 1,8 mètre de large et 2 mètres de hauteur. La conception de la caravane comporte une porte et deux fenêtres placées sur deux murs. Elle se dispose d'un lit double, un canapé-lit, un réfrigérateur, une télévision et une armoire contenant les accessoires de cuisine. La capacité de la caravane peut atteindre jusqu'à trois personnes (voir figure 3.5).



Figure 3.5: caravane d'un type Sterckeman.

3.4.2 Evaluation de besoin électrique pour les accessoires

Pour calculer les besoins en énergie électrique, on recense les équipements alimentés en électricité (réfrigérateur, lampe, télévision, ordinateur portable, téléphone portable) et sa consommation (voir figure 3.6, 3.7, 3.8, 3.9, 3.10, 3.11). Ainsi, le temps de fonctionnement de ces appareils durant la période concernée par l'alimentation avec la pile à combustible. La caravane est conçue pour une capacité de trois personnes (un couple avec un enfant) qui occupe la caravane pendant la période du soir (la nuit), se qui nécessite le besoin des appareils électroniques et électriques suivants :

Réfrigérateur petite taille

Télévision

Ordinateur portable

Téléphone portable

Lampe LED

Concernant les temps d'utilisation, les heures de fonctionnement des appareils ont été réparties séparément afin que les consommations ne se cumulent pas en même temps. Leur utilisation a été estimée comme suit :

- Au début de la période de 17h.00 à 20h.00 : fonctionnement de l'ordinateur portable.
- Au début de la nuit de 20h00 à 23h00 lorsque les gens sont éveillés, la télévision est allumée.
- La lampe est allumée pendant la période de 19h00 à 00h00.
- Le réfrigérateur fonctionne pendant la période de 00h.00 à 5h.00.
- Le téléphone portable est mis en charge pendant la période de 6h.00 à 8h.00.

Le tableau 3.1 présente la puissance électrique en watts pour les différents appareils existants dans la caravane.

Sachant que le temps de fonctionnement est la puissance des l'équipement électrique sont limite, donc on peut considérer que la chaleur dégagée par c'est équipement est très faible et son influence sur le bilan calorifique est négligeable.

Tableau 3.1 : puissance des appareils électriques[36].

Equipement	P(W)
Réfrigérateur (ENIEM)	160
Lampe (LED)	10
Télévision (SAMSUNG32 pouces)	100
Ordinateur portable (Lenovo. X240)	80
Téléphone portable (SM-M205F/DS)	15

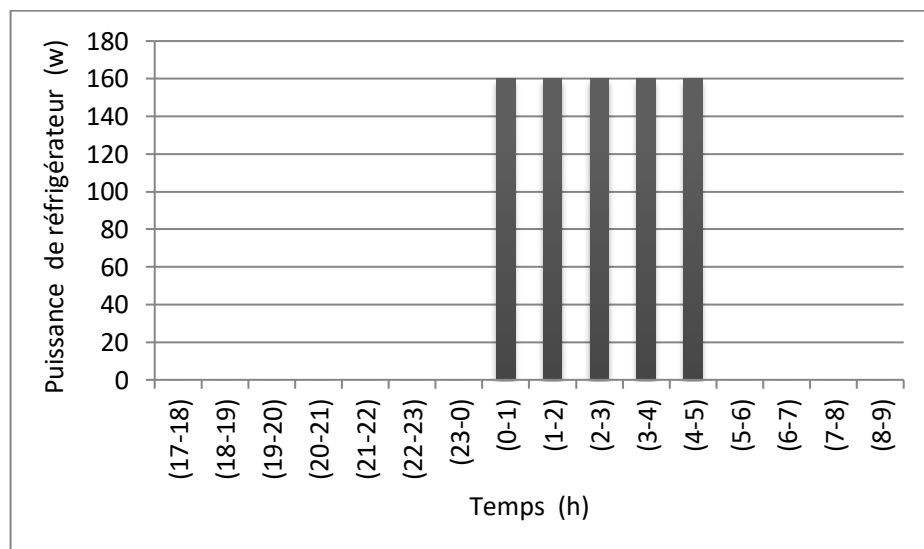


Figure 3.6:consommation électrique du réfrigérateur.

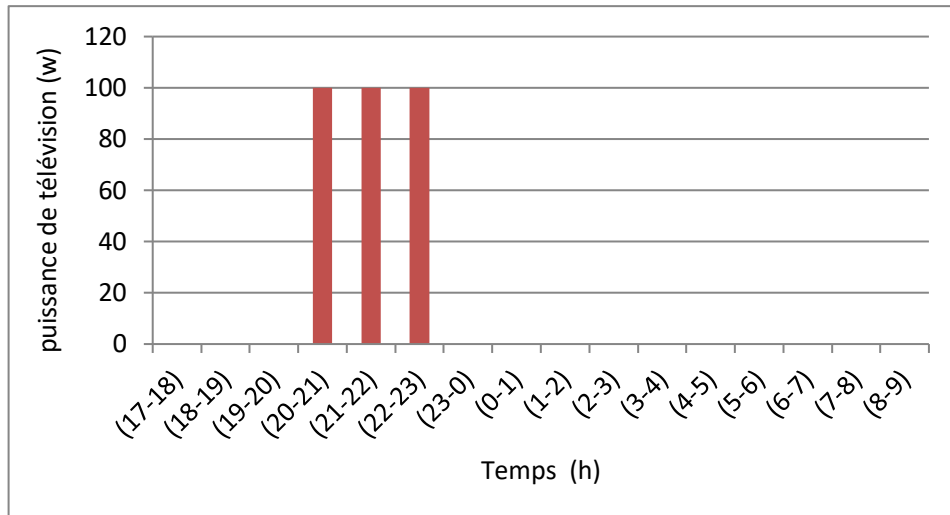


Figure 3.7:consommation électrique de la télévision.

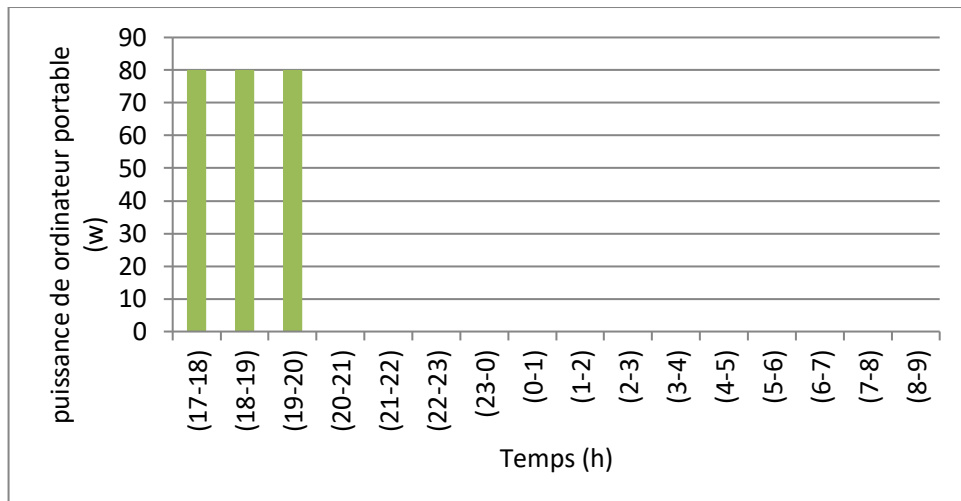


Figure 3.8:consommation électrique de l'ordinateur portable.

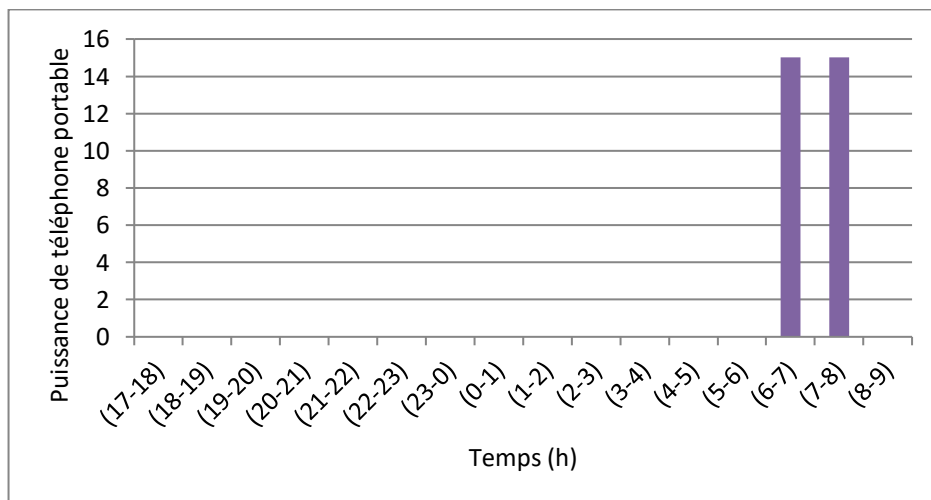


Figure 3.9:consommation électrique de téléphone portable.

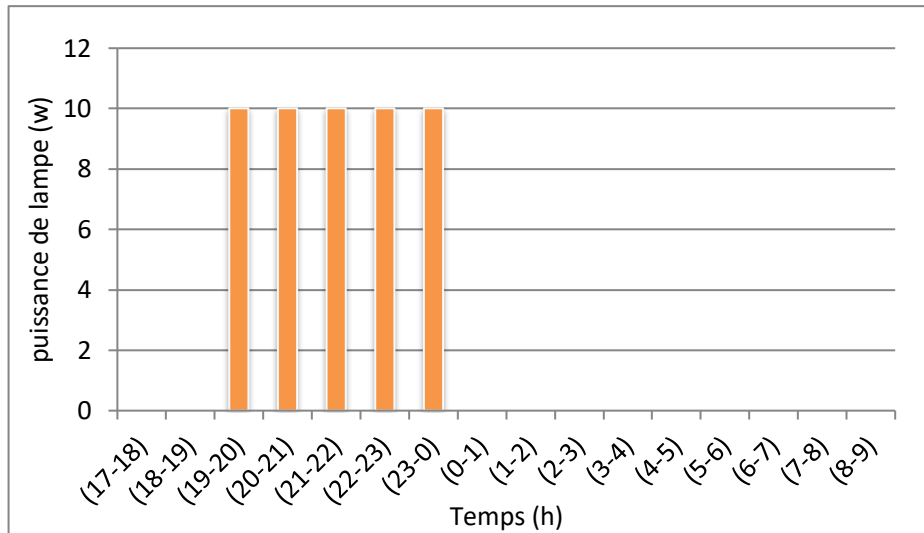


Figure 3.10:consommation électrique de la lampe.

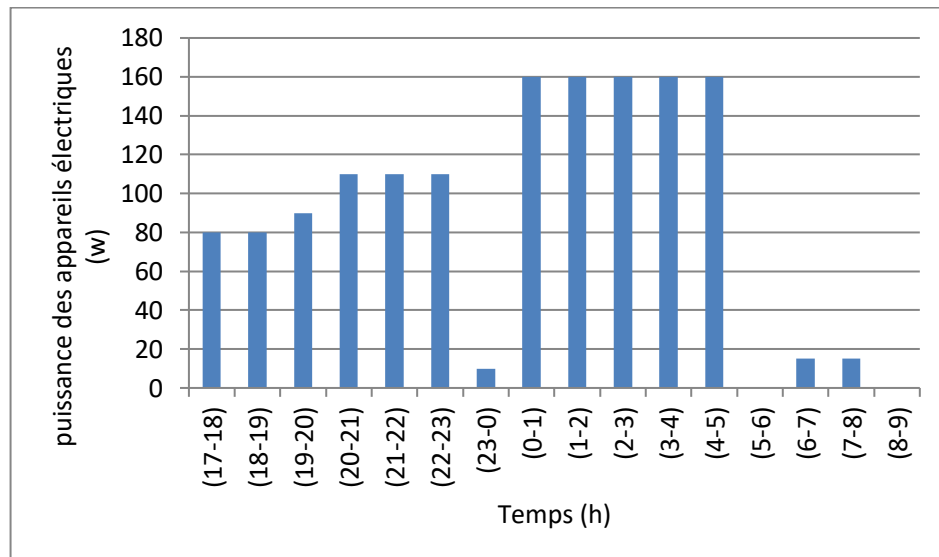


Figure 3.11:consommation électrique des appareils électrique.

La consommation d'électricité = 1420 Wh

3.4.3 Evaluation des besoins en chauffage

Le flux de chaleur nécessaire pour chauffer la caravane est évalué en calculant le flux de chaleur traversant chaque mur durant les heures de fonctionnement de la pile. On considère que l'échange thermique est unidimensionnel suivant l'épaisseur du mur. Les parois (murs) se composent de différents matériaux et que sont définis par leurs caractéristique physiques (conductivité thermique et épaisseur). Les coins de caravanes sont l'égerment arrondies, donc on peut considérer que la forme de la caravane est un parallélépipède (voir figure 3.12), L'évaluation de flux de chaleur est effectué à l'aide d'un programme écrite sur le logiciel Excel.

Chapitre03 : Application sur l'alimentation et chauffage d'une caravane

Les coefficients de transfert de chaleur par convection entre l'air et les surfaces interne et externe des murs sont respectivement : $h_i=10 \text{ w/m}^2.\text{k}$, $h_e=20 \text{ w/m}^2.\text{k}$

Les températures sont prises au cours de la journée du 04 Janvier 2021 à la ville d'Ouargla (station météorologique d'Ouargla) à partir du cinq heures de soir à neuf heures du matin (voir figure 3.13) Ce jour a été choisi car il s'agit du jour le plus froid de la saison hivernale de l'année concernée. La période de 17h à 9h a été choisie car c'est la période du coucher du soleil et pendant la journée nous utilisons des panneaux photovoltaïques. Pour calculer le flux de chaleur à travers les murs on utilise la relation :

$$\phi = \frac{(T_{in}-T_{amb})}{R_t} \quad (3.3)$$

R_t : Resistance thermique du mur

T_{in} : Température à l'intérieur de la caravane (22 C°)

T_{amb} : Température ambiante

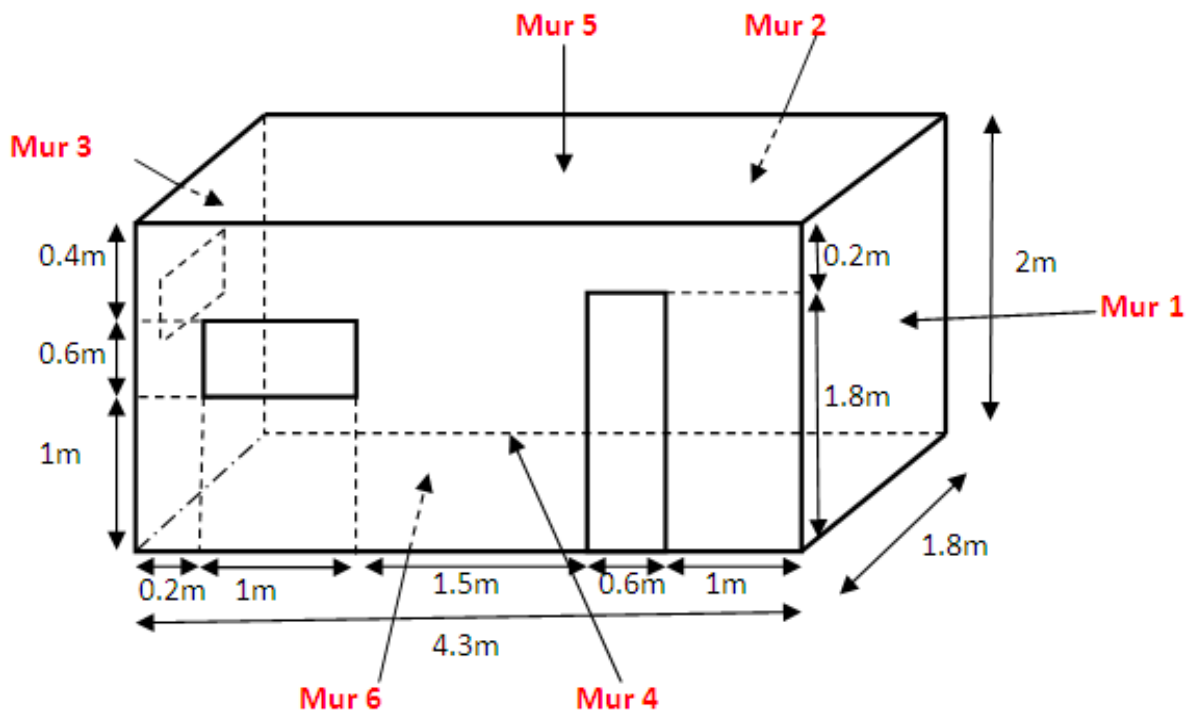


Figure 3.12:Schéma de la caravane.

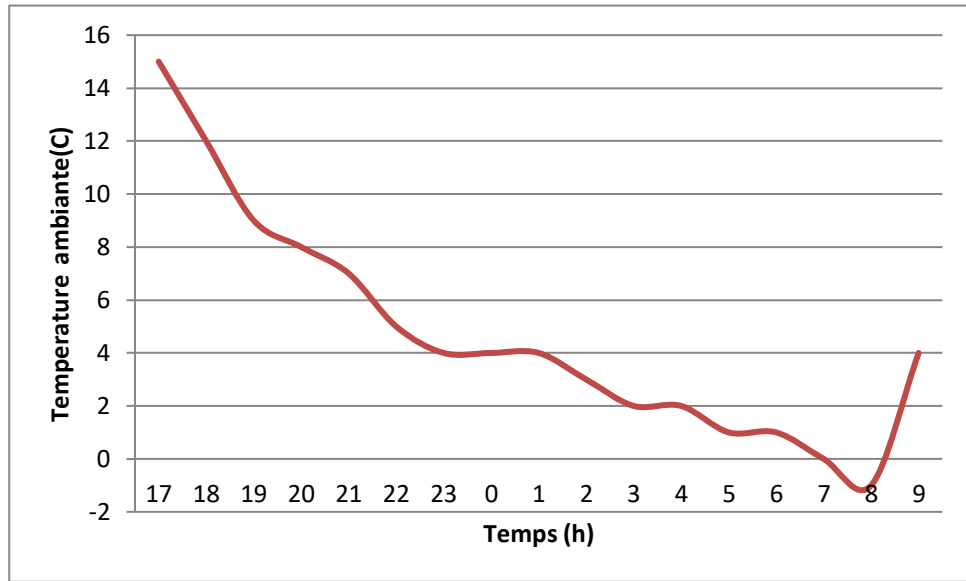


Figure 3.13: La variation de température à Ouargla pour la journée 04-01-2021.

3.4.4 Calcul des flux de chaleur à travers les murs

a. Flux de mur 1

Aucune direction fixe n'est spécifiée pour la caravane car sa direction change pendant le voyage des touristes, et pendant la nuit il n'y a pas d'effet de la lumière du soleil. Donc, il n'est pas nécessaire de spécifier une direction de la caravane.

La figure 3.14 est le diagramme schématisé d'un mur constitué de plusieurs matériaux d'épaisseurs et de conductivité thermique différente sous forme de couches (voir tableau 3.2), où sa surface

$$S1 = 3.6 \text{ m}^2.$$

La résistance thermique du mur est calculée par la relation suivante :

$$R1_t = \frac{1}{h_i.S1} + \sum \frac{e_i}{\lambda_{i.s1}} + \frac{1}{h_e.S1} \quad (3.4)$$

$$R1_t = 0.67688051 \text{ k/w}$$

Le flux de chaleur est donné par la relation :

$$\phi_1 = \frac{(T_{in} - T_{amb})}{R1_t} \quad (3.5)$$

Le flux thermique total est calculé à partir de la somme des flux thermique par heure

On calcule le flux thermique total de mur 1 :

$$\phi_{1\text{tot}} = 434.3454938\text{W}$$

On remarque sur la figure 3.15 que la valeur du flux de chaleur est faible à cinq heures du soir, puis augmente progressivement pour atteindre la valeur la plus élevée à huit heures du matin, puis elle diminue. Cela est à cause de l'augmentation et de la diminution du gradient de température entre l'intérieur et l'extérieur de la caravane au cours de la journée. On constate que le flux atteint sa valeur maximale de 33.9794 W à 8h de matin.

Tableau 3.2: Les paramètres physiques des murs

Matériaux	Conductivité thermique (W/m.k)	Epaisseur (m)
Peinture	0,2	0,0001
Fer	72	0,002
Polytherene	0,035	0,08
Verre (fenêtre)	1.15	0.005
Bois	0.15	0.02
Air	0.025	0.01
Plastique	0.17	0.01

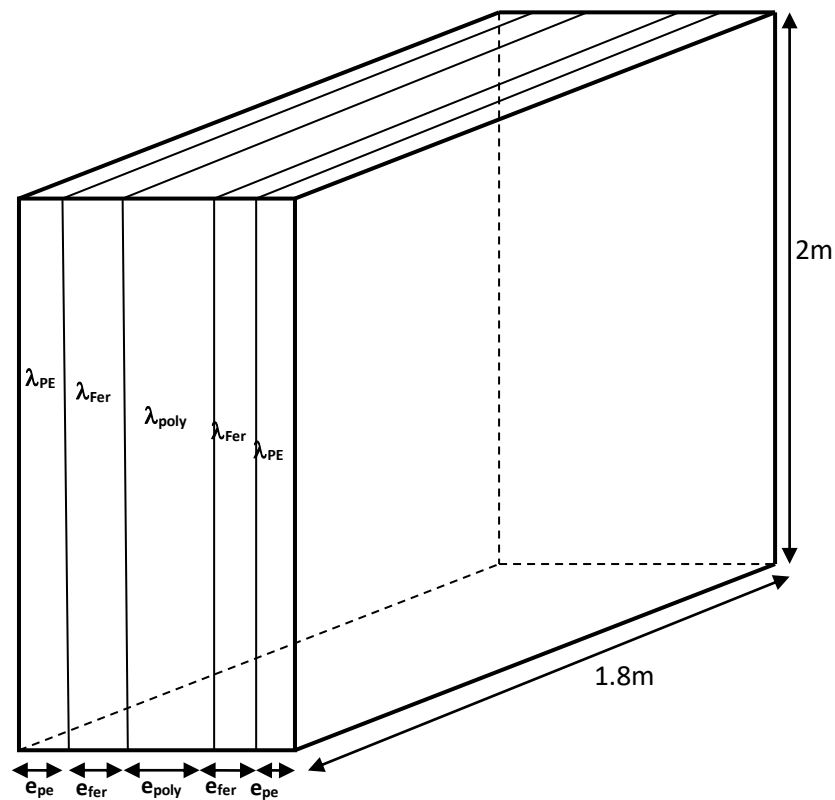


Figure 3.14: Les composants et dimensions du premier mur.

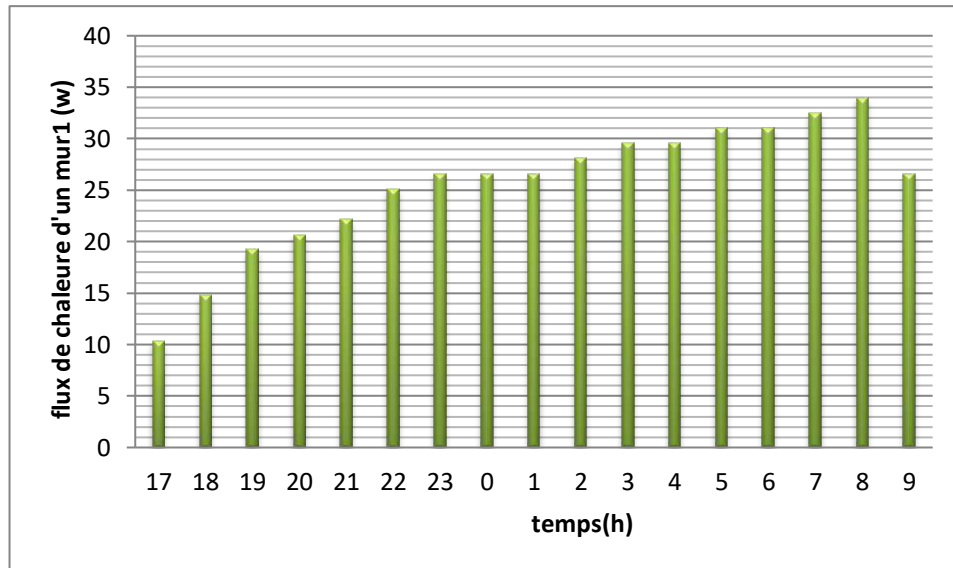


Figure 3.15: La variation du flux de chaleur du mur 1.

b. Flux de mur 2

La figure 3.16 montre le deuxième mur de la caravane faite du même matériau et de la même épaisseur que le premier mur (voir tableau 3.2). Mais avec une surface différente.

La résistance thermique est calculée par la relation suivante :

$$R_{2t} = \frac{1}{h_i \cdot S_1} + \sum \frac{e_i}{\lambda_i \cdot S_1} + \frac{1}{h_e \cdot S_1}$$

$$R_{2t} = 0.2833453 \text{ k/w}$$

Le flux de chaleur est donné par la relation :

$$\phi_2 = \frac{(T_{in} - T_{amb})}{R_{2t}}$$

On calcule le flux thermique total de mur 2 :

$$\phi_{2_{tot}} = 1037.603235 \text{ W}$$

La figure (3.17) présente la variation de flux de chaleur à travers le mur 2. On constate la même allure de flux que celle du mur 1, mais, la valeur maximale de flux est 81.1730 W qui est atteint à 8h de matin.

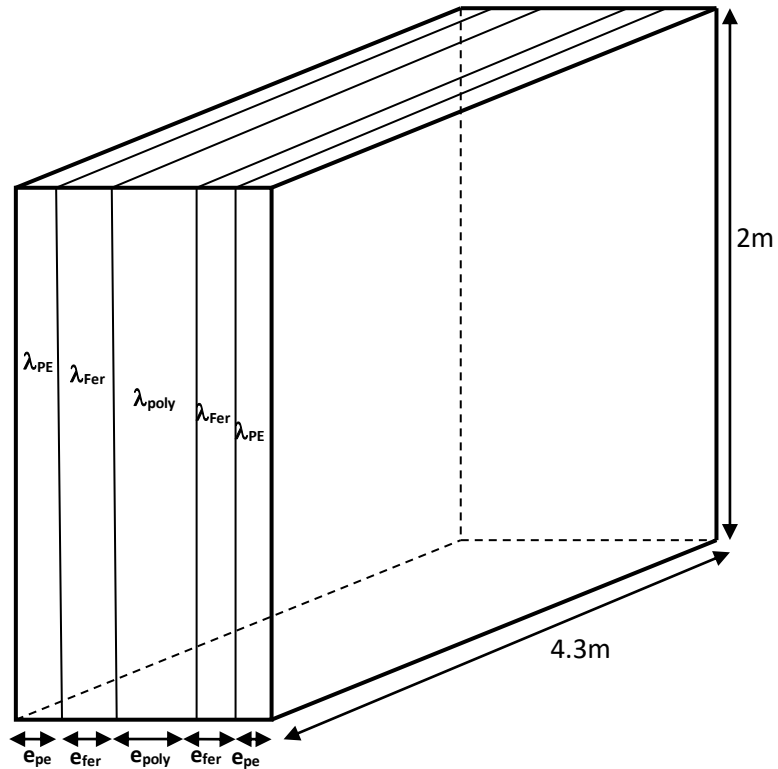


Figure 3.16 : Les composants et dimensions du deuxième mur.

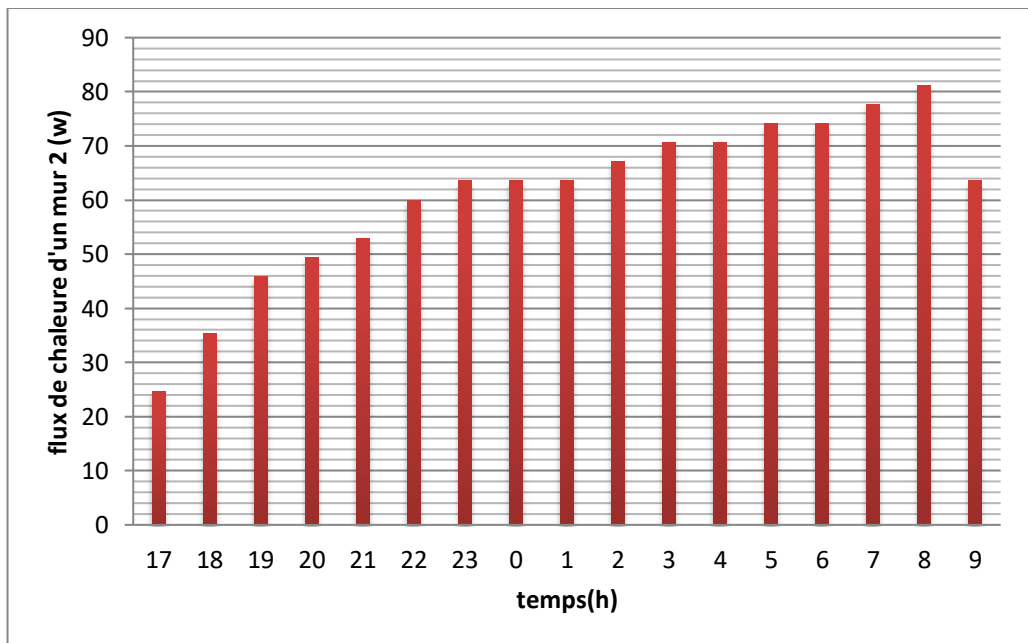


Figure 3.17: La variation du flux de chaleur du mur 2.

c. Flux de Mur 3

La figure 3.18 présente un schéma de la conception du mur 3 qui simplifie le calcul de sa résistance thermique. Pour les parties (A, R', E) la résistance est calculée par la méthode de résistance en parallèle. La figure 3.19 montre le troisième mur de la caravane fabriqué en

multi couches et qui comprend une fenêtre. Est constitué de plusieurs couches d'épaisseur et de conductivité thermique différentes (voir tableau 3.2).

La résistance thermique est calculée par la relation suivante :

$$R_A = \frac{1}{h_i \cdot S_A} + \sum \frac{e_i}{\lambda_i \cdot s_A} + \frac{1}{h_e \cdot S_A}$$

$$R' = \frac{1}{h_i \cdot S_{R'}} + \frac{1}{\frac{1}{R_B} + \frac{1}{R_C} + \frac{1}{R_D}} + \frac{1}{h_e \cdot S_{R'}}$$

$$R_E = \frac{1}{h_i \cdot S_E} + \sum \frac{e_i}{\lambda_i \cdot s_E} + \frac{1}{h_e \cdot S_E}$$

$$R_{3t} = \frac{1}{\frac{1}{R_A} + \frac{1}{R'} + \frac{1}{R_E}}$$

$$R_{3t} = 0.0780035 \text{ k/w}$$

Le flux de chaleur est donné par la relation :

$$\phi_3 = \frac{(T_{in} - T_{amb})}{R_{3t}}$$

On calcule le flux thermique total de mur 3 :

$$\phi_{3_{tot}} = 3769.05832 \text{ W}$$

La figure (3.20) présente la variation de flux de chaleur à travers le mur 3. On constate la même allure de flux que celle du mur 1, mais, la valeur maximale de flux est 294.8583 W qui est atteint à 8h de matin.

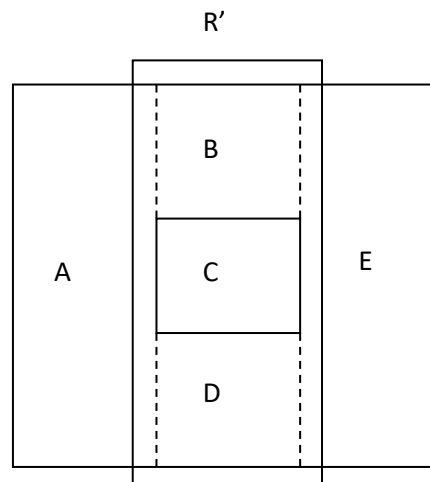


Figure 3.18: Dessin simplifié pour le calcul de la résistance du mur 3.

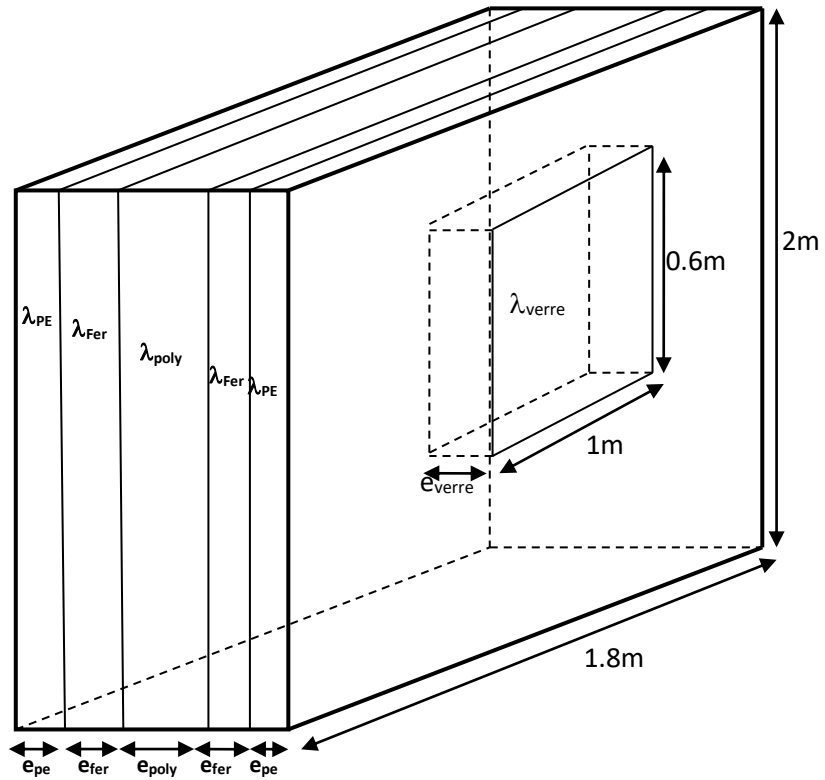


Figure 3.19 : Les composants et dimensions du troisième mur.

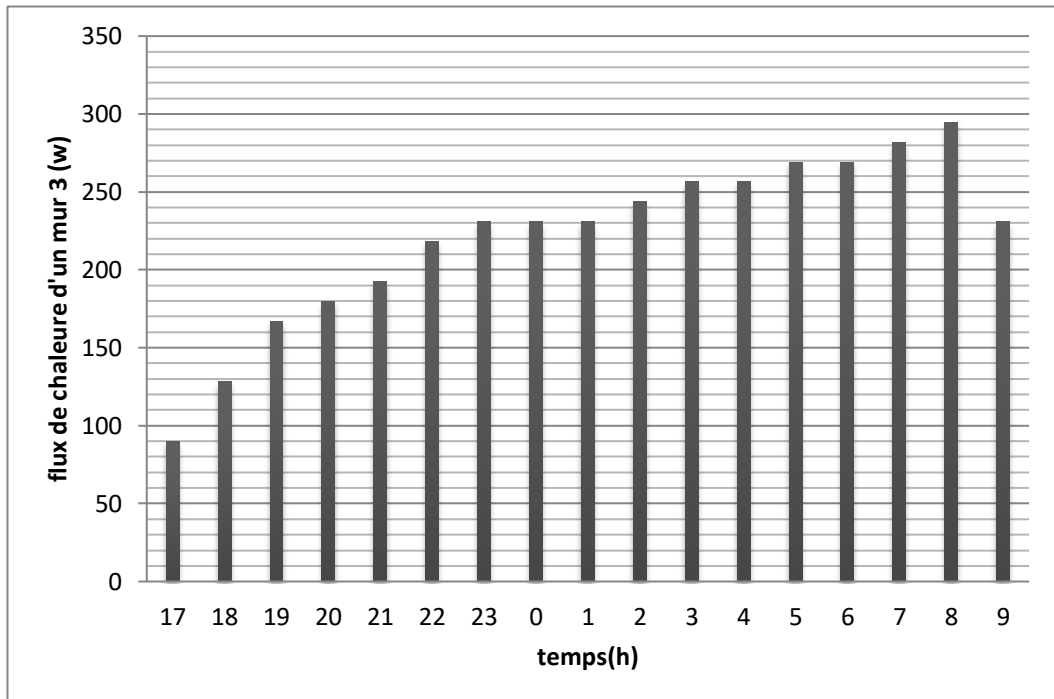


Figure 3.20: La variation du flux de chaleur du mur 3.

d. Flux de Mur 4

La figure 3.22 montre le quatrième mur de la caravane qui est constitué de plusieurs couches d'épaisseur et de conductivité thermique différentes (voir tableau 3.2). Ce mur contient une porte et une fenêtre. La figure 3.21 est constitué de parties (A, R', E, R'', H), sa résistance se calcule de la même façon que le mur 3.

La résistance thermique est calculée par la relation suivante :

$$R_A = \frac{1}{h_i \cdot S_A} + \sum \frac{e_i}{\lambda_i \cdot S_A} + \frac{1}{h_e \cdot S_A}$$

$$R' = \frac{1}{h_i \cdot S_{R'}} + \frac{1}{\frac{1}{R_B} + \frac{1}{R_C} + \frac{1}{R_D}} + \frac{1}{h_e \cdot S_{R'}}$$

$$R_E = \frac{1}{h_i \cdot S_E} + \sum \frac{e_i}{\lambda_i \cdot S_E} + \frac{1}{h_e \cdot S_E}$$

$$R'' = \frac{1}{h_i \cdot S_{R''}} + \frac{1}{\frac{1}{R_F} + \frac{1}{R_G}} + \frac{1}{h_e \cdot S_{R''}}$$

$$R_H = \frac{1}{h_i \cdot S_H} + \sum \frac{e_i}{\lambda_i \cdot S_H} + \frac{1}{h_e \cdot S_H}$$

$$R_{4t} = \frac{1}{\frac{1}{R_A} + \frac{1}{R'} + \frac{1}{R_E} + \frac{1}{R''} + \frac{1}{R_H}}$$

$$R_{4t} = 0.063441 \text{ k/w}$$

Le flux de chaleur est donné par la relation :

$$\phi_4 = \frac{(T_{in} - T_{amb})}{R_{4t}}$$

On calcule le flux thermique total de mur 4 :

$$\phi_{4_{tot}} = 4634.22117 \text{ W}$$

La figure (3.23) présente la variation de flux de chaleur à travers le mur 4. On constate la même allure de flux que celle du mur 1, mais, la valeur maximale de flux est 362.5411 W qui est atteint à 8h de matin.

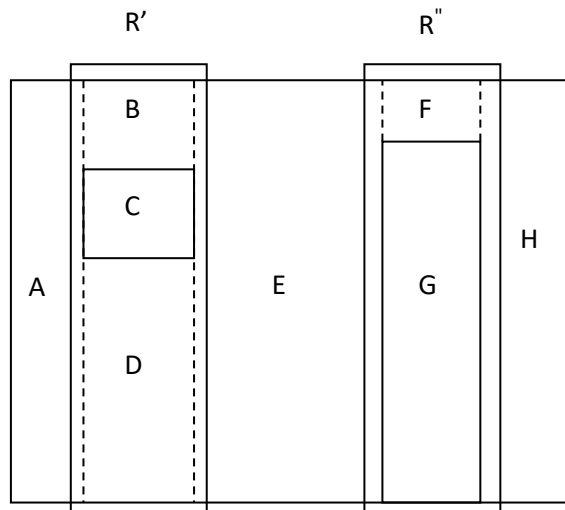


Figure 3.21: Dessin simplifié pour le calcul de la résistance du mur 4.

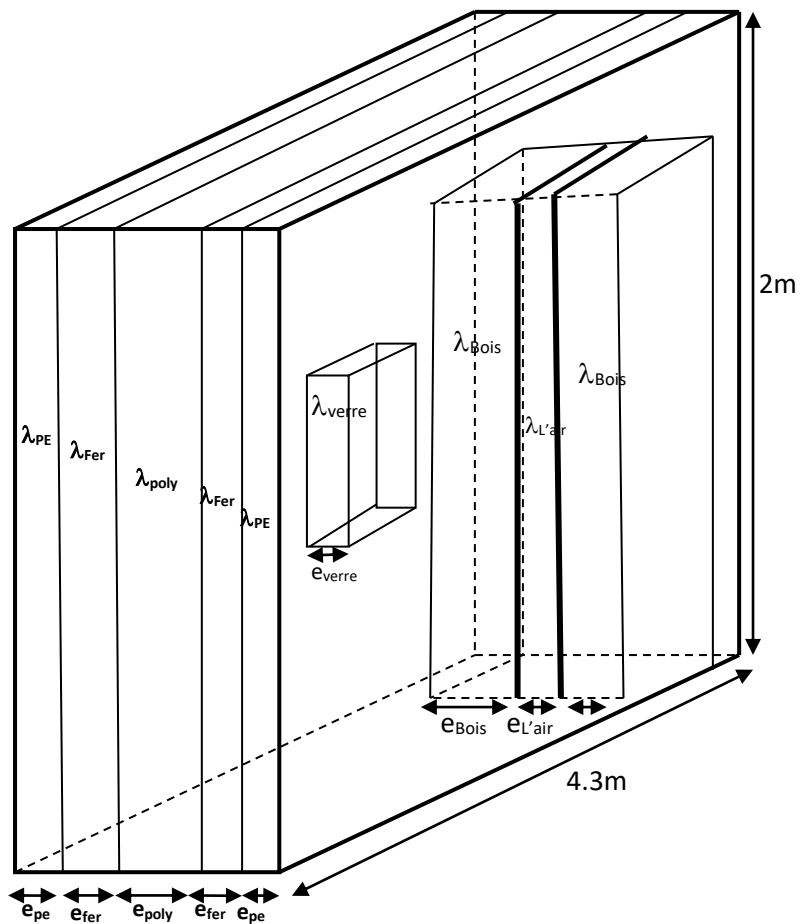


Figure 3.22: Les composants et dimensions du quatrième mur.

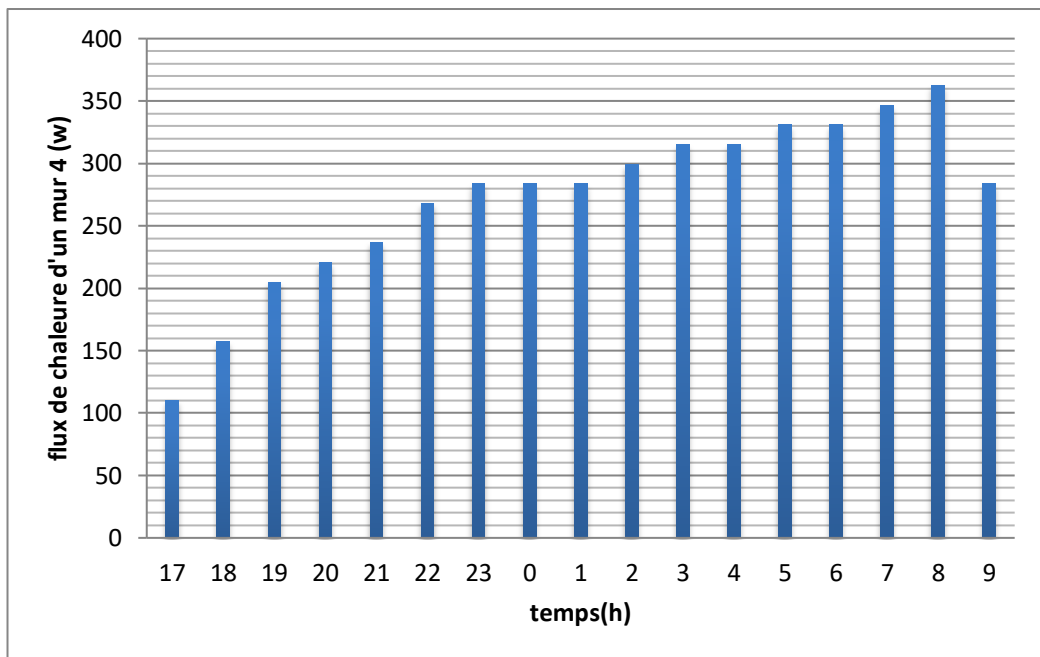


Figure 3.23: La variation du flux de chaleur du mur 4.

e. Flux de Mur 5

La figure 3.24 présente la conception du toit qui est constitué de plusieurs couches d'épaisseurs et de conductivité thermique différentes. Ces couches sont : peinture, fer, air (voir tableau 3.2).

La résistance thermique est calculée par la relation suivante :

$$R_{5t} = \frac{1}{h_i \cdot S_5} + \sum \frac{e_i}{\lambda_i \cdot S_5} + \frac{1}{h_e \cdot S_5}$$

$$R_{5t} = 0.43295291 \text{ k/w}$$

Le flux de chaleur est donné par la relation :

$$\phi_5 = \frac{(T_{in} - T_{amb})}{R_{5t}}$$

On calcule le flux thermique total de mur 5 :

$$\phi_{5_{tot}} = 679.057699 \text{ W}$$

La figure (3.25) présente la variation de flux de chaleur à travers le mur 5. On constate la même allure de flux que celle du mur 1, mais, la valeur maximale de flux est 53.1235 W qui est atteint à 8h de matin.

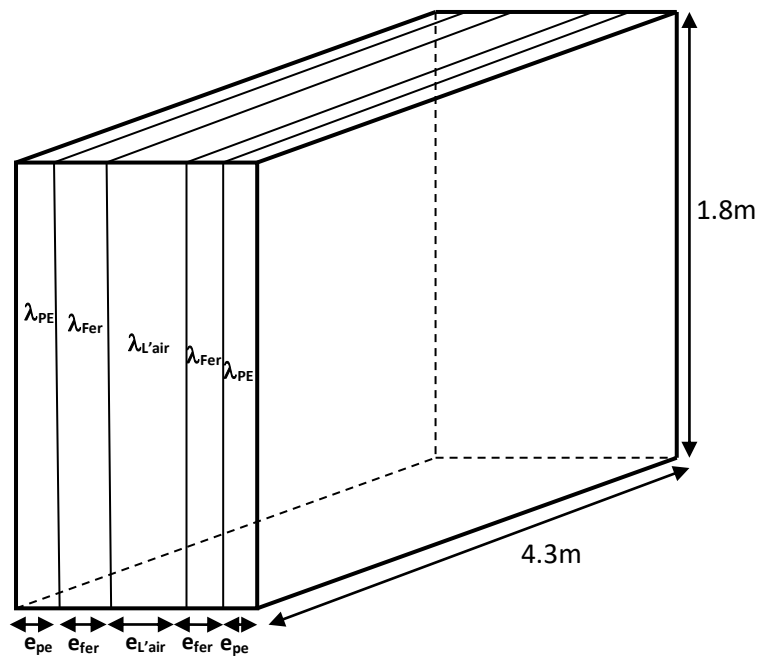


Figure 3.24: Les composants et dimensions du cinquième mur.

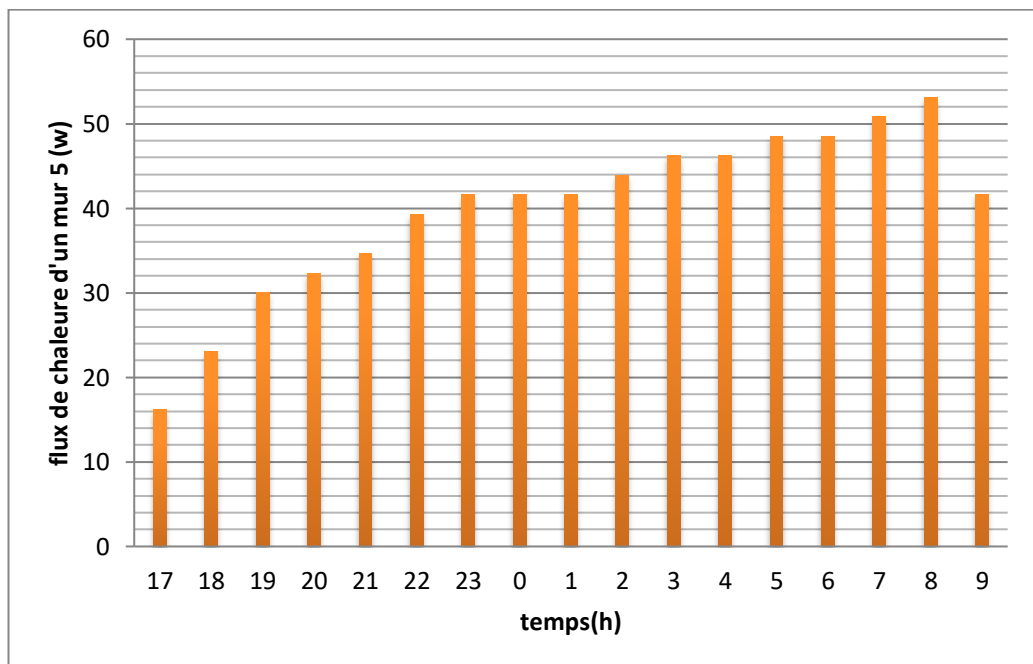


Figure 3.25: La variation du flux de chaleur du mur 5.

f. Flux de Mur 6

La figure 3.26 présente la conception du plancher qui est constitué de plusieurs couches d'épaisseurs et de conductivité thermique différentes. Ces couches sont : fer, air, bois, plastique (voir tableau 3.2).

La résistance thermique est calculée par la relation suivante :

$$R_{6t} = \frac{1}{h_i \cdot S_6} + \sum \frac{e_i}{\lambda_i \cdot S_6} + \frac{1}{h_e \cdot S_6}$$

$$R_{6t} = 0.483518687 \text{ k/w}$$

Le flux de chaleur est donné par la relation :

$$\phi_6 = \frac{(T_{in} - T_{amb})}{R_{6t}}$$

On calcule le flux thermique total de mur 6 :

$$\phi_{6_{tot}} = 608.042667 \text{ W}$$

La figure (3.27) présente la variation de flux de chaleur à travers le mur 6. On constate la même allure de flux que celle du mur 1, mais, la valeur maximale de flux est 47.5679 W qui est atteint à 8h de matin.

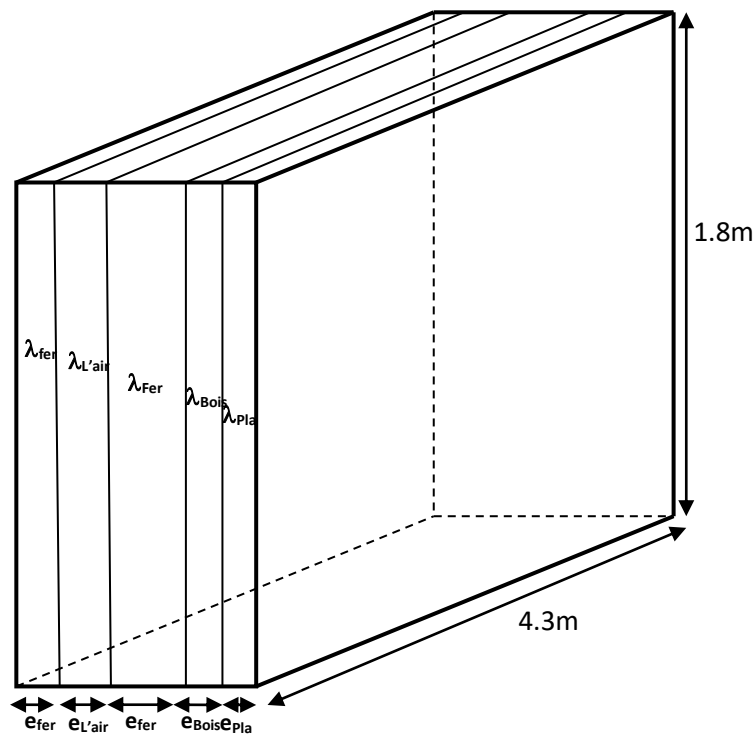


Figure 3.26: Les composants et dimensions du sixième mur.

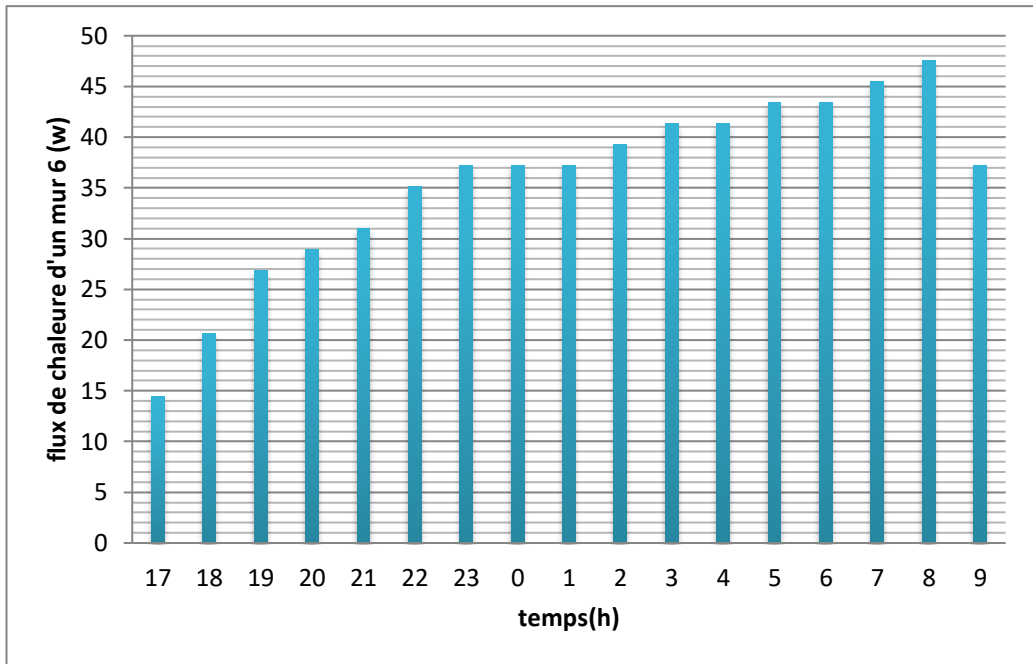


Figure 3.27: La variation du flux de chaleur du mur 6.

F. Ensembles de l'enveloppe de caravane

La figure 3.28 montre le flux de chaleur total transféré à travers l'enveloppe et le plancher de la caravane est exprimé comme la somme de flux de chaleur à travers l'ensemble des parois. La même remarque est constatée sur l'allure du flux temporel de telle façon que le flux maximal de 873.2433 W est situé à 8h de matin. Le flux de chaleur total est calculé comme suit :

$$\phi_{\text{caravane}} = \phi_{1_{\text{tot}}} + \phi_{2_{\text{tot}}} + \phi_{3_{\text{tot}}} + \phi_{4_{\text{tot}}} + \phi_{5_{\text{tot}}} + \phi_{6_{\text{tot}}} \quad (3.6)$$

$$\phi_{\text{caravane}} = 11162.3286 \text{ W}$$

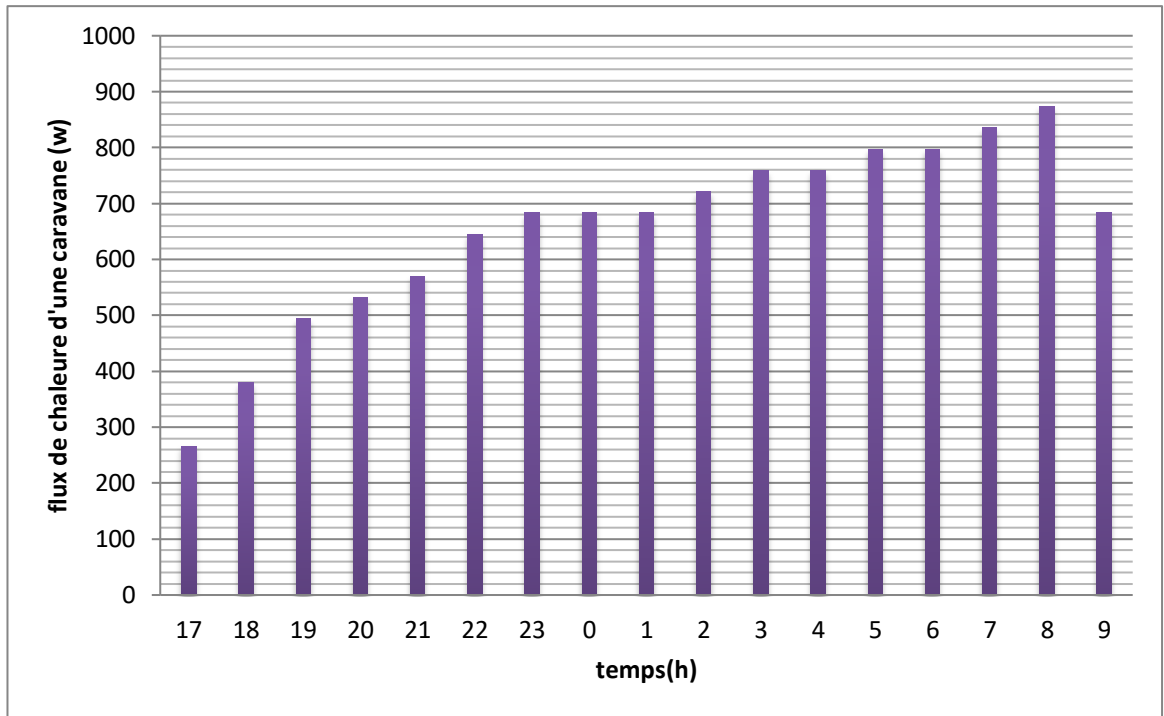


Figure 3.28: La variation de flux de chaleur total de la caravane.

3.4.5 Dimensionnement de la pile PEMFC

a) Chaleur dégagée par la résistance électrique

Pour le chauffage de la caravane on utilise la chaleur dégagée par une résistance électrique alimentée par la pile à combustible. Cette chaleur est générée par l'effet de Joule qui est exprimé par la relation suivante:

$$Q_1 = R \cdot (I \cdot A)^2 \quad (3.7)$$

I c'est la densité du courant de la pile. Généralement on choisit la densité du courant dont l'intervalle de fonctionnement optimale de la pile [0.8 - 1.2] A/cm², donc on choisit la valeur moyenne $I = 1$ A/cm²

On suppose : $i = 1$ A ;

Le courant électrique i est calculé par la relation :

$$i = I \cdot A \quad (3.8)$$

Où : A est la surface active de la pile [cm²]

La résistance électrique R [Ω] du matériau utilisé pour le chauffage. On trouve généralement de cette technologie, on trouve : Nichrome, Kanthal, Cupronickel, Platine. On choisit le nichrome parce que ce matériau est le mieux adapté pour faire des éléments chauffants et peut être

utilisé en fonctionnement continu à une température allant jusqu'à 1200°C. le Nichrome se compose de 80% Nickel et 20% Chrome [37].

La résistance électrique de Nichrome s'exprime par la relation :

$$R = R_{es} * L / A \quad (3.9)$$

Où : R_{es} est la résistivité de matériaux (Nichrome) est égale à $40 \mu\Omega \cdot \text{cm} / \text{A}$

L est la longueur de résistance, on choisi la valeur de 20 cm

A est la section de file de résistance, on choisi de diamètre $d = 1 \text{ mm}$, $A = \pi * d^2 / 4$

Donc, la résistance R est :

$$R = 40 \times 10^{-8} \times 20 \times 10^{-2} / (\pi \times 0.0001^2 / 4)$$

$$R = 0.1 \Omega$$

b) flux de chaleur dégagé de la pile

Il s'agit du flux de chaleur dégagé par la réaction chimique à l'intérieur de la pile. On utilise ici le résultat présenté par Kjelstrup et Rosjorde [38] où l'oxydation de l'hydrogène n'entraîne pas de dégagement de chaleur ($Q_{\text{anode}} = 0$) et la réduction de l'oxygène à la cathode est seule responsable de la création d'entropie liée à la réaction globale.

$$Q'_2 = 48.7 * \frac{I}{2F} * A \quad (3.10)$$

Où : A est surface active de la pile [cm^2]

F : constante de faraday ($F = 96485 \text{ c/mol}$)

I : la densité du courant de la pile ($I = 1 \text{ A/cm}^2$)

En tant compte de rendement de système de la récupération de chaleur qui est estime à 0.8. la chaleur réel dégagé $Q_2 = Q'_2 * 0.8$

c) Calcul de la surface active de la pile

Pour calculer la surface active de la pile on procède au bilan énergétique du système. Il s'agit d'effectuer la balance entre l'énergie provoqué par le flux thermique froid pénétrant à travers les murs et l'énergie thermique générée par le fonctionnement de la pile. Deux variantes de l'exploitation de la pile sont possibles :

C1) Première variante

Dans cette variante, on considère que la caravane est chauffée uniquement par l'effet de joule produite par la résistance alimentée par la pile. Pour le calcul de la surface active (A), on fait l'égalité de l'énergie thermique produite par la pile (E) et le flux thermique Φ [kWh]. Donc, on procède comme suit :

$$\Phi = E = R \cdot (I \cdot A)^2 \cdot t \quad (3.11)$$

Où : t est le temps chauffage effectué par la pile

$$A = \frac{1}{I^2} \sqrt{\frac{\Phi}{R \cdot t}}$$

On prend: $I = 1 \text{ A/cm}^2$;

$R = 0.1 \ \Omega$ (déjà calculée précédemment)

Donc, on trouve la surface active A :

$$A = 83.5252 \text{ cm}^2$$

C2) deuxième variante

Dans cette deuxième variante, on considère que la caravane est chauffée en même temps par l'effet de joule produite par la résistance alimentée par la pile et la chaleur dégagé par la réaction d'oxydation effectuée à la cathode. Cette chaleur est récupérée par un système de ventilation avec un rendement η_v estimé à 0.8. Pour le calcul de la surface active (A), on fait l'égalité de l'énergie thermique produite par la pile (E) et le flux thermique Φ [kWh]. Donc, on procède comme suit :

$$\Phi = R \cdot (I \cdot A)^2 \cdot t + 48.7 \cdot \frac{I}{2F} \cdot A \cdot t \cdot 0.8 \quad (3.12)$$

$$(R \cdot I^2 \cdot t) A^2 + (48.7 \cdot \frac{I}{2F} \cdot t \cdot 0.8) A - \Phi = 0 \quad (3.13)$$

C'est un polynôme du deuxième degré de la forme ($ax^2+bx+c=0$)

$$\Delta = b^2 - 4a.c ; \Delta = 71438.91201 > 0$$

$$A' = -83.4375 \text{ cm}^2 < 0 \text{ (rejeté)} \text{ et } A'' = 83.4375 \text{ cm}^2$$

Donc, on prend $A = 83.4375 \text{ cm}^2$

Cette valeur de surface (83.43 cm^2) est considéré comme un valeur optimal pour assurer le chauffage de la caravane tout en récupérant la chaleur dégagé par la pile

d) Calcul de la surface active supplémentaire A_s

Les équipements électriques principaux dans la caravane (lampe, réfrigérateur et télévision) fonctionnent avec le courant continu sous une tension de $U = 24$ volts. Ainsi, les petits équipements de la caravane (téléphone portable et Ordinateur portable) utilisent des transformateurs pour leurs alimentations. L'énergie totale de la consommation de ces équipements est évaluée à 1420 Wh, mais, la valeur temporelle de la puissance maximale est

160 W. Afin d'assurer plus de sécurité au fonctionnement de système, on prend cette valeur de puissance maximale comme base de calcul de la surface active supplémentaire.

$$P_{\max} = 160 \text{ W}$$

$$P = i * U \quad (3.14)$$

$$U = 24 \text{ V et } i = I.A_s$$

$$A_s = P / (I. U) \quad (3.15)$$

$$A_s = 6.6666 \text{ cm}^2$$

3.4.6 Calcul de besoin en hydrogène

Pour calculer les besoins en hydrogène, on prend la surface totale nécessaire qui est la somme des surfaces actives (A et A_s). Le calcul de débit molaire d'hydrogène on utilise l'équation suivant :

$$\text{On à } M_{H_2} = \frac{A_t I}{2F} \quad (3.16)$$

$$A_t = A + A_s = 90.1035 \text{ cm}^2$$

$$I = 1 \text{ A/cm}^2 ; A_t = 90.1035 \text{ cm}^2 ;$$

$$i = I * A_t = 90.1035 \text{ A}$$

$$F = 96485 \text{ C/mol}$$

Donc, on obtient le débit molaire d'hydrogène :

$$M_{H_2} = 4,669 \cdot 10^{-4} \text{ mol/s}$$

Pour obtenir le volume de l'hydrogène dans les conditions standards, on utilise l'expression suivante :

$$V_{H_2} = M_{H_2} * V_M * t \quad (3.17)$$

Où V_M est le volume molaire de gaz dans les conditions standards $V_M = 22.41/\text{mol}$

t : est le temps de chauffage $t = 16\text{h} = 57600\text{s}$

Donc, on obtient le volume d'hydrogène :

$$V_{H_2} = 602.413 \text{ litre} = 0.602413 \text{ m}^3$$

- Dans le système d'alimentation en carburant (H_2), l'excès hydrogène s'échappe de la sortie de l'anode et ensuite il fait le retour vers l'entrée de l'anode. Mais, il existe une soupape de renouvellement qui assure un taux de renouvellement estimé à un taux de 1%.

$$V_{rH2} = V_{H2} * \text{taux} \quad (3.18)$$

$$V_{rH2} = 602.413 * 1.01 = 608.4371 \text{ litres}$$

ce volume V_{rH2} est sous les conditions standards ($T = 25 \text{ c}$, $P = 1 \text{ atm}$)

Mais, l'hydrogène est stocké dans un réservoir métallique sous une pression de l'ordre de 100 bars. Cette pression a été choisie pour réduire le volume du réservoir d'hydrogène.

En considérant que l'hydrogène est un gaz parfait qui obéit la relation suivante :

$$PV = nRT \quad (3.19)$$

En prenant les deux états d'hydrogène : état 1 concernant les conditions standards ($P_1 = 1 \text{ atm}$, $V_1 = V_{rH2} = 608.4371 \text{ litres}$) et l'état 2 pour la condition de stockage d'hydrogène ($P_2 = 100 \text{ bars}$).

Donc, on a la relation :

$$P_1 V_1 = P_2 V_2 \quad (3.20)$$

$$V_2 = P_1 V_1 / P_2$$

$$V_2 = 1 * 608.437 / 100$$

$$V_2 = 6.08 \text{ litres}$$

La consommation de réservoir d'hydrogène à l'état comprimé est de l'ordre de 6 litres. Donc, on choisit un réservoir de 30 litres pour satisfaire le besoin de 5 jours

-Pour calculer le nombre de mole d'hydrogène (n_{H2}), on utilise l'équation :

$$n_{H2} = M_{H2} * t \quad (3.21)$$

$$n_{H2} = 4.669 \cdot 10^{-4} * 57600 = 26.89344 \text{ mole}$$

-Pour le calcul de la masse d'hydrogène, on utilise la relation :

$$m = n_{H2} * M_{H2} = 26.89344 * 2 = 53.78688 \text{ g}$$

pour satisfaire 5 jours, le besoin de la masse d'hydrogène est 268.9344 g

3.5 Conclusion

L'hydrogène est un carburant propre et très commode à l'abri roulant tel que la caravane des touristes. Sa conversion en électricité par la pile combustible montre un avantage appréciable en matière de faible encombrement de système avec une forte densité d'énergie électrique.

L'énergie produite par la pile à combustible couvre largement le besoin de chauffage et l'alimentation de la caravane pendant la nuit d'une journée hivernale très froide tel que la consommation en hydrogène ne dépasse 6 litres provenant d'un réservoir d'hydrogène comprimé à 100 bars.

Conclusion Générale

Conclusion générale

Même si la technologie des piles à combustible est apparue au dix-huitième siècle, mais ses intérêts technico-économiques ce sont révélés qu'au début des années soixante-dix. Sachant que pouvoir connaître les caractéristiques de fonctionnement dynamique ainsi que l'influence des conditions opératoires, constituent une base de données, qui est un champ de recherche pour un scientifique.

Dans ce travail, nous avons exposé les caractéristiques d'une pile à combustible ainsi que ces applications comme étant une source d'énergie fiable pouvant, dans un futur proche, trouver sa place parmi les sources d'énergie non polluantes. Les différents types de pile à combustible ainsi que leur principe de fonctionnement sont passés en revue. Pour le besoin de la simulation, et pour comprendre le fonctionnement des piles à combustible, nous avons adopté le cas d'une pile à combustible de type PEMFC pour son fonctionnement simple.

Notre étude a montré que le fonctionnement de la pile à combustible PEMFC est influencé par les phénomènes physico-chimiques qui ont lieu à l'intérieur de celle-ci. En effet, la pile PEMFC est caractérisée par une membrane qui nécessite une humidification optimale. Une simulation numérique de la pile PEMFC qui prend en considération l'effet de l'humidité et de la pression sur les caractéristiques de la pile, écrit en Matlab, a été développée. Cette simulation a permis d'obtenir un rendement global compris entre 30% et 45%.

En plus que les piles produisent de l'énergie et de la chaleur, ils sont utilisés pour alimenter et chauffer la caravane, et a également aidé les touristes à passer leurs nuits hivernales confortablement à des zones isolées.

Bibliographies

Bibliographies

- [1] A. Halim, "'Etude et modélisation d'une pile à combustible'", thèse de Magister en *Electrotechnique. Université de A. MIRA-BEJAIA*, p. 7, 2016.
- [2] Y. BENRAYA, "Etude et modélisation d'une pile à combustible" mémoire de master, Ecole supérieure sciences Appliquées TLEMCEM, 2020.
- [3] A. Lachichi, "Modélisation et stabilité d'un régulateur hybride de courant-Application aux convertisseurs pour pile à combustible", thèse de doctorat .Université de Franche-Comté, 2005.
- [4] Z. ZHANG, " Modélisation mécanique des interfaces multi-contacts dans une pile à combustible", thèse de doctorat, Université d'Évry-Val d'Essonne, 2010.
- [5] B. Dadda, "Etude des transferts de chaleur et de masse dans une membrane de pile à combustible pour des applications basse et moyenne température", thèse de doctorat , *Université Houari Boumediene*, 2015.
- [6] G. Lefèvre, "Conception de convertisseurs statiques pour l'utilisation de la pile à combustible," thèse de doctorat , Université Joseph-Fourier-Grenoble I, 2004.
- [7] D. A. Nguyen, "Modélisation dynamique du "cœur" de pile à combustible de type PEM," thèse de doctorat , Institut National Polytechnique de Lorraine, 2010.
- [8] J. Lachaize, "Etude des stratégies et des structures de commande pour le pilotage des systèmes énergétiques à Pile à Combustible (PAC) destinés à la traction," thèse de doctorat, L'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE TOULOUSE , 2004.
- [9] C. Lamy and J.-M. Léger, "Les piles à combustible: application au véhicule électrique," *Le Journal de Physique IV*, vol. 4, pp. C1-253-C1-281, 1994.
- [10] L. ARAB and Z. CHEBBI, "ETUDE ET SIMULATION D'UNE PILE A COMBUSTIBLE DE TYPE PEM," mémoire de master, Université Akli Mouhand Oulhadj-Bouira, 2016.
- [11] N. Romani, "Modélisation et Commande du Système d'Alimentation en Air pour le Module de Puissance d'un Véhicule à Pile à Combustible avec Reformage Embarqué," thèse de doctorat, Université Paris Sud-Paris XI, 2007.
- [12] I. Sadli, "Modélisation par impédance d'une pile à combustible PEM pour utilisation en électronique de puissance," thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine, 2006.
- [13] S. Jemeï, "Modélisation d'une pile à combustible de type PEM par réseaux de neurones," thèse de doctorat, Université de Franche-Comté; Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, 2004.
- [14] R. Saadi, "Convertisseurs Basse Tension (42V, 540V); Application Source Hybride Utilisant Une Pile à Combustible," thèse de doctorat, Université Mohamed Khider-Biskra, 2015.
- [15] T. E. Springer, T. Zawodzinski, and S. Gottesfeld, "Polymer electrolyte fuel cell model," *Journal of the electrochemical society*, vol. 138, p. 2334, 1991.
- [16] D. M. Bernardi and M. W. Verbrugge, "Mathematical model of a gas diffusion electrode bonded to a polymer electrolyte," *AIChE journal*, vol. 37, pp. 1151-1163, 1991.
- [17] N. Siegel, M. Ellis, D. Nelson, and M. Von Spakovsky, "A two-dimensional computational model of a PEMFC with liquid water transport," *Journal of Power Sources*, vol. 128, pp. 173-184, 2004.
- [18] Y. Wang and C.-Y. Wang, "A nonisothermal, two-phase model for polymer electrolyte fuel cells," *Journal of the electrochemical society*, vol. 153, p. A1193, 2006.
- [19] T. V. Nguyen and R. E. White, "A water and heat management model for proton-exchange-membrane fuel cells," *Journal of the electrochemical society*, vol. 140, p. 2178, 1993.

Bibliographies

- [20] J. Larminie, A. Dicks, and M. S. McDonald, *Fuel cell systems explained*, the book (Vol. 2, pp. 207-225). Wiley Chichester, UK, 2003.
- [21] L. Gerbaux, "Modélisation d'une pile à combustible de type hydrogène/air et validation expérimentale," thèse de doctorat, Grenoble INPG, 1996.
- [22] J. Golbert and D. R. Lewin, "Model-based control of fuel cells::(1) regulatory control," *Journal of Power Sources*, vol. 135, pp. 135-151, 2004.
- [23] S. M. C. Ang, D. J. Brett, and E. S. Fraga, "A multi-objective optimisation model for a general polymer electrolyte membrane fuel cell system," *Journal of Power Sources*, vol. 195, pp. 2754-2763, 2010.
- [24] M. A. S. Al-Baghdadi and H. A. S. Al-Janabi, "Parametric and optimization study of a PEM fuel cell performance using three-dimensional computational fluid dynamics model," *Renewable energy, An international journal*, vol. 32, pp. 1077-1101, 2007.
- [25] J. Golbert and D. R. Lewin, "Model-based control of fuel cells (2): Optimal efficiency," *Journal of Power Sources*, vol. 173, pp. 298-309, 2007.
- [26] L. Wang, A. Husar, T. Zhou, and H. Liu, "A parametric study of PEM fuel cell performances," *International journal of hydrogen energy*, vol. 28, pp. 1263-1272, 2003.
- [27] J. T. Pukrushpan, "Modeling and control of fuel cell systems and fuel processors," article, University of Michigan Ann Arbor, Michigan, USA, 2003.
- [28] G. Squadrito, G. Maggio, E. Passalacqua, F. Lufrano, and A. Patti, "An empirical equation for polymer electrolyte fuel cell (PEFC) behaviour," *Journal of Applied Electrochemistry*, vol. 29, pp. 1449-1455, 1999.
- [29] W. Na and B. Gou, "The efficient and economic design of PEM fuel cell systems by multi-objective optimization," *Journal of Power Sources*, vol. 166, pp. 411-418, 2007.
- [30] Y. M. B. Mehmech, "Guide du Laboratoire d'Evaluation du Potentiel Energétique," Document interne Centre de développement des énergies renouvelables,, Algérie, 2004.
- [31] P. Pei, W. Yang, and P. Li, "Numerical prediction on an automotive fuel cell driving system," *International journal of hydrogen energy*, vol. 31, pp. 361-369, 2006.
- [32] A. LEMTENNECHE and T. BOUGUENNOUR, "Etude expérimentale des transferts thermiques dans un local muni d'un isolant à base végétale." mémoire de master, UNIVERSITE KASDI MERBAH D'OUARGLA, 2017
- [33] A. KEDIDI, O. BABKAR, and B. DOKKAR, "Study of tramway thermal comfort in Ouargla city of tramway thermal comfort in Ouargla city." mémoire de master, UNIVERSITE KASDI MERBAH D'OUARGLA, 2019
- [34] Z. M. Hachem, "Effet de la forme de toiture sur le confort thermique." mémoire de master, UNIVERSITE KASDI MERBAH D'OUARGLA, 2014
- [35] A. ZOOUZOU and K. MOKHTARI, "Solutions hybrides pour maintenir le Confort Thermique et Visuel." mémoire de master, UNIVERSITE KASDI MERBAH D'OUARGLA, 2015
- [36] (www.numeric.dz). consulté le 17-06-2021
- [37] (<https://riverglennapts.com/fr>). consulté le 10-05-2021.
- [38] J. Ramousse, "Transferts couplés masse-charge-chaleur dans une cellule de pile à combustible à membrane polymère," thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine, 2005.

Résumé:

Ce travail traite un type des énergies renouvelables, à savoir l'énergie de l'hydrogène, et plus précisément sa conversion par la pile à combustible, ainsi, l'analyse de son fonctionnement, ses caractéristiques et ses applications. La pile PEMFC convertit l'énergie chimique en énergie électrique selon les réactions d'oxydoréductions, avec un dégagement d'eau et de chaleur. La simulation numérique sur Matlab a permis de comprendre les caractéristiques de la pile et l'influence des paramètres sur leur fonctionnement. Notamment, l'étude aborde l'évaluation de l'énergie produite et la chaleur dégagée de la pile pour le chauffage d'air d'une caravane. Les résultats montrent que L'énergie produite par la pile couvre largement le besoin de chauffage et l'alimentation de la caravane pendant la nuit d'une journée hivernale très froide talque la consommation en hydrogène ne dépasse pas 6 litres provenant d'un réservoir d'hydrogène comprimé à 100 bars.

Mots clé : 'Hydrogène, Pile à combustible PEMFC, modèle diphasique, caravane, chauffage,

Abstract:

This work deals with a type of renewable energies, namely the energy of hydrogen, and more precisely its conversion by the fuel cell, as well, the analysis of their operations, characteristics and applications. The PEMFC fuel cell converts chemical energy into electrical energy according to redox reaction, with the release of water and heat. Numerical simulation on Matlab made it possible to understand the characteristics of the fuel cell and the influence of the parameters on their operation. In particular, the study addresses the evaluation of the energy produced and the heat released from the fuel cell for heating a caravan. The results show that the energy produced by the fuel cell largely covers the need for heating and powering the caravan during the night of a very cold winter day when the hydrogen consumption does not exceed 6 liters from a tank of hydrogen compressed to 100 bars.

Keywords: 'Hydrogen, PEMFC fuel cell, two-phase model, caravan, heating,

الملخص :

يتناول هذا العمل نوعًا من الطاقات المتجددة، ألا وهو طاقة الهيدروجين، وبصورة أدق تحويلها بواسطة خلية الوقود، وكذلك تحليل تشغيلها وخصائصها وتطبيقاتها. تقوم خلية PEMFC بتحويل الطاقة الكيميائية إلى طاقة كهربائية وفقًا لتفاعلات الأكسدة والاختزال، مع إطلاق الماء والحرارة. جعلت المحاكاة العددية على Matlab من الممكن فهم خصائص الخلية وتأثير المعلمات على تشغيلها. على وجه الخصوص، تتناول الدراسة تقييم الطاقة المنتجة والحرارة المنبعثة من الخلية لتسخين الهواء في قافلة. وأظهرت النتائج أن الطاقة التي تنتجها الخلية تغطي إلى حد كبير الحاجة إلى التدفئة وتشغيل القافلة أثناء الليل في يوم شتوي شديد البرودة حيث لا يتجاوز استهلاك الهيدروجين 6 لترات من خزان الوقود، حيث يتم ضغط الهيدروجين إلى 100 بار.

الكلمات المفتاحية : الهيدروجين ، خلية وقود PEMFC ، نموذج مرحلتين ، كرفان ، تدفئة