REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA

FACULTE DES SCIENCES APPLIQUEES

DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE

THÈSE

Présentée pour l'obtention du diplôme de Doctorat 3ème cycle

Filière : GENIE MECANIQUE

Spécialité : Thermo-énergétique

Par

CHETOUANE Mohammed Amine

THÈME

CONTRIBUTION À LA GESTION DE L'ÉNERGIE D'UN SYSTÈME MULTI SOURCES DANS LES VÉHICULES ÉLECTRIQUES

Soutenue publiquement le 13 / 07 / 2022 devant le jury :

SETTOU Noureddine	Pr	Université de Ouargla	Président
NEGROU Belkhir	Pr	Université de Ouargla	Rapporteur
BECHERIF Mohamed	MCA	Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, France	Co-rapporter
BELLOUFI Abderrahim	Pr	Université de Ouargla	Examinateur
MOHCENE Hocine	MCA	Université de Ouargla	Examinateur
KHATTARA Abdelouahab	MCA	Université de Ghardaïa	Examinateur

Dédicaces

إلى من أدعوا لها بالرحمه أمي الحبيبة شتوان نوارة

إلى من ساندني و دعمني طيلة حياتي أبي العزيز رابح

إلى إخوتي و أخواتي مريم, عماد, عزالدين, كريمة, لبنى, و إبراهيم

إلى أصدقائي الذين دعموني دائما

إلى ذلك العالم المجهول الذي إستخدم الماء كوقود و مات مقتولا

شكرا لكم جميعا

Remerciement

Avant tout, je remercie **ALLAH**, le tout puissant, de m'avoir donné le courage et la volonté pour accomplir ce travail de recherche.

Mes vifs remerciements vont d'abord à mon directeur de thèse, le professeur **NEGROU Belkhir**, pour son suivi, son soutien et ses conseils judicieux tout au long de cette thèse.

Je remercie infiniment monsieur **SETTOU Noureddine**, professeur à l'université Kasdi Merbah Ouargla, d'avoir fait l'honneur de présider mon jury de thèse.

Mes meilleurs remerciements vont au professeur **BELLOUFI Abderrahim**, de l'université Kasdi Merbah Ouargla, d'avoir accepté de rapporter ce travail de recherche.

J'exprime également ma profonde reconnaissance à monsieur le maitre de conférences **MOHCENE Hocine**, de l'université Kasdi Merbah Ouargla, qui m'a accordé son précieux temps et m'a fait l'honneur de juger mes travaux de thèse.

Mes remerciements vont également au maître de conférences **KHATTARA Abdelouahab**, de l'université de Ghardaïa, d'avoir acceptée de faire partie de mon jury de thèse.

Mes remerciements vont également au maître de conférences **BECHERIF Mohamed**, de Université de Technologie de Belfort-Montbéliard (France), pour son suivi, son soutien et ses conseils judicieux tout au long de cette thèse.

Mes sincères reconnaissances à tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin à réaliser ce travail.

Résumé

Ce travail fait sur 3 axes principaux ; concevoir et évaluer les performances des véhicules électriques à pile à combustible sur la base de cycles de conduite réels. Les résultats montrent que le cours de conduite développé dans la ville de Ouargla est plus complexe que le cours de conduite standard, ce qui permet d'évaluer plus efficacement ces véhicules hybrides. Proposer une stratégie pour le contrôle de la température de la pile à combustible. Les résultats ont montré qu'à une température ambiante plus basse, la pile à combustible pouvait être chauffée en 6 minutes. Proposer d'un système d'énergie multi-sources pour le tramway de Ouargla et proposer plusieurs scénarios de gestion de l'énergie dans celui-ci, les stratégies sont étudiées, tester, et comparer pour trouver le bon scénario.

Abstract

This work is done on 3 main axes; design and evaluate the performance of fuel cell electric vehicles based on real driving cycles. The results show that the driving course developed in the city of Ouargla is more complex than the standard driving course, which makes it possible to more effectively evaluate these hybrid vehicles. Propose a strategy for fuel cell temperature control. The results showed that at a lower ambient temperature, the fuel cell could be heated in 6 minutes. Propose a multi-source energy system for the Ouargla tramway and propose several energy management scenarios in it, the strategies are studied, tested, and compared to find the right scenario.

الملخص

يتم هذا العمل على 3 محاور رئيسية ؛ تصميم وتقييم أداء المركبات الكهربائية التي تعمل بخلايا الوقود على أساس دورات القيادة الحقيقية. تظهر النتائج أن دورة القيادة التي تم تطويرها في مدينة ورقلة أكثر تعقيدًا من دورة القيادة القياسية ، مما يجعل من الممكن تقييم هذه المركبات الهجينة بشكل أكثر فاعلية. اقتراح استراتيجية للتحكم في درجة حرارة خلايا الوقود. أظهرت النتائج أنه عند درجة حرارة محيطة منخفضة ، يمكن تسخين خلية الوقود في 6 دقائق. اقتراح نظام طاقة متعدد المصادر لخط ترام ورقلة واقترح عدة سيناريوهات لإدارة الطاقة فيه ، ويتم دراسة الاستراتيجيات واختبارها ومقارنتها لإيجاد السيناريو الصحيح.

Contenue

Dédicaces **II**

Remerciement **III**

Résumé **IV**

Abstract **IV**

الملخص **IV**

Contenue **V**

Liste de figures **IX**

Liste du tableau **XI**

Notation **XII**

INTRODUCTION GENERALE **1**

CHAPITRE 1. ÉTAT DE L'ART DES VEHICULES ELECTRIQUES HYBRIDES A PILE A COMBUSTIBLE **5**

1.1. Introduction **6**

1.2. Véhicules à moteur à combustion interne **6**
1.2.1. Moteur à combustion interne 6
1.2.2. Efficacité de moteur à combustion interne 7

1.3. Problème de véhicule conventionnel **7**
1.3.1. Sources d'énergie fossile 8
.1.3.2 Environnement 9

1.4. Solutions alternatives **11**
1.4.1. Biocarburant 11
1.4.2. Véhicules hybride 13
1.4.3. Véhicules électriques 16
1.4.4. Véhicules à pile à combustible 18

1.5. Architecture d'un véhicule à pile à combustible **22**

1.6. Hydrogène **22**
1.6.1. Hydrogène dans l'Algérie 22
1.6.2. Production d'hydrogène 23
1.6.3. Utilisation d'hydrogène 23

1.6.4. Hydrogène pour les véhicules 23
1.6.5. Problème de stockage d'hydrogène 24

1.7. Pile à combustibles 24
1.7.1. Historique de pile à combustible 24
1.7.2. Type de pile à combustible 25
1.7.3. Piles à combustible à membrane échangeuse de protons 25
1.7.4. Principe de fonctionnement de pile à combustible 26

1.8. Super condensateur 28
1.8.1. Condensateurs 28
1.8.2. Super condensateur 28
1.8.3. Type de super condensateur 28
1.8.4. Principes de base des super condensateurs 29
1.8.5. Technologies des super condensateurs 30

1.9. Convertisseurs utilisés dans les véhicules à pile à combustible 30
1.9.1. Convertisseurs CC-CC 30
1.9.2. Classification des convertisseurs 31
1.9.3. Convertisseurs CC-CA 31

1.10. Conclusion 31

CHAPITRE 2. CONCEPTION ET DIMENSIONNEMENT DE VEHICULES ELECTRIQUES A PILE A COMBUSTIBLE 33

2.1. Introduction 34

2.2. Caractérisation de cycle de conduite 34
2.2.1. Définition de cycle de conduite 34
2.2.2. Types de cycle de conduite 35
.2.2.3 Importance du cycle de conduite 35
2.2.4. Exemple de cycle de conduite 35
2.2.5. Cycle de conduite de Ouargla 37
2.2.6. Analyse de cycle de conduite 39
2.2.7. Comparaison avec les autre drive cycle 39

2.3. Étude sur les véhicules commerciaux à pile à combustible 41
2.3.1. Outil utilisée 41
2.3.2. Consommation énergétique 43
2.3.3. Environnemental protection 45

2.4. Conception d'un véhicule à pile à combustible 45
2.4.1. Modélisation du système 45
2.4.2. Stratégie de gestion de l'énergie 48
2.4.3. Méthode de calcul de la taille 52
2.4.4. Résultat obtenue 54

2.5. Conclusion 57

CHAPITRE 3. CONTRIBUTION A LA GESTION D'ENERGIE THERMIQUE DANS LES PILES A COMBUSTIBLE 58

3.1. Introduction 59

3.2. Structure d'une PAC 59
3.2.1. Membranes polymères ioniques 60
3.2.2. Electrodes 60
3.2.3. Plaques bipolaires 60

3.3. Architecture du système pile à combustible 61
3.3.1. Alimentation en fluide 61
3.3.2. Elimination de l'eau produite 61
3.3.3. Elimination de la chaleur 61

3.4. Paramètres affectant la température de la pile à combustible 62
3.4.1. Structure matérielle 62
3.4.2. Fluide de refroidissement 63
3.4.3. Démarrage à froid 64

3.5. Revue de littérature 64

3.6. Control thermique basée sur le multi-pack PàC 65
3.6.1. Prédimensionnement de système 66
3.6.2. Préchauffage 67
3.6.3. Refroidissement 68

3.7. Modèle thermique du système 68

3.8. Résultats et analyse 71
3.8.1. Étude Comparative 71
3.8.2. Processus de chauffage 74
3.8.3. Processus de refroidissement 76

3.9. Conclusion 79

CHAPITRE 4. GESTION ET OPTIMISATION D'ENERGIE DANS LE TRAMWAY DE OUARGLA 80

4.1. Introduction 81

4.2. Informations générales sur le transport ferroviaire 81
4.2.1. Train 81
4.2.2. Trains à grande vitesse (TGV) 81
4.2.3. Métro 81
4.2.4. Tramway 82

4.3. Informations générales sur le tramway 82
4.3.1. Premiers tramways électriques 82
4.3.2. Principe de fonctionnement du tramway 83
4.3.3. Composants de tramway 83
4.3.4. Avantages du tramway 84
4.3.5. Coûts du tramway 84

4.4. Tramway de Ouargla 85
4.4.1. Présentation de la société d'exploitation 85
4.4.2. Présentation de tramway d'Ouargla 86
4.4.3. Caractéristiques du type de tramway Ouargla (Alstom Citadis 402) 87

4.5. Consommation d'énergie par le tramway de Ouargla 88
4.5.1. Profile de conduire 88
4.5.2. Profil de charge de tramway Ouargla 89

4.6. Conception d'un tramway hybride 91
4.6.1. Méthode de dimensionnement 91

4.7. Stratégie de gestion de l'énergie 92
4.7.1. Scénario 1 93
4.7.2. Scénario 2 94
.4.7.3 Scénario 3 95
4.7.4. Scénario 4 96
4.7.5. Scénario 5 97

4.8. Résultant 98
4.8.1. Energie produite par la pile à combustible. 98
4.8.2. Contribution de super condensateur 99
4.8.3. Capacité du système 100
4.8.4. Etat de charge de super condensateur 100

4.9. Conclusion 101

CONCLUSION GENERALE 103

BIBLIOGRAPHIES A

ANNEXES J

Liste de figures

Figure 1-1: Statistiques de pétrole dans le monde [26] 8
Figure 1-2: Émissions de CO2 par secteur, Monde 1990-2020 [28] 9
Figure 1-3: Émissions de CO2 par le secteur de transport, Monde 1990-2020 [28] 9
Figure 1-4: Véhicule électrique à batterie [39] 17
Figure 1-5: Véhicule électrique à pile à combustible [43] 18
Figure 1-6: Caractéristique statique d'une PàC 26
Figure 1-7 : Schéma de principe de la pile à combustible PEM 27
Figure 2-1: Cycle de conduite UDDC 36
Figure 2-2: Cycle de conduite HWFET 37
Figure 2-3: Plan de route 38
Figure 2-4: Cycle de conduite Ouargla 38
Figure 2-5: Production d'électricité par pile à combustible 43
Figure 2-6: Production d'électricité et batterie 44
Figure 2-7: État de charge de batterie 44
Figure 2-9: Visualisation des résultats d'analyse bibliométrique des véhicules électriques 51
Figure 2-10:Organigramme correspondant à SGE. 52
Figure 2-11: Puissance requise par le véhicule 55
Figure 2-12: Puissance de PàC 56
Figure 2-13: Puissance de SC 56
Figure 3-1: Structure d'une cellule PEMFC 59
Figure 3-2: Connexion électrique de système PàC / SC 66
Figure 3-3: Schéma de principe d'un système de refroidissement de piles à combustible 67
Figure 3-4: Energie fournie par l'ESS pour chauffer le système PàC 72
Figure 3-5: Temps nécessaire pour chauffer le système PàC 73
Figure 3-6: Bilan énergétique de la première PàC 74
Figure 3-7: Bilan énergétique de la première PàC dans la deuxième partie du chauffage 75
Figure 3-8: Température de l'eau de refroidissement 76
Figure 3-9: Bilan énergétique de la deuxième PàC 76
Figure 3-10: Courent électrique 77
Figure 3-11: Température de PàC 77
Figure 3-12: Puissance produit par les PàCs 78
Figure 3-13: Température de l'eau de refroidissement 78
Figure 4-1: Matériels fixes de tramway 83
Figure 4-2: Tramway en service [175] 86
Figure 4-3: Vue générale de la ligne du tramway d'Ouargla 87
Figure 4-4: Profile de vitesse 89
Figure 4-5: Profile de charge de tramway de Ouargla 90
Figure 4-6: Configuration proposée du tramway hybride 91
Figure 4-7: Contribution des éléments de source d'énergie pour scénario 1 94
Figure 4-8: Contribution des éléments de source d'énergie pour scénario 2 95
Figure 4-9: Contribution des éléments de source d'énergie pour scénario 3 96
Figure 4-10: Contribution des éléments de source d'énergie pour scénario 4 96
Figure 4-11: Contribution des éléments de source d'énergie pour scénario 5 98

Figure 4-12: Energie produite par PàC 99
Figure 4-13: Contribution SC 99
Figure 4-14: Energie perdue par le système 100
Figure 4-15: Etat de charge moyen 101

Liste du tableau

Tableau 1-1: Densité énergétique de certaines sources de carburant alternatives [30] 12
Tableau 2-1: Attributs de cycle de conduite développés et standard 39
Tableau 2-2: Comparaison entre les cycles de conduite 40
Tableau 2-3: Caractéristiques de TOYOTA MIRAI 43
Tableau 2-4: Emissions de gaz à effet de serre 45
Tableau 2-5: Paramètres du véhicule d'essai [136] 54
Tableau 3-1: Conditions de travail de la pile à combustible [60] 69
Tableau 3-2: Paramètres de la pile à combustible 72
Tableau 4-1: Caractéristique de tramway de type Citadis 402 [177] 88
Tableau 4-2: Caractéristique de tramway 90

Notation

g	Accélération de pesanteur
HNO_3	Acide nitrique
C_d	Coefficient de résistance à l'air du véhicule
f_r	Coefficient de résistance au roulement
F	Constante de Faraday
R	Constante des gaz
CA	Courant alternative
CC	Courant continu
$I_{P\grave{a}C}$	Courant de pile à combustible.
I_{SC}	Courant du super condensateur
I_{max}	Courant maximum
N_2O	D'oxyde nitreux
ρ	Densité de l'air
NO_2	Dioxyde d'azote
CO_2	Dioxyde de carbone
EME	Electrode Membrane Electrode
$E_{sc,max}$	Énergie maximale de super condensateur
CH_3CH_2OH	Ethanol
F_{acc}	Force d'accélération
F_g	Force de gravité
GNC	Gaz naturel comprimé
GNL	Gaz naturel liquéfié
α	Gradient de la route
M	Masse du véhicule
CH_3OH	Méthanol
CO	Monoxyde de carbone

MCI	Moteur à combustion interne
ME	Moteur électrique
NO	Oxyde nitrique
NO_x	Oxydes d'azote
PàC	Pile à Combustible
PàCAPh	Piles à Combustible à Acide Phosphorique
PàCMEP	Piles à Combustible à Membrane Echangeuse de Protons
PàCOS	Piles à Combustible à Oxyde Solide
PàCCF	Piles à Combustible au Carbonate Fondu
PàCMD	Piles à Combustible au Méthanol Direct
PàCM	Piles à combustible microbiennes
PTFE	Poly Tétra Fluore Ethylène
E_0	Potentiel réversible de cellule.
P_{H_2O}	Pression partielle de l'eau
P_{H_2}	Pression partielle de l'hydrogène
P_{O_2}	Pression partielle d'oxygène
F_{Ad}	Résistance aérodynamique
F_{rool}	Résistance au roulement
R_{SC}	Résistance interne du super condensateur.
SGE	Stratégie de Gestion de l'Energie
A_f	Surface de l'avant du véhicule
SSE	Système de Stockage d'Energie
T	Température de la cellule
VMCI	Véhicule à moteur à combustion interne
VPàC	Véhicule à Pile à Combustible
VE	Véhicule électrique
VEB	Véhicule électrique à batterie

VEH	Véhicule électrique hybride
VEH-R	Véhicule électrique hybride rechargeable
GPL	Véhicules au propane
V	Vitesse

Introduction générale

Le développement social et économique et la grande révolution des énergies non renouvelables ont entraîné de graves conséquences pour la planète, où la pollution de l'environnement et le réchauffement climatique constituent une menace majeure pour la vie. L'utilisation de grandes quantités de combustibles fossiles est à l'origine du réchauffement climatique, de la pollution de l'air et de l'appauvrissement de la couche d'ozone. En outre, l'utilisation excessive de combustibles fossiles peut également conduire à la consommation de ressources pétrolières souterraines. Le secteur des transports du monde moderne repose principalement sur les combustibles fossiles. Il y a plus de miliaire de voitures sur la route aujourd'hui. La consommation totale de carburant du secteur des transports est d'environ 40% [1] et selon [2], les émissions de gaz à effet de serre représentaient un quart des émissions totales en 2016.

Le véhicule électrique (VE), le véhicule électrique hybride (VEH) et le véhicule électrique hybride rechargeable (VEH-R) sont considérés les meilleures solutions envisageables pour réduire les émissions de gaz à effet de serre et préserver l'environnement. Par rapport aux véhicules à essence ou à carburant, les véhicules électriques contribuent non seulement à maintenir un environnement propre et sain, mais également à réduire les coûts d'exploitation du véhicule. En termes de coûts énergétiques, le coût d'une voiture électrique est de 2 cents par mile, tandis que le coût d'une voiture à essence est de 12 cents par mile [3]. À l'heure actuelle, une voiture électrique peut parcourir 4 à 8 miles par kilowattheure d'énergie et les émissions de gaz à effet de serre sont nulles. Selon le ministère de l'Énergie de États Unis, un véhicule à moteur à combustion interne (VMCI) ne consomme que 15% de l'énergie totale de carburant de la voiture, tandis qu'un véhicule électrique utilise plus de 75% de l'énergie totale [4]. Le reste de l'énergie est dissipé dans l'environnement sous forme de chaleur, entraînant un réchauffement climatique. Par conséquent, VE est une meilleure alternative aux véhicules MCI.

De nombreux modèles de véhicules électriques à pile à combustible (VPàC) sont fabriqués par différents constructeurs automobiles tels que Toyota Mirai, Hyundai ix35 pile à combustible ou Mercedes GLC F-Cell, qui ont obtenu les avantages suivants : économie d'énergie, sans pollution, haute efficacité, faible bruit, économie d'énergie. Ces véhicules utilisent des piles à combustible comme source principale et d'éléments de stockage comme sources auxiliaires peut combiner leurs avantages respectifs. Généralement, la batterie FC, la batterie FC-SC et la batterie FC-SC ont trois possibilités.

L’hydrogène ne s'agit pas d'un élément polluant, l'énergie spécifique de l'hydrogène est de 120 MJ / kg, tandis que le diesel et l'essence sont d'environ 46 MJ / kg [5–13]. Mais il n'existe

pas uniquement sur la terre et est toujours combiné, il doit donc être obtenu à partir d'éléments majeurs tels que l'eau, la biomasse, le gaz naturel, le charbon, etc. [5–13].Cette hydrogène est un carburent pour les piles à combustible à membrane échangeuse de protons (Pà$CMEP$), le dispositif qui convertit l'énergie chimique en énergie électrique au moyen d'une réaction chimique entre l'hydrogène et l'oxygène. Les sous-produits sont l'eau et l'énergie thermique. La température de fonctionnement doit être comprise entre 60 ° C et 90 ° C, fournissant une puissance de 100 W à 500 kW à 100% d'efficacité, la membrane en polymère solide est anti-vibration et le PàC a une durée de vie de 500 à 1000 cycles [14–17]. Un super condensateur (SC) est un composant électrique composé de deux plaques conductrices parallèles. Les deux plaques conductrices parallèles sont séparées par un milieu diélectrique. L'énergie spécifique du milieu diélectrique est de $(1-10)\ Wh\ /\ kg$, La puissance spécifique est $10000\ W\ /\ kg$, le rendement est de (85-98)% et la durée de vie dépasse 500000 cycle charge décharge [18]. Une batterie est un appareil qui utilise la réversibilité des processus électrochimiques pour récupérer l'énergie électrique et emmagasiner l'énergie sous forme d'énergie électrique. L'énergie spécifique est de $(100-200)\ Wh\ /\ kg$, la puissance spécifique est de $(1000$ à $3000)\ W\ \ /\ kg$ et la durée de vie excède 500 cycle charge décharge [19].

Le principal défi du développement de véhicules électriques est le coût de l'énergie, car il représente près d'un tiers du coût total des véhicules. L'utilisation de différents types d'énergie pour réduire les coûts de stockage et améliorer l'efficacité a conduit à différentes configurations de véhicules électriques [4]. Tous les véhicules électriques sont divisés en trois types : les véhicules électriques à batterie (VEB), les véhicules électriques à pile à combustible qui utilisent une combinaison de piles à combustible et de systèmes de stockage (batterie ou supercondensateur) comme ressources énergétiques. Les étapes de recherche du VPàC comprennent la conception de composants de véhicules et l'amélioration de l'efficacité des véhicules.

Ce travail a été divisé en quatre chapitres. Le premier comprend un examen complet du problème énergétique dans le domaine des transports, en particulier le problème de la pollution et le problème de la diminution des réserves mondiales. Il comprenait également un examen d'un ensemble de suggestions visant à résoudre ces problèmes, tels que l'utilisation de sources d'énergie propres et renouvelables au lieu des combustibles fossiles. Les composés d'hydrogène ont également été examinés en détail comme meilleures solutions.

Dans le deuxième chapitre, la première application de cette note a été passée en revue. Un cycle de conduite a été revu pour simuler la réalité de la conduite sur les routes algériennes, et

sur cette base, une étude a été préparée pour la performance d'un véhicule à hydrogène en Algérie, et une étude a également été préparée pour la mise à l'échelle des sources d'énergie adaptées à l'environnement algérien.

Dans le troisième chapitre, une solution a été proposée pour résoudre le problème de la chaleur dans la pile à combustible. Il repose principalement sur l'utilisation de deux piles à combustible ou plus dans un même véhicule. La stratégie proposée a été étudiée sous deux angles. Le premier aspect est la première étape de chauffage avant le début de l'opération, et le deuxième aspect est le processus de refroidissement qui coïncide avec l'opération

Dans le quatrième chapitre, la possibilité de remplacer la source d'énergie utilisée dans le tramway de Ouargla, qui dépend de l'électricité impure, a été étudiée, et l'utilisation de l'hydrogène comme carburant a été proposée, et la possibilité d'utiliser cinq stratégies différentes pour la gestion de l'énergie.

Chapitre 1. État de l'art des véhicules électriques hybrides à pile à combustible

1.1. Introduction

En gras de la croissance continue des VMCI, la demande mondiale de combustibles fossiles dans l'industrie des transports augmente rapidement. Cela a entraîné de graves problèmes environnementaux, notamment des émissions de gaz à effet de serre et une détérioration de la qualité de l'air. Par conséquent, il est nécessaire d'augmenter l'utilisation des énergies renouvelables dans le secteur des transports et d'autres applications hors réseau. En raison de leur rendement élevé et de émissions de gaz à effet de serre nulles, les PàC devraient devenir un bon alternatif.

Dans ce chapitre, plusieurs axes ont été consultée, partant des problèmes qui accompagnaient l'utilisation massive des véhicules, conduisant à une revue des solutions proposées pour faire face à ces problèmes. Et parmi les solutions proposées, les véhicules à pile à combustible ont été sélectionnés pour étude, où les éléments les plus importants qui entrent dans leur architecture ont été analysés.

1.2. Véhicules à moteur à combustion interne

À un stade très précoce de l'histoire de l'humanité, l'homme ont réalisé que le corps humain est sévèrement limité en termes de charge et de distance qu'il peut supporter. Pour cela la domestiquant des animaux pour transporter des charges plus lourdes de grandes distances a été fait, généralement à une vitesse supérieure à celle que les humains peuvent atteindre, Un avantage supplémentaire est que puisque la plupart des efforts sont fournis par les animaux, les gens peuvent voyager confortablement dans un environnement relativement confortable [20].

Le développement de la machine à vapeur aux XVIIIe et XIXe siècles a conduit à son application dans la conduite automobile. Bien que certaines premières tentatives aient été infructueuses, et il s'est avéré que la machine à vapeur n'était pas adaptée aux véhicules routiers comme ferroviaires. Cependant, à la fin du XIXe siècle, le moteur à combustion interne ultraléger à grande vitesse a été développé avec succès, ce qui a vraiment ouvert la voie aux routes à moteur, rendant possible le développement de voitures, de camions et de Bus [21].

1.2.1. Moteur à combustion interne

Le véhicule à moteur à combustion interne (VMCI) utilise son moteur de combustion interne (MCI) pour produit de puissance, dirigeant la majeure partie de cette puissance par la boîte de vitesse de faire tourner les roues. Les propriétés de production d'énergie des MCI sont d'une importance vitale car le couple produit par le moteur entraîne le véhicule dans des situations de conduite différentes et diverses. Les MCI convertissent l'énergie chimique contenue dans le

carburant en puissance mécanique qui est généralement mise à disposition sur un arbre de sortie en rotation. Le carburant contient de l'énergie chimique qui est convertie en énergie thermique par combustion ou oxydation avec de l'air à l'intérieur du moteur. La pression des gaz à l'intérieur du moteur s'accumule en raison du processus de combustion qui génère de la chaleur. Le gaz à haute pression se dilate alors et pousse les surfaces à l'intérieur du moteur. Cette force d'expansion déplace les liaisons mécaniques du moteur et finit par faire tourner un vilebrequin. L'arbre de sortie d'un moteur à combustion interne est généralement accouplé à une boîte de vitesses, comme dans le cas des véhicules de transport [22].

1.2.2. Efficacité de moteur à combustion interne

Une grande partie de la chaleur produite par la combustion ne peut pas être employée pour le travail et est gaspillée, tous les deux parce que les MCI ont la limite théorique d'efficacité [20]. D'ailleurs, il est impossible d'atteindre la limite théorique d'efficacité parce que :

- Une partie de la chaleur est perdue à travers les parois du cylindre avant qu'il ne puisse fonctionner ;
- Une partie du carburant est brûlée à une pression inférieure à la pression la plus élevée possible ;
- Le carburant est également brûlé lorsque le moteur subit une charge négative (lors du freinage) ou lorsque le véhicule roule en roue libre ou à l'arrêt, avec le moteur au ralenti.

Bien qu'une partie des pertes du moteur se produise en toutes circonstances, une partie se produit parce que dans les moteurs conventionnelles, les moteurs sont dimensionnés pour fournir des niveaux de puissance de pointe très élevés, Cependant, les moteurs fonctionnent la plupart du temps à une petite fraction de la puissance de pointe, et ces points de fonctionnement est assez inefficaces [23].

Le fait d'avoir un moteur aussi gros augmente également la quantité de carburant nécessaire pour maintenir le moteur en marche lorsque le véhicule est à l'arrêt ou pendant le freinage ou la roue libre, et augmente les pertes dues au poids supplémentaire du moteur, ce qui augmente la résistance au roulement et les pertes d'inertie.

1.3. Problème de véhicule conventionnel

La combustion interne des produits pétroliers fournit une énorme quantité d'énergie, et plusieurs avantages de leur utilisation dans les véhicules ; mais elle cache des inconvénients majeurs, notamment la diminution des réserves de combustibles fossiles, et l’augmentation d’émissions des gazes à effet de serre.

1.3.1. Sources d'énergie fossile

La grande majorité des carburants utilisés pour le transport sont des carburants liquides dérivés du pétrole [24]. Le pétrole est un combustible fossile produit par la décomposition d'organismes piégés dans des couches géologiquement stables il y a des millions d'années (Ordovicien, il y a environ 6 à 400 millions d'années) [25]. Le processus est à peu près le suivant : les organismes (principalement les plantes) meurent et sont lentement recouverts de sédiments. Au fil du temps, ces sédiments accumulés ont formé des couches épaisses et se sont transformés en roches. Les matières biologiques sont piégées dans des espaces clos, où elles rencontreront des pressions et des températures élevées, et se transformeront progressivement en hydrocarbures ou en charbon en fonction de leurs propriétés. Ce processus a pris des millions d'années pour se terminer. C'est ce qui rend les ressources en combustibles fossiles de la planète limitées.

Les réserves prouvées sont « les quantités que les informations géologiques et techniques peuvent montrer avec une certitude raisonnable qu'elles pourront être récupérées à l'avenir dans des réservoirs connus dans les conditions économiques et d'exploitation actuelles ».la Figure 1-1 représente la réserve de pétrole dans le monde en 2019 [26]. En pratique, les estimations des réserves mondiales varient en fonction des découvertes, des évolutions technologiques et économiques, rendant l'exploitation des gisements plus ou moins rentable. Les réserves d'énergie fossile seront suffisantes pour répondre à l'évolution de la consommation dans les décennies à venir. Les réserves prouvées devraient couvrir 52 ans de consommation de pétrole, 60 ans de consommation de gaz naturel.

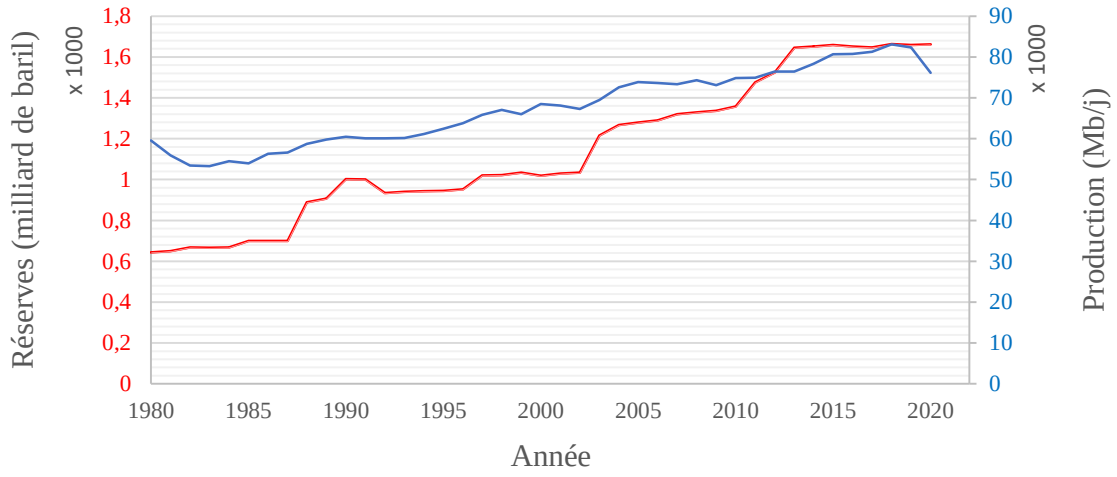

Figure 1-1: Statistiques de pétrole dans le monde [26]

L'huile extraite aujourd'hui est l'huile facilement extraite trouvée près de la surface dans les zones où le climat n'est pas un problème majeur. On pense que plus de pétrole a été trouvé sous la croûte dans les régions arctiques de la Sibérie, des États-Unis et du Canada. Dans ces zones, les enjeux climatiques et écologiques sont les principaux obstacles à l'extraction ou à l'exploration pétrolière.

1.3.2. Environnement

La mobilité représente environ un quart des émissions mondiales, dont 60 % proviennent du transport routier, du transport maritime et de l'aviation [27]. La Figure 1-2 et la Figure 1-3 représente la variation des émission de CO_2 [28],

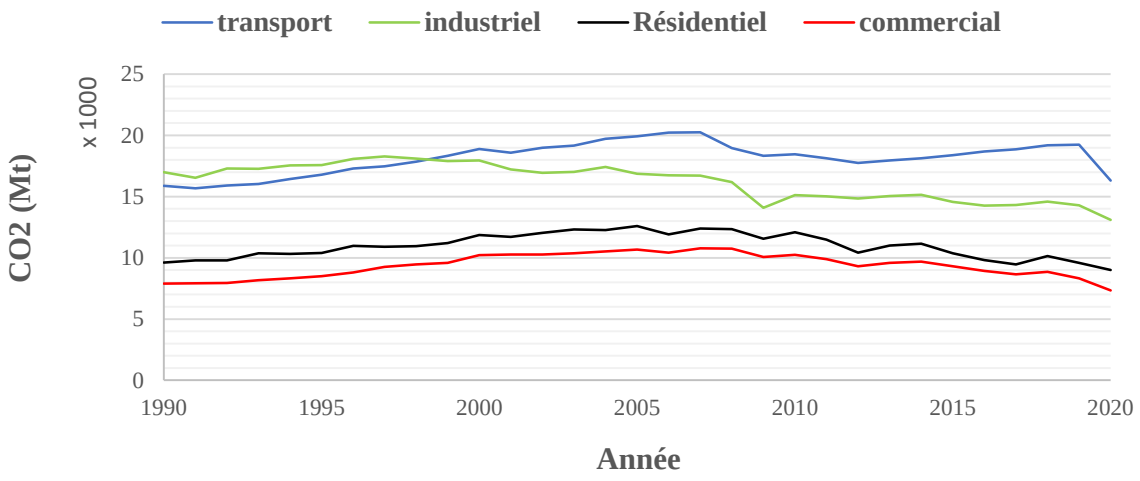

Figure 1-2: Émissions de CO2 par secteur, Monde 1990-2020 [28]

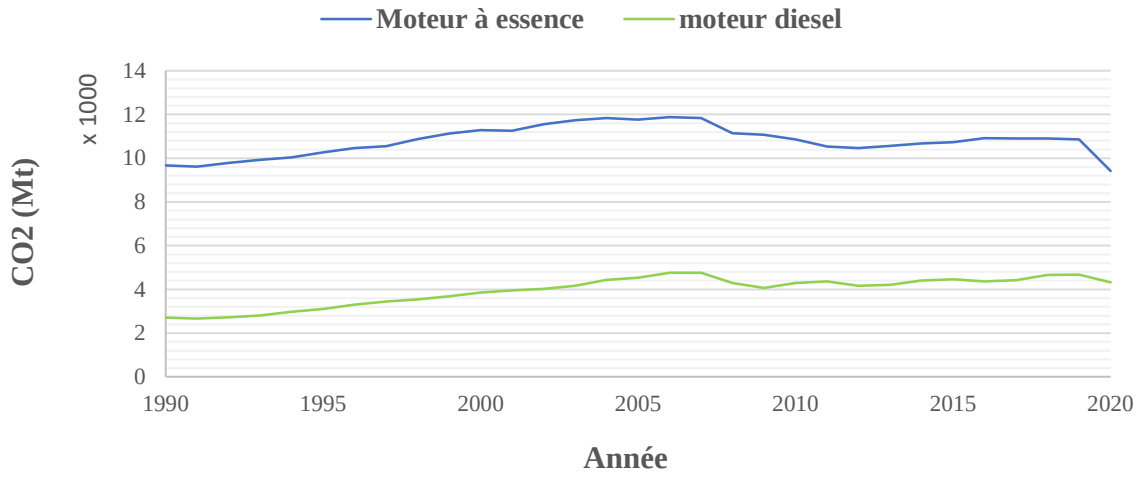

Figure 1-3: Émissions de CO2 par le secteur de transport, Monde 1990-2020 [28]

La combustion d'hydrocarbures dans les moteurs à combustion interne (MCI) s'accompagne

généralement d'émissions de gaz toxiques en plus du dioxyde de carbone (CO_2) et de l'eau, tels que le monoxyde de carbone (CO), les oxydes d'azote (NO_x) et les hydrocarbures imbrûlés, Ces gaz captent les rayons infrarouges réfléchis par le soleil depuis le sol, retenant ainsi l'énergie dans l'atmosphère et élevant la température. L'augmentation de la température de la terre a causé des dommages écologiques importants à son écosystème et provoqué de nombreuses catastrophes naturelles qui affectent les humains [23].

1.3.2.1. Oxydes d'azote

Les oxydes d'azote (NO_x) sont produits par la réaction entre l'azote et l'oxygène de l'air. En théorie, l'azote est un gaz inerte. Cependant, la température et la pression élevées dans le moteur créent des conditions favorables à la formation d'oxydes d'azote. Jusqu'à présent, la température est le paramètre le plus important dans la formation d'oxydes d'azote. Bien qu'il existe encore de petites quantités de dioxyde d'azote (NO_2) et des traces d'oxyde nitreux (N_2O), l'oxyde d'azote le plus courant est l'oxyde nitrique (NO). Lorsqu'il est rejeté dans l'atmosphère, le NO réagit avec l'oxygène pour produire du NO_2. Ensuite, il est décomposé par le rayonnement ultraviolet du soleil en NO et en atomes d'oxygène hautement réactifs, qui attaquent les membranes des cellules vivantes. Le dioxyde d'azote fait partie de la cause du smog. Sa couleur brune rend la fumée visible. Il réagit également avec l'eau de l'atmosphère pour produire de l'acide nitrique (HNO_3), qui est dilué sous la pluie. Ce phénomène est appelé « pluies acides » et est à l'origine de la destruction des forêts dans les pays industrialisés. Les pluies acides ont également causé la dégradation du monument historique en marbre[23,29].

1.3.2.2. Monoxyde de carbone

Le monoxyde de carbone est produit en raison d'une combustion incomplète d'hydrocarbures due au manque d'oxygène. C'est le poison qui respire les gens et les animaux. Une fois que le monoxyde de carbone atteint les cellules sanguines, il se fixe à l'hémoglobine au lieu de l'oxygène, réduisant ainsi la quantité d'oxygène atteignant les organes et réduisant la capacité physique et mentale de l'organisme affecté. Les étourdissements sont le premier symptôme d'une intoxication au monoxyde de carbone et peuvent rapidement entraîner la mort. La liaison du monoxyde de carbone à l'hémoglobine est plus forte que celle de l'oxygène. Cette combinaison est si forte que les fonctions normales du corps humain ne peuvent pas les détruire. Les personnes intoxiquées au monoxyde de carbone doivent être traitées dans une chambre sous pression. La pression dans la chambre sous pression favorisera la rupture de la liaison monoxyde de carbone-hémoglobine [23].

1.3.2.3. Hydrocarbures non brûlés :

Les hydrocarbures non brûlés sont le résultat d'une combustion incomplète des hydrocarbures. Selon sa nature, les hydrocarbures non brûlés peuvent être nocifs pour les êtres vivants. Certains de ces hydrocarbures non brûlés peuvent être des poisons directs ou des produits chimiques cancérigènes tels que des particules, du benzène ou autres. Les hydrocarbures non brûlés sont également responsables du smog : le rayonnement ultraviolet du soleil interagit avec les hydrocarbures non brûlés et le NO atmosphérique pour former de l'ozone et d'autres produits. L'ozone est une molécule composée de trois atomes d'oxygène. Il est incolore, mais très dangereux et toxique car il attaque les membranes des cellules vivantes, les faisant vieillir ou mourir prématurément. Les jeunes enfants, les personnes âgées et les personnes souffrant d'asthme souffrent grandement d'une exposition à des niveaux élevés d'ozone. Chaque année, des décès dus aux pics d'ozone sont signalés dans les villes pollués [23].

1.4. Solutions alternatives

La nécessité impérieuse de réduire les émissions de CO_2 au niveau mondial, impose des prises de décisions prônées par de nouveaux engagements politiques. Nouveaux engagements qui posent les jalons d'une nouvelle orientation mondiale en termes de gestion énergétique surtout dans le secteur de transport. L'objectif étant de permettre la recherche et la commercialisation de nouvelles solutions, il y a plusieurs études et solutions ont été proposées et appliquées :

1.4.1. Biocarburant

Plusieurs recherches sur l'utilisation de carburants alternatifs dans les véhicules ont été menées et se poursuivent, surtout sur le propane, l'éthanol, le méthanol, et le gaz naturel, et plusieurs autre carburants alternatifs (Tableau 1-1)[30].

Il est important de savoir qu'en plus d'utiliser des entraînements électriques, il existe d'autres moyens de réduire notre dépendance à l'égard du pétrole étranger. Des recherches sur l'utilisation de carburants alternatifs dans l'MCI ont été et sont en cours. Beaucoup de ces carburants sont également considérés comme le carburant de choix pour les véhicules électriques à pile à combustible. En utilisant des carburants alternatifs, nous avons non seulement réduit notre dépendance au pétrole, mais également réduit les émissions et l'impact des gaz d'échappement des automobiles sur le réchauffement climatique.

Tableau 1-1: Densité énergétique de certaines sources de carburant alternatives [30]

Carburants alternatifs	Densité d'énergie par kilogramme [Mj/kg]
Hydrogène	143
Gaz naturel	53,6
GPL propane	49,6
Biodiesel	42,20
Charbon	32,5
Méthanol	19,7

1.4.1.1. Véhicules au propane

Le propane est un carburant propre. Comparé à d'autres carburants alternatifs, sa gamme est plus proche de l'essence. Le propane est un sous-produit de la production de gaz naturel et du raffinage du pétrole. À l'état naturel, le propane est un gaz mais doit être stocké à haut pression donc le gaz se transforme en liquide.et Lorsque le propane liquide est extrait du réservoir, il se dilate de nouveau en un gaz avant d'être brûlé dans le moteur [31].

1.4.1.2. Véhicules à l'éthanol / méthanol

L'alcool a été utilisé dans de nombreuses applications. Deux types d'alcool sont utilisés dans la crème glacée : le méthanol (méthanol) et l'éthanol (éthanol).

Ces carburants sont similaires mais de composition chimique différente : L'éthanol (CH_3CH_2OH), communément appelé alcool de grain, est un déchet. L'éthanol est un carburant renouvelable qui peut être fabriqué à partir de presque toutes les substances contenant du carbone. L'éthanol peut être utilisé comme carburant à indice d'octane élevé dans les véhicules et est souvent mélangé à de l'essence pour augmenter sa teneur en oxygène. Ce dernier aboutit à ce que l'on appelle un carburant oxygéné. Le méthanol (CH_3OH) est un carburant propre, généralement fabriqué à partir de gaz naturel, mais peut également être produit à partir de charbon et de biomasse. Au fil des ans, la consommation de méthanol comme carburant a diminué.

1.4.1.3. Véhicules au gaz naturel

Le gaz naturel comprimé (GNC) et le gaz naturel liquéfié (GNL) sont des carburants très propres, et l'approvisionnement en gaz naturel est moins cher et moins cher que l'essence. Ces deux facteurs font du gaz naturel une option intéressante. Le gaz naturel comprimé doit être stocké en toute sécurité dans des bouteilles à haute pression, ce qui est le plus gros inconvénient de l'utilisation du gaz naturel comprimé comme carburant. L'espace occupé par ces cylindres peut être utilisé pour transporter des bagages et peut parfois accueillir des passagers. Pour des raisons pratiques, la taille du réservoir de stockage doit être limitée ; par conséquent, la distance de conduite des véhicules au GNC est plus courte que celle des véhicules à essence. Le gaz naturel devient liquide lorsqu'il est refroidi à –164 ° C. Du fait qu'il est liquide, l'approvisionnement en GNL consomme moins d'espace dans le véhicule que le GNC. Par conséquent, la gamme des véhicules GNL est plus longue que celle des véhicules GNC comparables. Cependant, le carburant doit être distribué et stocké à des températures extrêmement basses, ce qui nécessite un équipement de réfrigération, qui prend également de la place et rend le GNdL impropre à un usage personnel.

1.4.2. Véhicules hybride

Le terme véhicule hybride (VH) désigne un véhicule comportant au moins deux sources d'énergie. Un véhicule électrique hybride signifie qu'une source d'énergie est fournie par un moteur électrique. Une autre source d'énergie peut provenir de nombreuses technologies différentes, mais est généralement fournie par un moteur à combustion interne conçu pour fonctionner à l'essence ou au diesel. Selon les recommandations du Comité technique de la Commission électrotechnique internationale, le VH est un véhicule qui peut obtenir de l'énergie de propulsion à partir de deux ou plusieurs sources d'énergie, et au moins l'une d'entre elles peut fournir de l'énergie électrique. [32].

Les VHs réduisent la consommation de combustibles fossiles, car ils dépendent des batteries pour fonctionner à faible consommation d'énergie et ne dépendent que du carburant pour fonctionner à l'accélération ou à une puissance de charge élevée. Les modèles VHs entrant en production de masse comprennent la Honda Insight, la Toyota Prius et la plus récente Honda Civic hybride. Cependant, des problèmes tels que la pollution, le réchauffement climatique et la forte hausse des prix du carburant ont contraint les constructeurs automobiles à introduire des véhicules à pile à combustible [33].

1.4.2.1. Économies d'énergie dans les véhicule hybrides

En termes d'efficacité énergétique globale, les avantages conceptuels d'un véhicule hybride par rapport à un véhicule conventionnel sont :

a. Freinage récupératif

Un hybride peut capturer une partie de l'énergie normalement perdue sous forme de chaleur dans les freins mécaniques en utilisant son ou ses moteurs d'entraînement électriques en mode générateur pour freiner le véhicule

b. Fonctionnement plus efficace de MCI

Peut éviter certaines des pertes d'énergie associées au fonctionnement du moteur à des combinaisons de vitesse et de charge où le moteur est inefficace en utilisant le dispositif de stockage d'énergie pour soit absorber une partie de la production de MCI, soit l'augmenter, soit même la remplacer. Cela permet à MCI de fonctionner uniquement à des vitesses et des charges où il est le plus efficace. Lorsqu'un VH est arrêté, plutôt que de faire tourner le moteur au ralenti, où il est extrêmement inefficace, le système de contrôle peut soit arrêter le moteur, le dispositif de stockage fournissant une puissance auxiliaire (pour chauffer ou refroidir l'intérieur du véhicule, alimenter les phares, etc. .), ou faire tourner le moteur à un réglage de puissance supérieur au ralenti (plus efficace) et utiliser la puissance excédentaire (par rapport aux charges auxiliaires) pour recharger le dispositif de stockage. Lorsque le système de contrôle du véhicule peut couper le moteur au ralenti, la transmission peut être conçue de manière à ce que le moteur d'entraînement serve également de démarreur, permettant un redémarrage extrêmement rapide en raison du couple de démarrage élevé du moteur.

c. MCI plus petite

Étant donné que le périphérique de stockage peut absorber une partie de la charge, la taille MCI du VH peut être réduit. MCI peut être dimensionné pour la charge continue et non pour la charge d'accélération très élevée à court terme. Cela permet à MCI de fonctionner à une fraction plus élevée de sa puissance nominale, généralement avec un rendement énergétique plus élevé, pendant la majeure partie de la conduite.

1.4.2.2. Configurations de véhicule hybride

L'architecture d'un véhicule hybride est grossièrement définie comme la connexion entre les composants qui définissent le chemin du flux d'énergie et le port de contrôle. Traditionnellement, les véhicules électriques hybrides sont divisés en quatre types :

- Configuration en série ;

- Configuration parallèle ;
- Configuration série-parallèle ;
- Configuration complexe.

a. Système hybride de série

Dans le cas d'un système hybride série, la puissance mécanique est d'abord convertie en électricité à l'aide d'un générateur. L'électricité convertie charge la batterie ou peut contourner la batterie pour propulser les roues via le moteur et la transmission mécanique. Conceptuellement, il s'agit d'un véhicule électrique (EV) assisté par MCI. Les avantages des transmissions hybrides en série sont :

- Le découplage mécanique entre MCI et les roues motrices permet au moteur thermique de fonctionner dans sa région optimale très étroite ;
- Les caractéristiques couple-vitesse presque idéales du moteur électrique rendent inutile la transmission à plusieurs vitesses.

Cependant, une transmission hybride série présente les inconvénients suivants :

- L’énergie est convertie deux fois (mécanique en électrique puis en mécanique) et cela réduit le rendement global ;
- Deux machines électriques sont nécessaires et un gros moteur de traction est nécessaire car c'est la seule source de couple des roues motrices.

La transmission hybride en série est utilisée dans les véhicules utilitaires lourds, les véhicules militaires et les bus. La raison en est que les gros véhicules ont suffisamment d'espace pour le système moteur/générateur encombrant.

b. Système hybride parallèle

Le VEH parallèle permet à la fois à MCI et au moteur électrique (ME) de fournir de la puissance pour entraîner les roues. Étant donné que MCI et ME sont tous deux couplés à l'arbre d'entraînement des roues via deux embrayages, la puissance de propulsion peut être fournie par l'MCI seul, par l'ME uniquement ou par les deux MCI et MI. L'ME peut être utilisé comme générateur pour charger la batterie en freinant par récupération ou en absorbant la puissance de l'MCI lorsque sa puissance est supérieure à celle requise pour entraîner les roues. Les avantages de la transmission hybride parallèle sont :

- Le moteur et le moteur électrique fournissent directement des couples aux roues motrices et aucune conversion de forme d'énergie ne se produit, donc la perte d'énergie est moindre ;

- Compacité en raison de l'absence de générateur et d'un moteur de traction plus petit.

Les inconvénients des transmissions hybrides parallèles sont :

- Couplage mécanique entre les moteurs et les roues motrices, ainsi les points de fonctionnement des moteurs ne peuvent pas être fixés dans une zone de vitesse étroite ;
- La configuration mécanique et la stratégie de contrôle sont complexes par rapport à la transmission hybride série.

En raison de ses caractéristiques compactes, les petits véhicules utilisent une configuration parallèle. La plupart des voitures particulières utilisent cette configuration.

c. Système série-parallèle

Dans l'hybride série-parallèle, la configuration intègre les caractéristiques des VEH série et parallèle. Cependant, cette configuration nécessite une machine électrique supplémentaire et un réducteur planétaire rendant la commande complexe.

d. Système hybride complexe

Le système hybride complexe implique une configuration complexe qui ne peut être classée dans les trois types ci-dessus. L'hybride complexe est similaire à l'hybride série-parallèle puisque le générateur et le moteur électrique sont tous deux des machines électriques. Cependant, la principale différence est due au flux de puissance bidirectionnel du moteur électrique dans l'hybride complexe et au flux de puissance unidirectionnel du générateur dans l'hybride série-parallèle. L'inconvénient majeur de l'hybride complexe est une complexité plus élevée.

1.4.3. Véhicules électriques

Un véhicule électrique est parfois appelé véhicule électrique à batterie (VEB), qui utilise un ou plusieurs moteurs électriques pour faire tourner ses roues motrices[34–38]. L'énergie électrique du moteur est stockée dans la batterie et doit être chargée à partir d'une source d'alimentation externe [39]. Cette technologie est utilisée dans les voitures particulières, les chariots élévateurs à fourche, les bus urbains, les équipements de soutien au sol des aéroports et les équipements industriels hors route. Les véhicules électriques sont des véhicules zéro émission car ils ne polluent pas directement l'air, la seule pollution qui leur est associée est le résultat de la production d'électricité pour recharger la batterie. Même en incluant ces émissions, les VEB sont toujours beaucoup plus propres que les véhicules à moteur à combustion interne.

1.4.3.1. Avantage de véhicule électrique

En règle générale, un VEB peut conduire le même véhicule que tout autre véhicule, mais il est silencieux et ne transporte pas de combustibles fossiles. Cependant, vous devez charger la batterie au lieu de remplir le réservoir de carburant. Insérez la batterie dans une prise de charge à la maison ou ailleurs pour la charger. Le temps de recharge varie en fonction du type de chargeur, de la taille et du type de batterie et d'autres facteurs. Le temps de charge normal est de quatre à huit heures.

1.4.3.2. Inconvénient de véhicule électrique

Le principal inconvénient du VEB est qu'il ne peut parcourir qu'une courte distance. Le VEB convient à la conduite à arrêts multiples comme la conduite en ville. Pour étendre la plage de distance du BEV afin qu'il devienne adapté aux profile de charge en ville et sur autoroute, la boîte de vitesses est axée à l'intérieur du véhicule. Ce faisant, la capacité du système de traction est étendue dans chaque gamme. Cependant, le BEV sans engrenages (conurbation moteur-roue) peut augmenter l'efficacité grâce à la déduction de la quantité de la partie mobile (inertie de rotation). Par conséquent, aucune énergie n'est perdue dans le mécanisme d'engrenage et de différentiel. Cette configuration réduit la gravité centrale du véhicule.

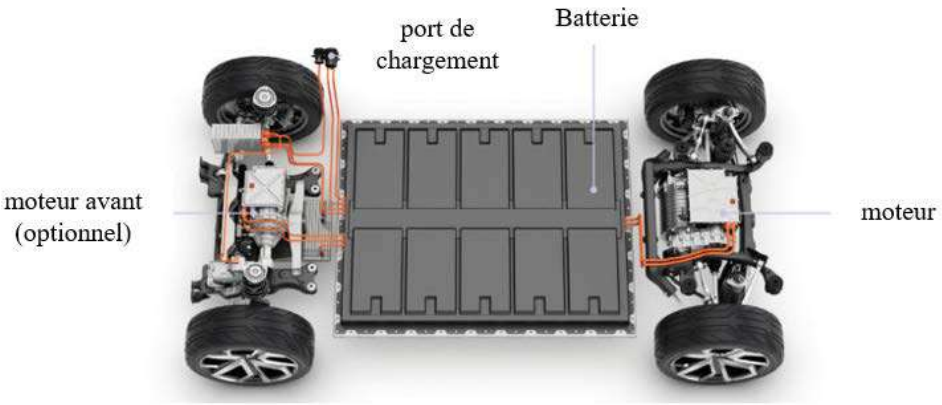

Figure 1-4: Véhicule électrique à batterie [39]

Le logement du moteur dans la roue augmente le poids non suspendu de la roue, ce qui présente un effet néfaste sur la tenue de route du véhicule [18]. La question de savoir si les véhicules électriques à batterie auront de bonnes ventes à l'avenir dépendra du développement de nouvelles batteries. En fait, les véhicules électriques doivent avoir une distance de conduite plus longue entre deux charges et doivent pouvoir maintenir la vitesse sur autoroute sur une longue distance. Bien que le BEV n'ait pas été accepté dans le passé, de nombreuses leçons peuvent être

tirées en construisant BEV. Les constructeurs peuvent utiliser ces leçons pour fabriquer à nouveau des BEV et utiliser la même technologie pour fabriquer des véhicules électriques hybrides et électriques à pile à combustible.

1.4.4. Véhicules à pile à combustible

Les véhicules à pile à combustible (VPàC) sont des [40,41] véhicules utilisant l'énergie électrique comme seules sources pour déplacer [1,16,42]. La PàC est l'un des principaux fournisseurs d'énergie ou des fournisseurs d'énergie secondaire selon les besoins et la technologie actuelle. La boîte de vitesses et l'embrayage restent toujours dans le véhicule [43]. Par conséquent, l'efficacité est faible en raison des pertes plus élevées sous forme de chauffage par un courant élevé dans les enroulements du moteur. Néanmoins, cette configuration a le train d'entraînement mécanique le plus bas ce qui réduit les pertes de transfert d'énergie entre mécanique et électrique.[44,45]

Parmi les différentes technologies de PàC, la pile à combustible à membrane échangeuse de protons (PàCMEP) est intéressante. Le PàCMEP peut fournir une densité de puissance élevée de 250 à $1\,000\ W/kg$ grâce au démarrage rapide [46,47]. Cependant, la réponse dynamique des systèmes d'alimentation à PàC purs est faible, de sorte qu'ils ne peuvent pas gérer de manière adéquate les pics de puissance au démarrage et à l'accélération, et ils ne peuvent pas récupérer l'énergie générée lors du freinage.[48]

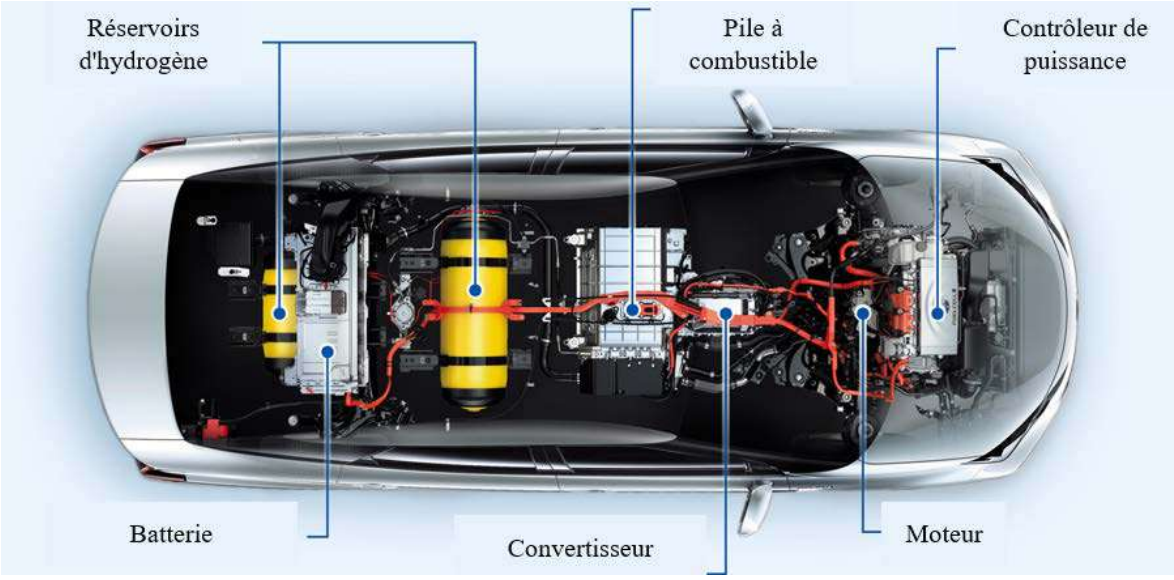

Figure 1-5: Véhicule électrique à pile à combustible [43]

La Prius de première génération a atteint une puissance nominale du moteur de 33 kW, la Prius de troisième génération a atteint une puissance nominale de 60 kW et les 10 kW de l'Insight ont atteint une puissance nominale [49]. Le Toyota Hybride a intégré deux ME et deux

onduleurs avec une alimentation séparée. La configuration de Honda est simple, mais il existe des limites en termes de flux de puissance et d'optimisation du système. Dans le même temps, la conception de Toyota est plus compliquée car elle peut être alimentée par une batterie séparée, une essence distincte ou une combinaison de batterie et d'essence [50]. Puisque l'embrayage n'est pas utilisé [51], cette conception peut fournir une boîte de vitesses à variation continue et un espace moteur plus grand [51]. Cependant, plus de 25 pour cent des plaintes contre Prius [52].

C'est un domaine qui doit être abordé avant de nombreux obstacles doivent être surmontés avant que les VPàC ne deviennent une option vraiment viable pour le transport personnel. Ceux-ci inclus :

- Stockage - L'hydrogène étant un gaz, il en faut un grand volume pour parcourir la même distance qu'un réservoir d'essence.
- Poids et taille - Les piles à combustible actuelles sont assez grandes et lourdes ; les deux doivent être réduits pour rendre les VPàC plus pratiques.
- Coût — Le coût d'une pile à combustible est élevé et doit également être réduit.
- Temps de démarrage - Les piles à combustible fonctionnent mieux à une température modérée fixe.
- Les VPàC doivent avoir des systèmes qui permettent des réactions rapides aux variations des températures et des conditions de fonctionnement.
- Sources d'hydrogène - Parce que les piles à combustible dépendent de la fourniture d'hydrogène et / ou des reformeurs en fonctionnement propre.

La plupart des constructeurs automobiles recherchent activement des technologies de transport à pile à combustible et testent des prototypes de véhicules de tourisme. De nombreuses villes testent des autobus de transport en commun alimentés par des piles à combustible. Les progrès réalisés par la technologie des véhicules hybrides profiteront au développement des véhicules à pile à combustible.

1.4.4.1. Etudes et recherches de véhicules à pile à combustible

Ces dernières années, de nombreuses recherches sur le FC / ESS ont été menées : dans [53], l'auteur a comparé 575 articles publiés de 1998 à 2014 dans le domaine de la gestion de l'énergie des véhicules électriques hybrides. Dans [54], l'auteur passe en revue les défis de l'intégration et de l'optimisation des systèmes d'énergie hybride renouvelable, en se concentrant sur les systèmes qui déploient l'énergie hydrogène. Dans [55], ils se sont concentrés sur les différentes contraintes générées et leur impact sur les différents composants de la pile à combustible. Dans [56], l'auteur

a étudié le concept d'un nouveau bloc moteur avec un système bois-énergie sur la pile à combustible. Afin de réduire la consommation de carburant en étudiant différentes stratégies de gestion de l'énergie et différents tests, y compris l'authenticité des algorithmes génétiques, pour minimiser la consommation d'énergie ; dans [57], l'algorithme de gestion et de contrôle de la tension du bus CC basé sur le contrôle du mode linéaire développé des contrôles pour le système hybride FC / SC. La gestion énergétique proposée permet au système d'exploitation d'adopter trois modes selon le profil de charge et l'état de charge. Dans [58], l'auteur a étudié le problème d'optimisation énergétique d'un système de stockage d'énergie hybride composé de piles à combustible (comme principale source d'énergie) et de super condensateurs (comme source d'énergie auxiliaire). La recherche comprend deux parties différentes : la phase de contrôle et le système de gestion de l'énergie. [59] a développé une combinaison de stratégie de thermostat génétique optimisée et de méthode d'identification des conditions dans des conditions de conduite spécifiques, qui peuvent automatiquement passer à la stratégie de gestion optimale de l'énergie dans des conditions correspondantes. [60] La structure des véhicules à pile à combustible a été conçue et ils ont présenté de nouvelles propositions pour améliorer les performances dynamiques du véhicule tout en répondant aux exigences du véhicule et en prolongeant sa durée de vie. Dans [61], l'auteur a utilisé un capteur commandé par ordinateur en ligne pour simuler la réponse FC réelle [62]. Une stratégie de gestion de l'énergie entre piles à combustible et supercondensateurs a été formulée, et la stratégie a été comparée à trois autres méthodes de gestion de l'énergie. La stratégie est basée sur l'analyse de l'état de charge $SOC \geq 60\%$ et MATLAB / Simulink est utilisé. Dans [17], l'auteur a étudié le système pile à combustible / batterie en se basant sur son modèle, a proposé une stratégie de gestion de l'énergie basée sur la demande de puissance et l'état de charge, et a utilisé MATLAB / Simulink pour étudier son effet SOC initial. Abderrezak Badji et al l'ont proposé une stratégie de contrôle basée sur la division de puissance dans la littérature. Dans [63], l'auteur a proposé un système d'alimentation hybride pour les avions légers. L'auteur de cette étude a effectué certaines analyses, y compris l'énergie requise, la consommation d'hydrogène, la consommation d'énergie, etc.

1.4.4.2. Prix des véhicules à pile à combustible

Il existe de nombreuses options de voitures propres sur le marché, mais un véhicule à pile à combustible à hydrogène est l'un des plus rares et des uniques. Tout comme un véhicule électrique, une voiture à hydrogène est propre. Cependant, le problème est que seules quelques

personnes peuvent les acheter. Si vous vivez en Californie, vous pouvez choisir entre trois options de voitures à hydrogène. Voici un aperçu de leur coût.

Bien que Honda ait décidé de mettre fin à la Clarity Fuel Cell, elle reste une bonne option pour les Californiens. Cependant, de nombreux conducteurs intéressés par la pile à combustible Clarity ne pourront probablement jamais en posséder une. Honda n'a proposé la voiture qu'à la location. Les prix de location varient, mais actuellement, la pile à combustible Clarity peut être louée pour environ 379 $ par mois. Comme il n'est disponible qu'en location, les conducteurs ne pourront pas profiter des crédits d'impôt fédéraux.

Comme la Clarity Fuel Cell était techniquement un véhicule électrique, elle était équipée d'un moteur électrique pouvant générer jusqu'à 212 ch et 99 lb-pi de couple. Cela lui a permis d'accélérer de 0 à 60 mph en 8,1 secondes, ce qui n'est pas rapide, mais c'est plus rapide que ses pairs.

En termes d'économie de carburant et d'autonomie, la Clarity Fuel Cell a atteint 68 mpge et pouvait parcourir environ 366 miles avec un réservoir plein d'hydrogène. Comme les autres Honda, la Clarity Fuel Cell était également équipée d'une tonne de fonctionnalités standard intelligentes.

En ce qui concerne les voitures à hydrogène, Nexo est un nouveau venu. Il est arrivé en Californie en 2018. Cette Hyundai n'est pas bon marché avec un prix de départ d'environ 58 000 $. Cependant, les propriétaires peuvent profiter des crédits d'impôt fédéraux puisque Hyundai vend le Nexo. En plus de cela, le Nexo est un SUV, ce qui signifie que, bien que le Hyundai soit assez cher pour un SUV de sa taille, il offrira plus d'espace que les autres voitures à hydrogène.

Comme les autres voitures à hydrogène, la Nexo ne sera pas puissante, car son moteur électrique ne développe qu'environ 174 ch. Il faudra 8,4 secondes au Nexo pour accélérer de 0 à 60 mph. Cela dit, le Nexo a une autonomie allant jusqu'à 380 miles et obtient environ 61 mpge combinés. Une autre bonne chose à propos du Nexo est son intérieur, qui est livré avec un écran tactile de 12,3 pouces et de nombreuses fonctionnalités standard. Le design de la cabine est également agréable et futuriste.

La dernière option hydrogène disponible est la Mirai. Comme la Clarity Fuel Cell, la Mirai est une berline, mais beaucoup moins chère que la Nexo avec la Mirai à partir d'environ 50 000 $. Comme les autres voitures à hydrogène, la Mirai n'est actuellement vendue qu'en Californie. Et tout comme le Nexo, les clients peuvent profiter des crédits d'impôt fédéraux pour les véhicules électriques lorsqu'ils achètent le Mirai.

La Mirai n'est pas très rapide avec son moteur électrique ne développant qu'environ 182 ch et prenant environ 9,1 secondes pour accélérer de 0 à 60 mph. Cependant, il est très économe en carburant avec 67 mpge et une autonomie d'environ 402 miles avec un réservoir plein d'hydrogène. Il aura également quelques fonctionnalités intéressantes comme un écran tactile de 12,3 pouces et un tas de systèmes de sécurité intelligents, y compris un régulateur de vitesse adaptatif.

1.5. Architecture d'un véhicule à pile à combustible

dans le futur système de transport, [64,65]. Par conséquent, Toyota, Honda et Hyundai produisent et vendent des VPàC depuis plusieurs années [66]. Les piles à combustible, en particulier les PàC à membrane électrolyte polymère (PàCMEP), ont des fonctions propres, une température de fonctionnement basse, une petite taille et un rendement élevé, ce qui en fait un excellent choix pour les véhicules [15,20,57,67–72]. Cependant, la dynamique du PàCMEP est relativement lente, principalement en raison de la dynamique du compresseur d'air et de la dynamique de remplissage du collecteur [65]. De plus, la réponse en puissance des piles à combustible est très lente [73], le démarrage / arrêt, l'accélération / la décélération dans les applications automobiles conduira à une quantité insuffisante de carburant et à un séchage et à l'humidité à l'intérieur de la batterie pour entraîner une dégradation des performances des PàC [74–76]. Au contraire, les supercondensateurs (SC) ont une puissance spécifique plus élevée et une durée de vie plus longue, mais ont une énergie spécifique plus faible [77–79]. Par conséquent, la combinaison de FC et SC rend le système très efficace et il est possible de restaurer l'énergie cinétique pendant le freinage vers le système de stockage d'énergie (SSE).

1.6. Hydrogène

l'hydrogène est le support du système énergétique, est considéré comme le carburant du PàC est considéré comme l'une des sources d'énergie propres [80,81]. L'hydrogène peut provenir de différentes ressources renouvelables et non renouvelables, telles que l'électrolyse, le reformage de la biomasse et le reformage des combustibles fossiles.

1.6.1. Hydrogène dans l'Algérie

l'Algérie dispose de bonnes conditions pour produire de l'énergie solaire [6,9,10], Selon [11], l'Algérie peut produire une grande quantité d'hydrogène à partir de l'Est-Oust lu chaque année; dans [8], l'actuelle station de production d'hydrogène de l'auteur utilise l'électricité produite par des tours solaires et applique des simulations à différents endroits en Algérie. Une autre étude menée dans la région d'Adrar a déterminé l'emplacement le plus approprié pour les stations de

ravitaillement en hydrogène éolien, et les résultats ont montré que presque toutes les terres de la province d'Adrar sont prometteuses pour la production d'hydrogène éolien [12].

1.6.2. Production d'hydrogène

L'hydrogène se trouve dans de nombreux composés naturels, ce qui le rend abondant dans la nature. Lorsqu'il est à l'état gazeux, il est plus léger que l'air. S'il est rejeté dans l'environnement, il monte dans l'air et se disperse sans effets toxiques [82,83],

L'hydrogène peut être fourni par des hydrocarbures et du méthanol et du propane dans le processus de reformage. Le gaz peut également être extrait du processus d'électrolyse en utilisant un électrolyseur, qui décompose les liaisons chimiques de l'eau en hydrogène et oxygène, puis recueille l'hydrogène dans un réservoir de gaz [84].

La principale méthode typique pour obtenir de l'hydrogène pur est de le séparer du méthane (CH_4) par reformage à la vapeur. Une autre méthode bien connue de production d'hydrogène est l'électrolyse de l'eau (H_2O). Il existe d'autres types de méthodes de production d'hydrogène qui peuvent utiliser des énergies renouvelables [85]

L'hydrogène peut être fourni directement sous la forme d'hydrogène pur ou par l'intermédiaire d'un « reformeur de carburant » qui extrait l'hydrogène de carburants hydrocarbonés tels que le méthanol, le gaz naturel ou l'essence

1.6.3. Utilisation d'hydrogène

Raffinage du pétrole et du gaz, industrie pétrochimique, métallurgie, fabrication de semi-conducteurs, raffinage du verre, aérospatiale, production d'engrais, soudage, médecine et autres domaines de l'ingénierie de la réfrigération ; Ce sont des domaines commerciaux qui utilisent l'hydrogène.

1.6.4. Hydrogène pour les véhicules

Le véhicule à hydrogène est le véhicule qui utilise l'hydrogène comme énergie embarquée pour alimenter le véhicule. L'énergie chimique (hydrogène gazeux) se convertira en énergie mécanique soit en brûlant de l'hydrogène dans un MCI, soit en faisant réagir l'hydrogène avec de l'oxygène dans un PàC pour produire de l'électricité. L'hydrogène contient une énergie abondante par unité de poids mais comporte peu d'énergie par unité de volume, ce qui est un inconvénient majeur pour le transport.

La mise en œuvre de sources d'énergie renouvelables, telles que les PàC, peut entraîner des problèmes d'efficacité, de coût et de limitation. L'efficacité dépend de la configuration du système, de la conception et du choix des composants. De plus, le coût du système dépend

largement de son efficacité [86]. D'autres contraintes doivent également être prises en compte, comme la relation entre la vitesse du véhicule et la puissance nécessaire pour atteindre une certaine vitesse. C'est pourquoi l'idée des véhicules électriques hybrides à pile à combustible a émergé.

1.6.5. Problème de stockage d'hydrogène

Que stocker une quantité d'énergie équivalente avec un réservoir d'essence typique, nécessiterait environ 800 fois le volume d'hydrogène à température et pression ambiantes.

Aujourd'hui, la technologie de stockage de l'hydrogène consiste à la compression (7000 fois la pression atmosphérique), ou sur le système cryogénique (liquéfaction de l'hydrogène à -253 C), [87][88].

1.7. Pile à combustibles

Les piles à combustible (PàC) sont des dispositifs électrochimiques convertie l'énergie chimique en énergie électrique, lorsqu'une réaction électrochimique se produit sur les deux électrodes de la pile à combustible, le carburant du côté anode est oxydé pour libérer des électrons, ces électrons sont transférés au côté cathode par un circuit externe, ce flux d'électrons génère un courant continué dans le circuit.

L'intérêt pour les PàC est augmenté en raison de le nombreuses conséquences négatives de l'utilisation de combustibles fossiles, par contre la pile à combustible produit une énergie propre et en capacité répondre à tous les besoins mondiaux en énergie, avec zéro émission de gaz à effet de serre, et avec un rendement élevé [89–92]

1.7.1. Historique de pile à combustible

La PAC a été découverte il y a plus de 200 ans : la première fois en 1802 Sir Henry David énoncée La possibilité de produire de l'électricité à partir de la réaction chimique entre l'hydrogène et l'oxygène.

En 1839, Sir William Grove, un juriste anglais et chercheur amateur en chimie, décrit une expérience où de l'eau et de l'électricité sont produites à partir d'oxygène et d'hydrogène.

En 1932, le Dr Francis Bacon a relancé les recherches initiées par W. Grove, et en 1959 a produit avec succès une PàC de 5 kW [93].

En 1964 La PàC a connu son évolution grâce à la NASA qui cherchait un moyen de produire de l'électricité à bord de ses engins spatiaux.

Les travaux de General Electric sur les PàC se sont poursuivis jusqu'aux années 1970 et ont conçu la technologie d'électrolyse de l'eau à membrane d'échange des ions, qui a conduit au

développement de l'usine d'oxygène de l'US Navy. La Royal Navy a utilisé des PàCMEP dans les sous-marins au début des années 1980. Au cours des dix dernières années, les PàCMEP ont fait l'objet de recherches approfondies et ont fait des progrès considérables, en particulier dans l'industrie du transport.

L'intérêt pour l'utilisation des PàC dans le domaine des transports remonte à 1973, lorsque le premier choc pétrolier a poussé les gouvernements, les industries et les laboratoires à rechercher des alternatives aux combustibles fossiles pour assurer leur indépendance et leur vitalité. De nombreux efforts et moyens ont été fournis pour réduire le coût de fabrication des systèmes de PàC, augmenter leur fiabilité et améliorer leur compacité.

Depuis les années 1990, les PàC et l'hydrogène sont considérées comme des candidats possibles à la production d'énergie durable et propre, que ce soit pour des applications mobiles ou stationnaires.

En 1993, Ballard et le constructeur automobile Daimler-Benz ont coopéré pour produire un bus à PAC

1.7.2. Type de pile à combustible

Différentes familles de PàC ont été développées. Il existe sept types de PàC sur le marché : les piles à combustible à membrane échangeuse de protons(PàCMEP), les piles à combustible au méthanol direct (PàCMD), les piles à combustible alcalines (PàCA), les piles à combustible à acide phosphorique (PàCAPh), les piles à combustible au carbonate fondu (PàCCF), les piles à combustible à oxyde solide (PàCOS) et les piles à combustible microbiennes (PàCM) [94–96].

Les piles à combustible à basse température sont plus adaptées aux applications portables (domaine des transports : voitures, bus, etc. domaine de l'électronique portable, ordinateur, téléphone portable, etc.). D'autre part, les PàC à haute température sont généralement destinées pour des applications stationnaires et sont liées à la production décentralisée d'énergie électrique (habitations collectives ou individuelles, etc.).

1.7.3. Piles à combustible à membrane échangeuse de protons

La première pile à combustible à membrane échangeuse de protons a été développé dans les années 1960 pour répondre aux besoins du programme spatial habité américain, ce type de pile à combustible peuvent fournir une densité de puissance élevée tout en étant légers, peu coûteux et de petite taille. Il se compose d'une électrode chargée négativement (anode), d'une électrode chargée positivement (cathode) et d'une membrane électrolytique [97].

L'hydrogène est oxydé sur l'anode et la réduction de l'oxygène se produit sur la cathode. Ensuite, les protons se déplacent de l'anode à la cathode à travers la membrane électrolytique et les électrons sont transportés à travers un circuit de charge externe. L'oxygène réagit avec les protons et les électrons de la cathode pour former de l'eau et générer de la chaleur [98].

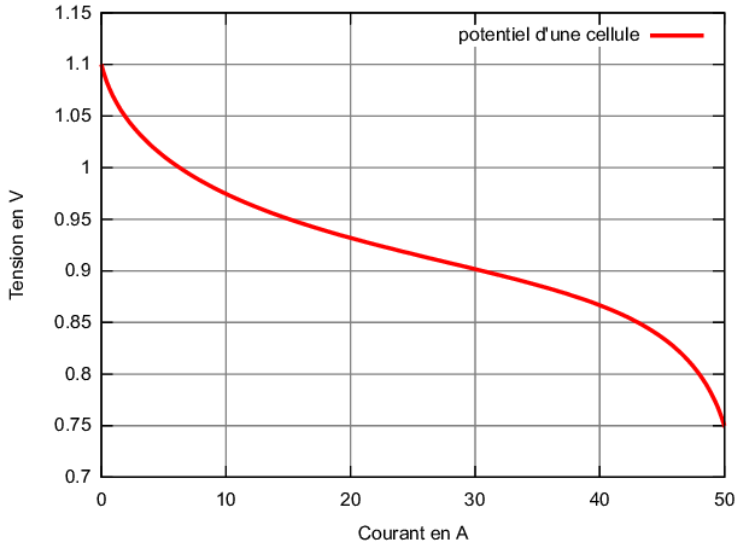

Figure 1-6: Caractéristique statique d'une PàC

Le PàCMEP présente certains avantages évidents pour l'application des véhicules électriques talque,

- La PàCMEP répond le mieux à les contraintes de véhicule qui requiert une puissance de quelques kilowatts à une centaine de kilowatts. En outre, le groupe motopropulseur doit avoir une masse et un encombrement acceptable.
- La PàCMEP a une température de fonctionnement comprise entre 60°C et 100°C qui représente la meilleure adaptation pour l'usage dans le domaine automobile.
- La composition d'éléments à structure solides de la PàCMEP (spécialement la membrane en polymère) garantit une certaine résistance mécanique vis à vis des contraintes liées à l'environnement automobile.

1.7.4. Principe de fonctionnement de pile à combustible

Lorsque l'hydrogène entre dans la PàC, les atomes d'hydrogène libèrent des électrons à l'anode et deviennent des ions hydrogène dans l'électrolyte. Les électrons libérés à l'anode se déplacent vers la cathode via un circuit externe. Lorsque les électrons se déplacent vers la cathode, ils peuvent être transférés et utilisés pour entraîner le moteur électrique (ME) pour conduire le véhicule. Lorsque les ions hydrogène se combinent avec des molécules d'oxygène à

la cathode, l'eau et la chaleur produire ou produire des gaz à effet de serre, seule l'eau est rejetée par le tuyau d'échappement de la PàC.

La réaction chimique dans ce type de PàC est une oxydoréduction électrochimique. Elle fait réagir l'hydrogène et l'oxygène pour produire de l'électricité, de l'eau et de la chaleur, selon la réaction chimique globale suivante :

$$2\,H_2 + O_2 \rightarrow 2\,H_2O + électricité + chaleur \qquad (1\text{-}1)$$

Cette réaction s'opère au sein d'une structure essentiellement composée de deux électrodes (l'anode et la cathode) qui seront les conducteurs électroniques, séparées par un électrolyte solide qui sera le conducteur protonique. Plus précisément, les réactions suivantes interviennent aux deux électrodes :

A l'anode :

$$2\,H_2 \rightarrow 4\,H^+ + 4\,e^- \qquad (1\text{-}2)$$

A la cathode :

$$O_2 + 4\,H^+ + 4\,e^- \rightarrow 4\,H_2O \qquad (1\text{-}3)$$

L'électricité est produite par les 2 électrons libérés par la molécule d'hydrogène. Les protons d'hydrogène H^+ traversent la membrane séparant l'anode de la cathode et se recombinent 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. La Figure 1-7 résume le principe de fonctionnement de PàCMEP.

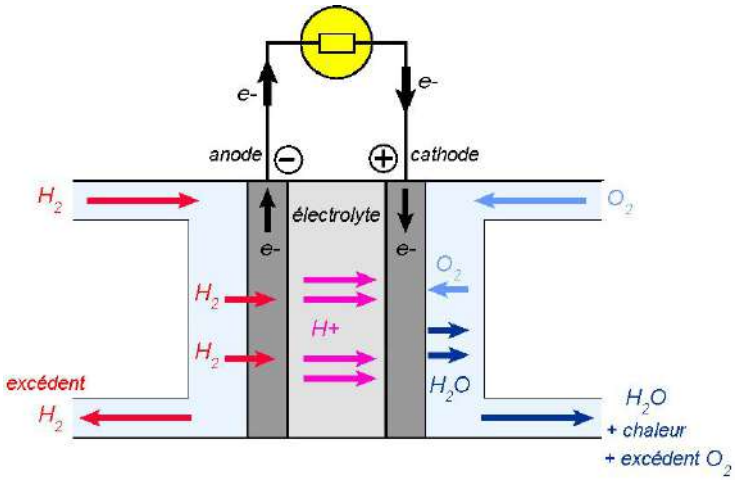

Figure 1-7 : Schéma de principe de la pile à combustible PEM

1.8. Super condensateur

Le super condensateur (SC) a une structure similaire avec un condensateur normal, mais la différence est que l'SC a une capacité élevée (capacité énergétique élevée avec un facteur de 20 fois) que le condensateur. La caractéristique de SC comprend un fonctionnement sans entretien, une durée de vie plus longue et une insensibilité aux variations de température de l'environnement [99,100].

1.8.1. Condensateurs

Les condensateurs sont des dispositifs dans lesquels deux plaques conductrices sont séparées par un isolant. Une tension continue est connectée aux bornes du condensateur, une plaque étant positive et l'autre négative. Les charges opposées sur les plaques attirent et stockent donc de l'énergie.

Les condensateurs peuvent fournir un grand stockage d'énergie, bien qu'ils soient plus normalement utilisés dans de petites tailles comme composants dans les circuits électroniques. Les grands condensateurs de stockage d'énergie avec de grandes surfaces de plaque sont désormais appelés SC.

1.8.2. Super condensateur

Les super condensateurs (SC) ont une puissance spécifique relativement élevée et une énergie spécifique relativement faible. Ils peuvent être utilisés comme stockage d'énergie pour le freinage par récupération. Bien qu'ils puissent être utilisés seuls sur un véhicule, ils seraient mieux utilisés dans un hybride comme dispositifs pour donner et recevoir de l'énergie rapidement pendant le freinage et l'accélération par la suite, par ex. aux feux de circulation. Les SC sont intrinsèquement plus sûrs que les volants d'inertie car ils évitent les problèmes de panne mécanique et les effets gyroscopiques. L'électronique de puissance est nécessaire pour augmenter et diminuer les tensions selon les besoins. Plusieurs véhicules intéressants ont été construits avec des SC fournissant un stockage d'énergie important.

1.8.3. Type de super condensateur

Actuellement, il existe trois types de technologies SC utilisées dans les VE, à savoir les condensateurs électriques à double couche (EDLC) - carbone / carbone, les pseudo-condensateurs et les condensateurs hybrides. La différence entre ces SC réside dans leurs mécanismes de stockage d'énergie et leurs matériaux d'électrode utilisés. La densité de puissance spécifique pour ces trois types SC est presque similaire autour de 1000–2000 kW / kg pour une impulsion efficace à 95% mais l'EDLC a une densité de puissance plus élevée que les autres

types de SC. La densité d'énergie spécifique de l'EDLC est la plus faible (5–7 Wh / kg). Cependant, les deux autres ont une densité énergétique presque similaire (10–15 Wh / kg). La durée de vie de SC peut atteindre 40 ans, ce qui est la plus longue de tous les SSE.

En raison du fonctionnement fréquemment arrêté / arrêt des VE et des VH, les courbes de décharge et de charge du dispositif de stockage d'énergie varient considérablement. La puissance moyenne requise pour le stockage de l'énergie est bien inférieure à la puissance de pointe de relativement courte durée requise pour l'accélération et la montée. Le rapport entre la puissance de crête et la puissance moyenne peut dépasser 10 : 1. En fait, l'énergie impliquée dans les transitoires d'accélération et de décélération représente environ les deux tiers de l'énergie totale de la panne totale du véhicule. Dans la conception HEV, la capacité de puissance de crête du stockage d'énergie est plus importante que sa capacité de stockage d'énergie, et limite généralement sa réduction de taille. Basée sur la technologie actuelle des batteries, la conception des batteries doit être un compromis entre l'énergie spécifique, la puissance spécifique et la durée de vie du cycle.

Dans le même temps, la difficulté d'obtenir des valeurs élevées d'énergie spécifique, de puissance spécifique et de durée de vie élevée a conduit à certaines suggestions selon lesquelles le système de stockage d'énergie des véhicules électriques et des véhicules hybrides devrait être un mélange d'énergie et de puissance. Les sources d'énergie, principalement les batteries et les piles à combustible, ont une énergie spécifique plus élevée, tandis que les sources d'énergie ont une puissance spécifique plus élevée. Lors d'une conduite moins exigeante ou d'un freinage par récupération, la source d'alimentation peut être chargée à partir de la source d'énergie. La source d'alimentation qui a fait l'objet d'une large attention est le super condensateur.

1.8.4. Principes de base des super condensateurs

La technologie des condensateurs à double couche est la principale méthode pour réaliser le concept de SC. Lorsque deux tiges de carbone sont immergées dans une solution d'acide sulfurique diluée, séparées l'une de l'autre et chargées avec une tension de zéro à 1,5 V, il n'y a presque pas de réaction jusqu'à 1 V ; puis à une tension légèrement supérieure à 1,2 V, les deux électrodes Une petite bulle apparaîtra à la surface [101]. Des bulles avec une tension supérieure à 1 V indiquent que l'eau sera électrolytique. En dessous de la tension de décomposition, bien que le courant ne circule pas, une "double couche électrique" apparaît à la frontière entre l'électrode et l'électrolyte. Les électrons sont chargés sur la double couche et utilisés dans le condensateur [102].

La double couche électrique ne sert d'isolant qu'en dessous de la tension de décomposition. L'énergie stockée $Ecap$ est exprimée en :

$$E_{cap} = \frac{1}{2} C V^2 \quad (1\text{-}4)$$

Où C est la capacité de Faraday et V est le volt de la tension disponible. Cette équation montre qu'une tension nominale supérieure V est idéale pour un condensateur de densité d'énergie plus grand. Jusqu'à présent, la tension nominale des condensateurs et de l'électrolyte à eau est d'environ $0{,}9\ V$ par cellule et la tension nominale des batteries à électrolyte non aqueux est de $2{,}3$ à $3{,}3\ V$ [103].

1.8.5. Technologies des super condensateurs

Selon l'objectif du Département américain de l'énergie d'inclure les supercondensateurs dans les véhicules électriques et les véhicules hybrides, l'énergie spécifique à court terme et la puissance spécifique devraient être supérieures à $5\ Wh/kg$ et $500\ W/kg$, respectivement, et la valeur de performance avancée devrait dépasser $15\ Wh/kg$ et $1600\ W/kg$. Jusqu'à présent, aucun supercondensateur disponible ne peut pleinement atteindre ces objectifs. Néanmoins, certaines entreprises sont toujours activement engagées dans la recherche et le développement de supercondensateurs pour les applications VE et VEH.

1.9. Convertisseurs utilisés dans les véhicules à pile à combustible

Après examen des configurations générales de l'EV et du HEV, on peut voir qu'il existe deux unités électroniques de puissance majeures

- Convertisseur CC-CC ;
- Onduleur CC-CA.

Les moteurs à courant alternatif sont généralement utilisés dans les VEH ou les VE pour la traction et ils sont alimentés par un onduleur et cet onduleur est alimenté par un convertisseur CC-CC.

1.9.1. Convertisseurs CC-CC

Un convertisseur CC-CC est un circuit électronique ou un dispositif électromécanique qui convertit une source de courant continu (CC) d'un niveau de tension à un autre. C'est un type de convertisseur d'énergie électrique. Les niveaux de puissance vont de très faibles (petites batteries) à très élevés (transmission de puissance à haute tension).

1.9.2. Classification des convertisseurs

Les convertisseurs CC-CC les plus couramment utilisés dans un VEH ou un VE sont :

1.9.2.1. Convertisseurs unidirectionnels

Ils s'adaptent à diverses charges embarquées telles que les capteurs, les commandes, les équipements de divertissement, les services publics et les équipements de sécurité.

1.9.2.2. Convertisseurs bidirectionnels

Ils sont utilisés dans les endroits où la charge de la batterie et le freinage régénératif sont requis. Le flux de puissance dans un convertisseur bidirectionnel va généralement d'une extrémité basse tension telle qu'une batterie ou un supercondensateur à un côté haute tension et est appelé opération de suralimentation. Pendant le freinage par récupération, la puissance revient vers le bus basse tension pour recharger les batteries, ce que l'on appelle le fonctionnement en mode abaisseur.

Il est préférable d'isoler les convertisseurs CC-CC unidirectionnels et bidirectionnels pour assurer la sécurité des dispositifs de chargement.

1.9.3. Convertisseurs CC-CA

La principale source d'énergie électrique du VE est la pile à combustible qui est une source de courant continu. La sortie CC de la pile à combustible est dédoublée ou bosselée selon les besoins, puis convertie en CA à l'aide d'un onduleur CC-CA. La fonction d'un onduleur est de changer une tension d'entrée continue en une tension de sortie alternative symétrique de l'amplitude et de la fréquence souhaitées. Les formes d'onde de tension de sortie des onduleurs idéaux doivent être sinusoïdales. Cependant, les formes d'onde des onduleurs pratiques ne sont pas sinusoïdales et contiennent certaines harmoniques.

1.10. Conclusion

Les problèmes mondiaux liés à l'énergie fossile et ses effets négatifs sur la santé des organismes vivants et la sécurité de la planète, en plus du manque de précautions internationales. Cela a incité les chercheurs à rechercher des alternatives énergétiques à utiliser comme carburant pour véhicules. L'hydrogène est une alternative puissante aux carburants fossiles qui peuvent être utilisés dans les véhicules électriques en fonction de la PàC, son utilisation est sûre et sans émission de gaz à effet de serre.

L'utilisation de VPàC en Algérie est la bonne solution pour remplacer les véhicules conventionnels, en raison du grand potentiel que l'Algérie possède dans la production d'hydrogène de manière propre et durable. Mais à couse de la réponse dynamique lente de la PàC

doit être soutenue par un SC afin de couvrir l'évolution rapide de la demande d'énergie de la part du véhicule, de sorte que les SEG sont très importantes pour le bon fonctionnement des véhicules à PàC.

Chapitre 2. Conception et dimensionnement de véhicules électriques à pile à combustible

2.1. Introduction

Le conducteur du véhicule agit sur la pédale d'accélérateur et de frein pour que le véhicule démarre du point A et se dirige vers le point B. Les consignes qu'il met inconsciemment telles que la vitesse, le couple, la puissance, etc. sont un élément essentiel dans toute étude qui traite principalement des véhicules, que ce soit leur consommation, leur émission de carbone qui produit, et a pris la décision de choisir les lois de distribution d'énergie à intégrer dans le processus de gestion de l'énergie en ligne.

Ces consignes dépendent principalement de l'environnement dans lequel vous évoluez (autoroute, route de montagne, embouteillage, etc.), et la question se pose que les cours de conduite actuels soient vraiment capables de donner des résultats précis dans les études liées à l'Algérie ou non, pour cela dans ce chapitre, un cycle de conduite développé dans la ville de Ouargla basé sur des données de trajets réels sur les routes de la ville sera présenté. Utilisez-les ensuite pour évaluer les performances des piles à combustible/supercondensateurs et pour améliorer la conception d'un véhicule électrique à pile à combustible.

2.2. Caractérisation de cycle de conduite

Le développement d'un cycle de conduite adapté qui dépend du type de route et des préférences de conduite du public est également important [104]; Mais jusqu'à présent, l'Algérie n'a pas eu un cycle de conduite bien développé, malgré la volonté politique et sociale de passer à des véhicules à énergie propre pour remplacer les véhicules traditionnels à moteur à combustion interne qui consomment beaucoup de carburant et produisent beaucoup d’émissions de dioxyde de carbone. Par conséquent, il est essentiel de créer un cycle de conduite spécifique à l'Algérie et de mettre en œuvre des algorithmes de dimensionnement et des stratégies de gestion de l'énergie appropriés pour concevoir de manière optimale ce nouveau véhicule propre et éviter le surdimensionnement et les coûts associés.

2.2.1. Définition de cycle de conduite

Le cycle de conduite est la série de points représentant la vitesse d'un véhicule en fonction du temps. Celles-ci sont établies par divers pays ou organisations pour accéder aux performances du véhicule (efficacité du véhicule et consommation de carburant) et certaines sont publiées comme référence à des fins industrielles et de recherche. Les cycles de conduite peuvent être créés soit théoriquement, soit sur la base de tests de conduite pratiques. En général, il y a trois pays générant des cycles de conduite qui sont l'Europe (NEDC, ECE15), les États-Unis (FTP, SC03SFTP, UDDS, US06 et LA92) et le Japon (mode 10-15).

2.2.2. Types de cycle de conduite

Il existe deux types de cycles de conduite. L'un est le cycle de conduite transitoire. Cela implique de nombreux changements de vitesse et est basé sur des conditions de conduite sur route typiques. Par exemple, les cycles de conduite UDDS (American Urban Dynamometer Driving Schedule) et FTP (Federal Test Procedure) appartiennent à ce type.

Le deuxième type est celui des cycles de conduite modale. Il s'agit de périodes prolongées à vitesse constante. Par exemple, le nouveau cycle de conduite européen (NEDC) et les cycles japonais 10-15 Mode et JC08 sont de ce type [105].

Le cycle de conduite standardise le modèle de conduite d'entrée pour l'optimisation et la simulation du véhicule, bien que les cycles de conduite réels soient souvent plus complexes.

Actuellement, une nouvelle technologie peut reconnaître le cycle de conduite passé du véhicule, appelé reconnaissance de cycle de conduite (DCR). Le DCR utilise les informations de conduite passées et les cycles de conduite existants qui sont stockés dans la bibliothèque pour prédire le futur paramètre de conduite pour l'optimisation et le développement de la stratégie de contrôle.

2.2.3. Importance du cycle de conduite

La première étape vers la conception du groupe motopropulseur consiste à déterminer les puissances nominales du moteur utilisé dans la transmission VE et VPàC consiste à déterminer les spécifications du moteur. Ces spécifications sont déterminées en utilisant le cycle de conduite sur lequel le véhicule fonctionne et l'équation dynamique du véhicule pour le calcul de la force de traction. Les contraintes de conception imposées à la transmission, telles que le temps d'accélération initial, la valeur de la croisière à la vitesse nominale du véhicule et la valeur de la croisière à la vitesse maximale du véhicule, affectent la spécification du moteur à induction. Enfin, la force de traction nécessaire pour propulser le véhicule jusqu'au cycle de conduite choisi donne les spécifications nécessaires du moteur utilisé dans la transmission.

2.2.4. Exemple de cycle de conduite

Plusieurs cycles de conduite ont été développés dans différents pays pour refléter les conditions de conduite. Aux États-Unis, les pays européens et le Japon ont établi le cycle le plus important. La popularité et l'utilisation généralisée de ces cycles de conduite offre la possibilité de comparer les résultats entre différents systèmes hybrides PàC / SC. Cependant, il ne représente pas toujours les conditions de conduite réelles de toutes les études de cas. Ainsi, dans ce travail, le cycle de conduite standard a été remplacé par le cycle de conduite proprement dit,

qui a été établi à travers une expérience menée dans la base algérienne de Ouargla, dans le but d'obtenir l'état réel. Converti en véhicule du pays

l'auteur dans [106] a montré qu'en raison des différences de caractéristiques sociales, économiques et géographiques, la situation réelle en Chine diffère du cycle de conduite standard ou du cycle de conduite des autres pays en termes de modes de conduite des véhicules. En revanche, à Edimbourg, le cycle de conduite urbaine a été développé [107], et en 2009, le "cycle de conduite de moto d'Edimbourg" a été développé [108]. En Italie, l'Université de Rome a utilisé un cycle de conduite réel avec une longueur totale de piste de $4{,}6\ km$, et d a été utilisé pour comparer la consommation d'énergie de deux carburants différents [109]. Aux États-Unis, Jie Lin et al. [110] ont créé un nouveau cycle de conduite (LA01). Par conséquent, il est nécessaire de formuler un cycle de conduite spécifique pour chaque pays, et au moins de concevoir avec précision le VPàC.

2.2.4.1. UDDC

Le cycle de conduite européen est composé d'un cycle de conduite urbaine (CCU) et un cycle de conduite extra-urbain récemment (EUDC) introduit. Pour la certification des émissions, l'CCU est répété 4 fois, puis l'CCEU une fois. Le segment EUDC a été ajouté après le quatrième cycle CCU pour tenir compte des modes de conduite plus agressifs et à grande vitesse. La vitesse maximale du cycle EUDC est de 120 km/h. Un cycle EUDC alternatif pour les véhicules de faible puissance a également été défini avec une vitesse maximale limitée à 90 km/h.

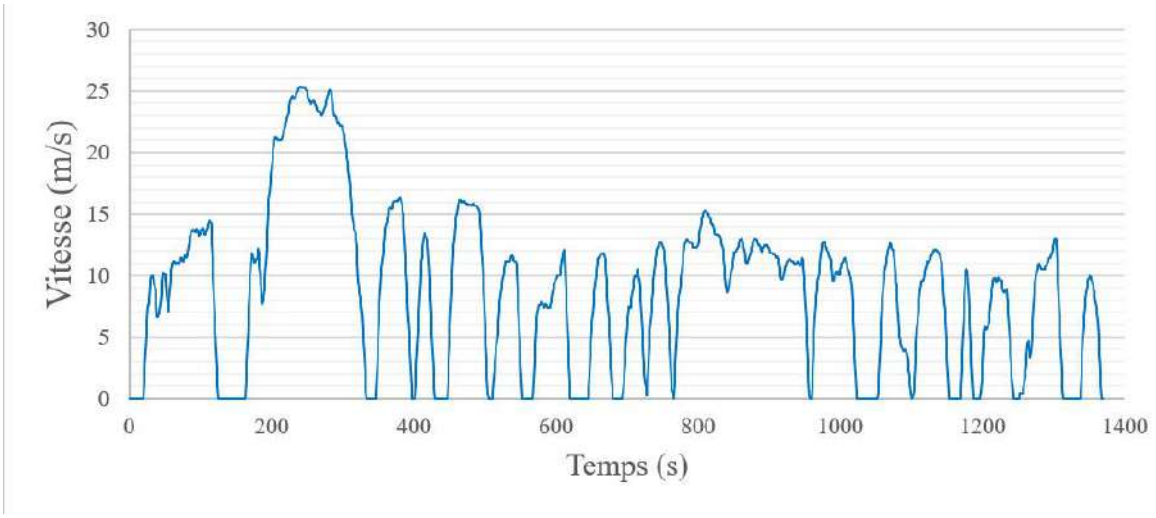

Figure 2-1: Cycle de conduite UDDC

2.2.4.2. HWFET

Le FTP-75 a été utilisé pour la certification des émissions des véhicules légers aux États-Unis. Le cycle FTP-75 est dérivé du cycle FTP-72 en ajoutant une troisième phase de 505, identique à la première phase de FTP -72 mais avec un démarrage à chaud. La troisième phase démarre après l'arrêt du moteur pendant 10 minutes. Ainsi, l'ensemble du cycle FTP-75 se compose des segments suivants : phase de démarrage à froid, phase transitoire, phase de démarrage à chaud. Les paramètres de base du cycle sont les suivants, c'est-à-dire que la distance parcourue est de 17,77 km, durée : 1874s, la vitesse moyenne est de 34,1 km/h.

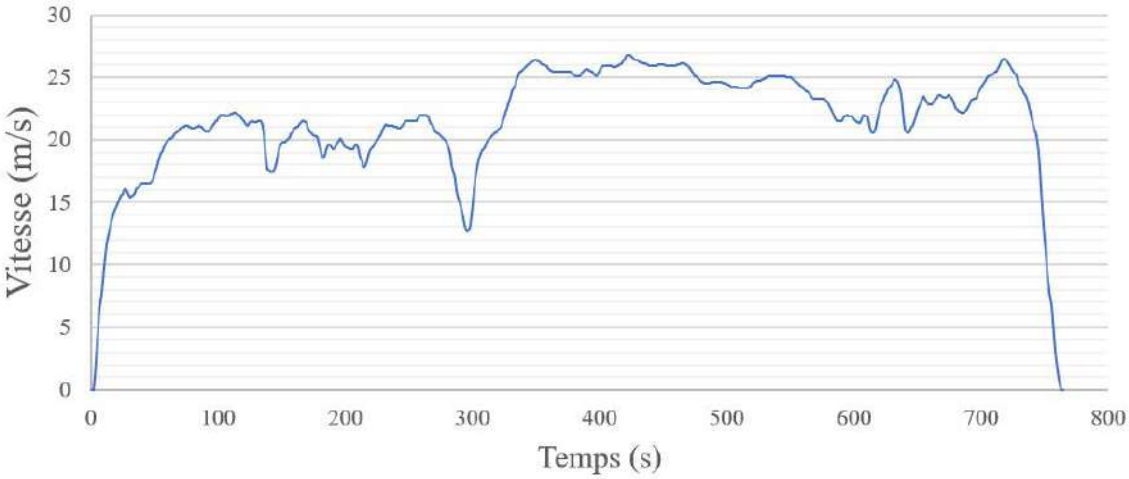

Figure 2-2: Cycle de conduite HWFET

2.2.5. Cycle de conduite de Ouargla

Un cycle de conduite représente la ville de Ouargla a été développé pour faire des études

La première étape consiste à quantifier et à enregistrer les habitudes de conduite réelles pour établir un cycle de conduite. Calcul de la vitesse en utilisant les installations du véhicule. Nous savons qu'il existe une méthode de mesure de la vitesse qui s'applique à tous les véhicules et que certains autres équipements peuvent également être utilisés. Par la suite, afin d'obtenir une représentativité de la situation réelle, les données collectées doivent être analysées.

Dans ce travail, des données sur la conduite automobile ont été collectées à Ouargla, en Algérie. La raison du choix de cette option est que le laboratoire d'étude est situé à Ouargla, c'est donc le point de départ de ce travail. Les données ont été collectées sur la route reliant l'ancienne communauté et la nouvelle communauté de la ville (voir Figure 2-3).

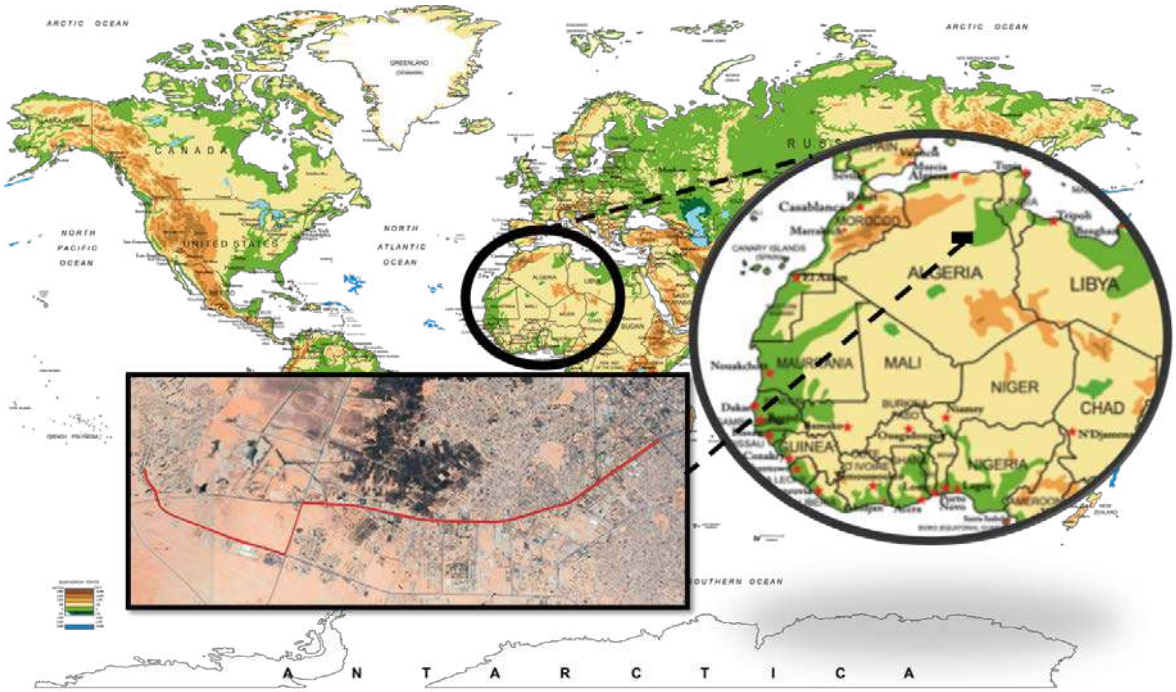

Figure 2-3: Plan de route

L'itinéraire choisi combine les universités, les banques, les villages résidentiels, les complexes multiples, les zones commerciales publiques et les complexes industriels. Utilisez des véhicules pour circuler sur des routes sélectionnées et respectez toutes les règles de la circulation routière. Les données par seconde seront collectées et stockées pour la vitesse du véhicule. Le résultat est illustré à la Figure 2-4.

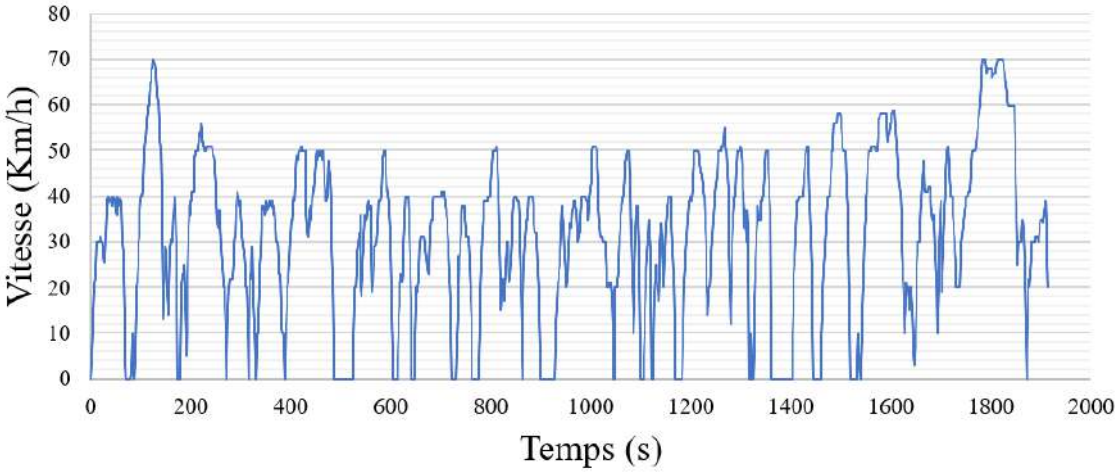

Figure 2-4: Cycle de conduite Ouargla

2.2.6. Analyse de cycle de conduite

Après analyse des données, les résultats pour la ville de Ouargla indiqués dans la colonne 1 du Tableau 2-1 (Figure 2-4) et sont obtenus. Le cycle de conduite développé a une durée d'environ 32 minutes, ce qui est une bonne durée et peut fournir les installations nécessaires pour étudier l'impact de la conduite sur le véhicule et l'environnement d'une part, et effectuer des tests à faible coût et à court terme sur La première demande plus de temps, tandis que la seconde nécessite un temps plus court. La durée dépend de la longueur de course de 16 km, ce qui est une bonne distance pour plusieurs essais et conditions de conduite différents.

Tableau 2-1: Attributs de cycle de conduite développés et standard

Propriétés	Ouargla	UDDS	HWFET
Temps $[sec]$	1914	1370	766
Distance $[Km]$	16.56	11.990	16.507
Vitesse maximale $[km/h]$	70	91.3	96.4
Vitesse moyenne $[km/h]$	31.16	31.5	77.6
Accélération maximale $[m/s^2]$	5.54	1.48	1.43
Décélération maximale $[m/s^2]$	-5.54	-1.48	-1.48
Accélération moyenne $[m/s^2]$	3.72	0.480	0.18
Décélération moyenne $[m/s^2]$	-4.68	-0.53	-0.200
Temps d'inactivité $[s]$	245	242	5

Le cycle de conduite développé présente une différence fondamentale avec la classification adoptée dans ce domaine. La vitesse moyenne dans ce cycle de conduit est 31.16 km/h, donc on peut classer les cycles dans la catégorie de cycle de conduit urbaine, mais d'une autre coté la vitesse maximale qui égale 70 km/h, représente la catégorie de cycle de conduite de l'autoroute.

2.2.7. Comparaison avec les autre drive cycle

La comparaison entre le cycle de conduite développé et deux cycles de conduite standard : cycle de conduite dynamométrique urbain (UDDS) est représentée dans la Figure 2-1 et cycle d'économie de carburant sur route (HWFET) représentée dans la Figure 2-2; la distance du cycle de conduite Ouargla et l'UDDS est la plus longue, mais le la vitesse moyenne est la même, car le cycle de conduite Ouargla a été développé en ville.

La différence entre le cycle de conduite développé et les autres cycles de conduite est la valeur moyenne de l'accélération et de la décélération. L'accélération moyenne du système de cycle de conduite de Ouargla est de $3{,}72\ m/s^2$, l'accélération maximale est d'environ $5{,}54\ m/s^2$, la décélération moyenne est de $-4{,}68\ m/s^2$ et la décélération maximale est de $-5{,}54\ m/s^2$, ce qui doit être plus rapide que la réponse dynamique de vitesse dynamique. Les deux autres cycles de conduite.

Le Tableau 2-2 montre les résultats obtenus dans une simulation qui a été fait par un véhicule de $950\ kg$ pour les trois cycles de conduite, sans tenir compte du poids de la source d'alimentation. Il ressort des résultats que le véhicule a besoin de $5\ MJ$ d'énergies pour effectuer le trajet, soit le double des résultats obtenus sur les deux autres cycles de conduite. Cela se traduira par une plus grande consommation de carburant par le véhicule, c'est-à-dire plus d'émissions que de gaz polluants ; La différence du cycle de conduite de Ouargla s'observe également dans le niveau d'énergie restituée lors de la décélération, en raison de la décélération rapide qui le caractérise, outre le nombre de fortes décélérations, qui rend les autres cycles de conduite inefficaces pour prédire la quantité d'énergie retrouvée en roulant dans la ville de Ouargla.

Tableau 2-2: comparaison entre les cycles de conduite

	Ouargla	UDDS	HWFET
Energie consommée $[MJ]$	5	2.97	2.05
Energie régénère $[MJ]$	3.1	1.84	0.8
Puissance consommée moyenne $[W]$	4319.6	4197	3615
Puissance consommée maximal $[W]$	34432	23292	18445
Puissance régénère moyenne $[W]$	6151	4598	4584
Puissance régénère maximal $[W]$	38085	18746	27431
Variation maximale de Puissance d'accélération $[W]$	61780	11404	14426
Variation moyenne de puissance d'accélération $[W]$	43015	16219	12850
Variation maximale de puissance dans décélération $[W]$	3228	1841	1389
Variation moyenne de puissance dans décélération $[W]$	6064 W	2397	1814

Nous concluons de la quantité d'énergie récupérée lors de la décélération que nous pouvons réduire considérablement la consommation de carburant si nous la stockons et la réutilisons dans le fonctionnement du véhicule, ce qui suggère la nécessité pour la voiture d'avoir de grands éléments de stockage d'énergie électrique. Véhicules conventionnels, ce qui signifie que toute cette énergie sera gaspillée et ne sera pas utilisée, ce qui fait des véhicules électriques une nécessité pour réduire la consommation d'énergie et la conserver.

La puissance maximale obtenue est environ d'un quart supérieur à celle qui peut être obtenue à partir des deux autres cycles de conduite, bien que la vitesse maximale du cycle de conduite spécial soit la plus faible, et ces résultats sont dus à la grande accélération qui se caractérise par la conduite en la ville de Ouargla. A partir de ces résultats, nous pouvons déterminer l'argument de la pile à combustible nécessaire pour faire fonctionner efficacement le véhicule dans les rues de la ville de Ouargla, qui sera de plus grande taille par rapport aux résultats des autres cycles de conduite.

La plus grande différence était dans le niveau de changement de puissance, qui dépasse cinq fois, ce qui résultait de la transition rapide de la décélération à l'accélération. Ce niveau nous obligera à avoir besoin de sources d'énergie à réponse rapide au changement rapide et important du besoin d'énergie, ce qui sera difficile par la pile à combustible à réponse lente, ce qui nous oblige à avoir besoin d'un grand nombre de supercondensateurs.

2.3. Étude sur les véhicules commerciaux à pile à combustible

Dans cette partie, l'effet de la différence qui caractérise le cycle de conduite de la ville de Ouargla sur les véhicules actuels à pile à combustible a été étudié. Ces véhicules ont été construits et conçus sur la base des études qui a été évacuée sur les stages de conduite standard, qui a montré qu'elle ne reflétait pas fidèlement la conduite dans la ville de Ouargla. Par conséquent, dans ce travail, nous avons essayé de simuler un voyage par un véhicule à pile à combustible commercial dans la ville de Ouargla.

2.3.1. Outil utilisée

2.3.1.1. ADVISOR : un outil d'analyse et de modélisation avancée des véhicules

Un outil de simulation (ADVISOR) a été développé pour la première fois au Laboratoire national des énergies renouvelables (NREL) en novembre 1994. Il est conçu comme un outil d'analyse pour aider le département américain de l'énergie à développer la technologie des véhicules électriques hybrides (HEV) par le biais de contrats de systèmes de propulsion de véhicules électriques hybrides avec Ford, General Motors et DaimlerChrysler. Son rôle principal

est de mettre l'accent sur l'interaction au niveau du système des composants des véhicules hybrides et électriques et leur impact sur les performances du véhicule et l'économie de carburant.

ADVISOR a été créé dans l'environnement MATLAB / Simulink. MATLAB fournit un environnement de programmation matriciel facile à utiliser pour effectuer des calculs, et utilise trois écrans d'interface utilisateur graphique (GUI) principaux pour guider les utilisateurs tout au long du processus de simulation. À l'aide de l'interface graphique, les utilisateurs peuvent évaluer de manière itérative l'impact des paramètres du véhicule et des exigences du cycle de conduite sur les performances du véhicule, la consommation de carburant et les émissions. L'interface graphique permet d'interagir avec les données d'entrée et de sortie d'origine présentes dans l'espace de travail MATLAB. Utilisez les schémas de principe Simulink pour décrire graphiquement le modèle de véhicule afin de définir les connexions entre les composants. Ensuite, le modèle lit les données d'entrée dans l'espace de travail MATLAB pendant le processus de simulation et génère les résultats dans l'espace de travail pour les afficher dans la fenêtre de résultats. Conception optimale des véhicules électriques à pile à combustible

2.3.1.2. TOYOTA MIRAI

La Toyota Mirai est un véhicule à pile à combustible à hydrogène conçu par Toyota. C’est l'un des premiers véhicules de ce type à être commercialisé. Elle a été dévoilée au salon de l'automobile de Los Angeles en novembre 2014.

Le système de la Toyota Mirai fait appel à deux sources d’énergie :

- Une pile à combustible (PàC) servant à transformer l’hydrogène en électricité
- Une batterie récupérant l’énergie aux freinages et décélérations apporte plus de puissance en accélération

Ces deux éléments alimentent un moteur électrique. Sur la Mirai I, il se situe à l’avant, puissant de 113 kW et 335 Nm et entrainant les roues avant. Non plus traction mais propulsion, la Mirai 2020 poses son moteur 134 kW et 300 Nm à l’arrière.

La PAC initialement de 114 kW en 2014 évolue à 128 kW en 2020. Elle passe aussi du plancher vers le capot avant pour libérer de la location à bord. La batterie d’origine Ni-Mh de 1,6 kWh ; Mais avec la seconde génération réduit non seulement sa taille avec la chimie lithium-ion, mais augmente son voltage à 311 V (vs 230 V). Sa capacité est cependant réduite à 1,2 kWh avec un ampérage de 4 Ah. La Toyota Mirai atteint jusqu’à 178 km/h de vitesse maximale et d’abattre le 0 à 100 km/h en 9,6 secondes. Plus lourde de 100 kg mais plus puissante, la seconde génération devrait être du même acabit.

De deux réservoirs en T occupent le plancher contenant 4,6 kg de gaz à une pression de 700 bars. La Toyota Mirai dispose ainsi de bombonnes ultra-sécurisées et renforcées de fibre de carbone. La version 2020 adopte un troisième réservoir sous le coffre, faisant grimper le volume à 142 litres d'hydrogène (H2). Ceci donne un poids de 5,6 kg de H2, augmentant l'autonomie de 500 à 650 km.

2.3.2. Consommation énergétique

Les résultats obtenus (Figure 2-5) ont montré que la PàC produisait une puissance moyenne estimée à $8778.98\ W$, soit le double de la puissance obtenue dans le Tableau 2-2 des résultats. Cela est dû au poids du véhicule utilisé cette fois, mais ce qui est intéressant c'est la capacité moyenne de la batterie qui est de $-698.25\ W$.

Tableau 2-3: Caractéristiques de TOYOTA MIRAI

Performance	134 kW	**Largeur**	1885 mm
Batterie	1,2 kWh	**Hauteur**	1480 mm
Autonomie	650 km	**Embattlement**	2920 mm
Transmission	Propulsion arrière	**Volume du coffre**	321 L
Longueur	4975 mm	**Poids à vide**	1920 kg

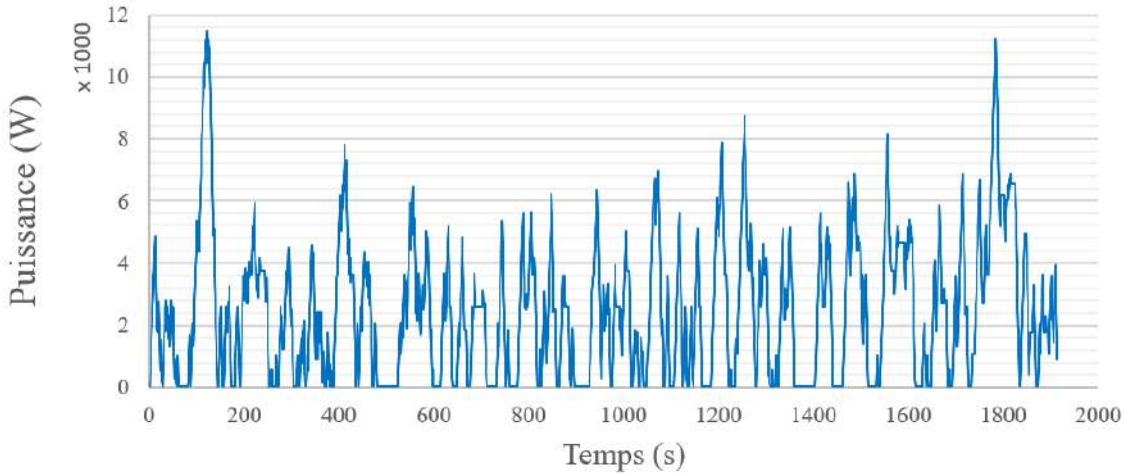

Figure 2-5: Production d'électricité par pile à combustible

Le carburant dans son volume actuel fournit l'énergie au moteur d'une part et charge la batterie de l'autre. Si l'on considère que les valeurs positives expriment la capacité fournie par la batterie et les valeurs négatives expriment la capacité reçue par la batterie, on peut conclure que

la pile à combustible avec sa taille actuelle fournit de l'énergie au moteur d'une part et charge la batterie de l'autre.

Les résultats ont montré que la PàC produisait une puissance maximale de $59152.2\ W$, soit la moitié de la puissance maximale que la pile à combustible utilisée dans le véhicule Mirai peut supporter. En revanche, la capacité maximale fournie par la batterie atteint $41859.8\ W$. Ces résultats ont clairement montré la possibilité de réduire la taille de la pile à combustible utilisée en tenant compte du fait que le véhicule n'utilisait que la même capacité de la pile à combustible.

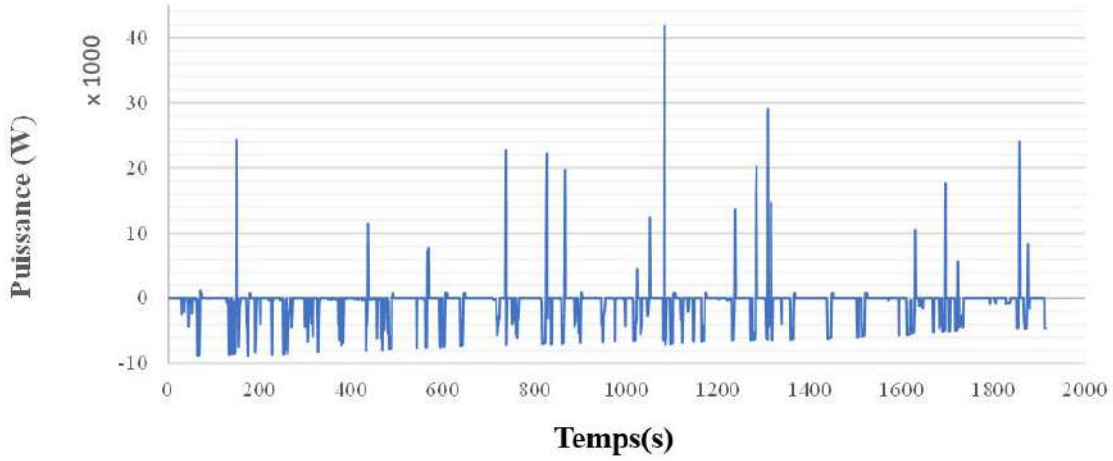

Figure 2-6: Production d'électricité et batterie

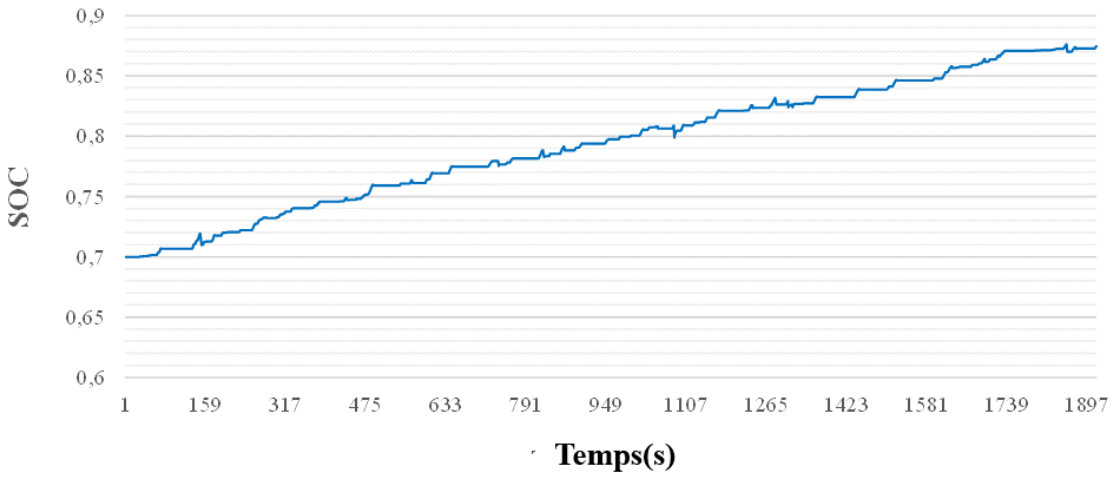

Figure 2-7: État de charge de batterie

La Figure 2-7 exprime l'évolution du niveau de charge de la batterie. On peut noter que la batterie recevait de l'énergie la plupart du temps pendant le trajet du véhicule, et n'en fournissait pas sauf dans de rares cas (cela se voit également sur la Figure 2-6). Cela nous incite à confirmer

notre conclusion précédente, à suggérer autre chose, qui est de remplacer la batterie par un super condensateur.

2.3.3. Environnemental protection

Diesel représente une part importante de la consommation totale de carburant pour les transports. Pendant la phase de fonctionnement du véhicule, les émissions de gaz à effet de serre (GES) sont supposées inclure le CO2 uniquement parce qu'il s'agit du principal GES d'échappement.

Le conseiller nous donne la possibilité de calculer la quantité d'émissions qui ont été réduites lors de l'utilisation d'un véhicule à hydrogène sur une piste spécifique (Tableau 2-4), selon les résultats obtenus grâce au cycle de conduite de Ouargla, et en utilisant le véhicule Toyota Mirai, nous pouvons réduire $4{,}68\ g/km$ de monoxyde de carbone (CO), pour chaque véhicule utilise de l'hydrogène comme carburant dans son fonctionnement

Tableau 2-4: les émissions de gaz à effet de serre

HC	Monoxyde de carbone	Oxydes d'azote
$0.63\ g/km$	$4{,}68\ g/km$	$0.35\ g/km$

2.4. Conception d'un véhicule à pile à combustible

Dans cette section, nous nous appuierons sur le cycle de conduite développé dans ce chapitre pour concevoir un système électrique composé d'une PàC et de SC, qui doit pouvoir fournir à un véhicule la puissance nécessaire pour fonctionner sur toute la longueur du trajet.

2.4.1. Modélisation du système

Les véhicules électriques à pile à combustible (VPàC) utilisent des piles à combustible (PàC) comme puissance principale et SC comme puissance auxiliaire. Afin d'utiliser les niveaux de tension dans le système d'alimentation, VPàC dispose également de trois convertisseurs de puissance. Le premier convertisseur de puissance est utilisé pour augmenter la tension de sortie de la pile à combustible vers le bus CC. Le second est un convertisseur abaisseur / élévateur pour permettre un flux d'énergie bidirectionnel entre le bus CC et la batterie de super condensateurs. Le troisième est un onduleur bidirectionnel, qui convertit le courant continu en charges de courant alternatif (CA) et vice versa.

2.4.1.1. Modèle de pile à combustible

La pile à combustible est un appareil qui utilise l'énergie chimique de l'hydrogène et convertit l'oxygène de l'air en énergie électrique. De nombreux travaux ont proposé un modèle statique pour PàCMEP, qui décrit la courbe de polarisation comme suit [111] :

$$V_{fc} = E - V_{con} - V_{ohmic} \qquad 2\text{-}1)$$

Où est-ce :

E La potentielle thermodynamique réversible est la tension qui serait obtenue si toute l'énergie libre de Gibbs a été convertie en électricité sans aucune perte. Il peut être calculé dans l'équation 2-2.

$$E = E_0 + \frac{RT}{2F} log \left[\frac{P_{H_2}\sqrt{P_{O_2}}}{P_{H_2O}}\right] \qquad 2\text{-}2)$$

Avec :

E_0 : Le potentiel réversible le plus proche pour une seule cellule.

T : La température de la cellule.

R : La constante idéale des gaz ($R = 8.3145\ J/mol.K$).

F : La constante de Faraday (F= 96400 Coulombs /mol e-).

P_{O_2} , P_{H_2} Et P_{H_2O}: sont une pression partielle d'oxygène, hydrogène et l'eau.

Les pertes de concentration V_{con} sont liées au changement de concentration des réactifs à la surface des électrodes. Comme l'hydrogène pur se diffuse mieux que l'oxygène dans l'azote et l'eau, les pertes de concentration à l'anode peuvent être négligées. Pertes de concentration $Econ$ peut être défini dans l'équation 2-3

$$V_{con} = B.ln(C.I_{PàC}) \qquad 2\text{-}3)$$

B : Une constante empirique.

$C = \frac{1}{I_{max}}$ Avec I_{max} : Le courant maximum autorisé.

$I_{PàC}$: Courant de pile à combustible.

Les pertes ohmiques V_{ohmic} dues à la résistance électrique des électrodes, et la résistance au flux d'ions dans l'électrolyte sont les plus simples à comprendre et à modéliser.

Cette chute de tension est proportionnelle à la densité de courant et elle est linéaire. Les pertes ohmiques peuvent être obtenues par l'équation 2-4 :

$$V_{ohmic} = R.I_{PàC} \qquad 2\text{-}4)$$

Avec R la résistance interne.

2.4.1.2. Super condensateur

SC peut être chargé à partir de la charge et du PàC. Dans le premier cas, lorsque la voiture freine ou décélère, la voiture absorbe l'énergie cinétique et en génère de l'électricité. Le deuxième cas montre que lorsque la puissance générée par le PàC dépasse l'exigence de charge, dans ce cas, le SC stockera l'excès de puissance.

La puissance SC est définie dans l'équation 2-5 :

$$P_{sc} = I_{sc}.V_{sc} \qquad 2\text{-}5)$$

Une valeur de puissance positive indique le SC dans un état déchargé, et une valeur négative indique le SC dans un état chargé.

La tension aux bornes de SC V_{sc} est donnée par l'équation 2-6 :

$$V_{sc} = V_c + I_{sc}.R_s \qquad 2\text{-}6)$$

I_{SC}: Le courant du super condensateur.

R_{SC} Est une constante représente la résistance interne du super condensateur.

La tension du condensateur à vide V_c : est exprimée par l'intégration de courant, et donnée par l'équation (2-7):

$$V_c = V_{c(t=0)} - \frac{1}{c}\int_0^t I_{sc}\,dt \qquad (2\text{-}7)$$

C : La capacité du condensateur et sa valeur est constante.

L'énergie contenue dans SC (E_{sc}) est fonction de sa tension à vide V_c:

$$E_{sc} = \frac{1}{2}.c.V_c^2 \qquad 2\text{-}8)$$

L'état de charge est défini par l'équation 2-9) :

$$SoC = \frac{E_{sc}}{E_{sc,max}} \qquad 2\text{-}9)$$

Tell que $E_{sc,max}$ l'énergie maximal de SC.

2.4.1.3. Modélisation de la puissance du véhicule

La force de charge du véhicule comprend la gravité (F_g), la résistance au roulement (F_{rool}), la résistance aérodynamique (F_{Ad}) et l'accélération (F_{acc}). Où est-ce :

$$F_g = Mgsin(\alpha) \tag{2-10}$$

$$F_{rool} = Mgf_r cos\,(\alpha) \tag{2-11}$$

$$F_{Ad} = 0.5\rho C_d A_f V^2 \tag{2-12}$$

$$F_{acc} = M\frac{dV}{dt} \tag{2-13}$$

Parmi eux : M est la masse du véhicule, g est l'accélération due à la pesanteur, α est le gradient de la route, f_r est le coefficient de résistance au roulement, ρ est la densité de l'air, C_d est le coefficient de résistance à l'air du véhicule, A_f est l'avant zone du véhicule, et V est la vitesse du véhicule. La masse du véhicule peut être exprimée comme suit :

$$M = m_v + M_{FC} + N_{SC}m_{SC} \tag{2-14}$$

Parmi eux : m_v est la qualité de base du véhicule, M_{FC} est la qualité du modèle pile à combustible, m_{SC} est la qualité de base du modèle SC et N_{SC} est le numéro du modèle SC.

La puissance de charge requise pour l'accélération du véhicule peut s'écrire :

$$P_{load} = \frac{P_g + P_{rool} + P_{Ad} + P_{rool}}{\eta_{Gb}} \tag{2-15}$$

En raison de la perte du convertisseur CC / CC (η_{conv}), de l'onduleur CC⁄CA (η_{inv}) et du rendement du moteur (η_m), la puissance requise par le bus CC est supérieure à P_{load}, veuillez écrire comme suit :

$$P_{req} = \frac{P_{load}}{\eta_m \eta_{conv} \eta_{inv}} \tag{2-16}$$

Le Tableau 2-5 résume les paramètres du modèle de véhicule étudié.

2.4.2. Stratégie de gestion de l'énergie

La stratégie de gestion de l'énergie (SGE) est responsable de la détermination du point de fonctionnement du PàC et de la répartition de l'énergie entre les différentes sources d'énergie. Elle joue un rôle important et a un impact important sur l'efficacité du système. Elle doit

répondre aux besoins en énergie. Et fonctionner dans ses limites composantes et maximiser l'efficacité globale, mais le SGE est généralement limité par la taille des différents composants.

2.4.2.1. Objectif de stratégie

Sous le contrôle de l'SGE, les sources d'alimentation doivent coopérer pour assurer le fonctionnement normal du VPàC. Répondre à la demande de puissance du cycle de conduite est l'objectif fondamental et obligatoire qui doit être atteint. Limitée par les caractéristiques physiques des sources d'alimentation, la plage de fonctionnement des composants doit être limitée dans les objectifs ou les contraintes du SGE. En prenant la pile à combustible comme exemple, la demande de puissance référencée de la PàC ne doit pas être supérieure à sa valeur de puissance maximale, sinon cela entraînera de graves dommages à la pile à combustible. Un taux de changement de puissance dynamique élevé doit également être limité pour augmenter la durabilité de la pile à combustible. Toutes ces exigences de base pour l'objectif de capacité de conduite peuvent être décrites dans l'équation 2-17 et satisfaites par tous les SGE dans les articles publiés.

$$P_{req} = P_{FC}\eta_B + P_{SC}\eta_{\frac{B}{B}}$$

$$P_{FCmin} \leq P_{FC} \leq P_{FC\,max}$$

$$\Delta P_{FC\,min} \leq \Delta P_{FC} \leq \Delta P_{FC\,max} \qquad (2\text{-}17)$$

$$P_{SC\,min} \leq P_{SC} \leq P_{SC\,max}$$

$$SOC_{min} \leq SOC \leq SOC_{max}$$

Tel que :

$$\Delta P_{FC}(k) = P_{FC}(t) - P_{FC}(t-1) \qquad (2\text{-}18)$$

Où η_B est le rendement du convertisseur élévateur et $\eta_{\frac{B}{B}}$ est le rendement du convertisseur abaisseur / élévateur.

Où est-ce

P_{FCmin} et $P_{FC\,max}$ sont respectivement la puissance minimale et maximale fournie par pile à combustible.

SOC_{min} et SOC_{max} sont les états de charge minimum et maximum que l'élément de stockage peut atteindre ; $P_{SC\,max}$ est la puissance SC maximale autorisée et $P_{SC\,min}$ est la puissance SC minimale autorisée.

Par rapport à d'autres sources d'énergie, les piles à combustible ont un temps de réponse long. Par conséquent, il ne supporte pas une certaine pente de puissance de charge, et il est limité par le taux d'accélération de montée $\Delta P_{FC\,max}$ et le taux de décélération de décroissance $\Delta P_{FC\,min}$.

2.4.2.2. Revue de littérature

Plusieurs méthodes de gestion de la taille et de l'énergie des VPàC ont été rapportées dans la littérature. Une étude basée sur les articles les plus pertinents (575 articles publiés l'année dernière), l'auteur dans [112] a utilisé le modèle MATLAB / Simulink pour évaluer le système de tramway basé sur le système hybride pile à combustible / batterie, et a implémenté l'ECMS pour gérer le flux d'énergie. Les auteurs de [113] ont intégré l'ECSM avec des schémas de prédiction par anticipation pour contrôler le facteur d'équivalence et améliorer les performances du flux de puissance dans le VPàC. Dans [114], Caux et al. Sur la base de la méthode combinée, un modèle linéaire est utilisé pour optimiser la consommation d'hydrogène dans VPàC, et le problème est résolu par la méthode de programmation linéaire entière. L'auteur de [115] peut optimiser le flux d'énergie dans la pile à combustible / élément de stockage du système en utilisant une programmation secondaire séquentielle, réduisant ainsi la consommation d'hydrogène de 2,16%. Dans les références [116,117], auteur compare différents SGE. Dans [118], l'auteur a proposé un SGE basé sur Gray Wolf Optimizer. Dans [119], l'auteur compare neuf stratégies de gestion différentes. La littérature [120] a proposé un EMS basé sur un filtre passe-bas et une méthode de consommation et de minimisation équivalente. Dans la référence [121], l'auteur a présenté un nouvel SGE basé sur une technologie d'optimisation, appelé algorithme Salp Swarm, et l'a comparé à d'autres EMS. Dans la littérature [122], l'auteur représente un système de stockage d'énergie hybride pour navires hybrides. Dans [123], l'auteur utilise un algorithme de programmation dynamique pour minimiser la consommation d'énergie et la dégradation du système des bus électriques.

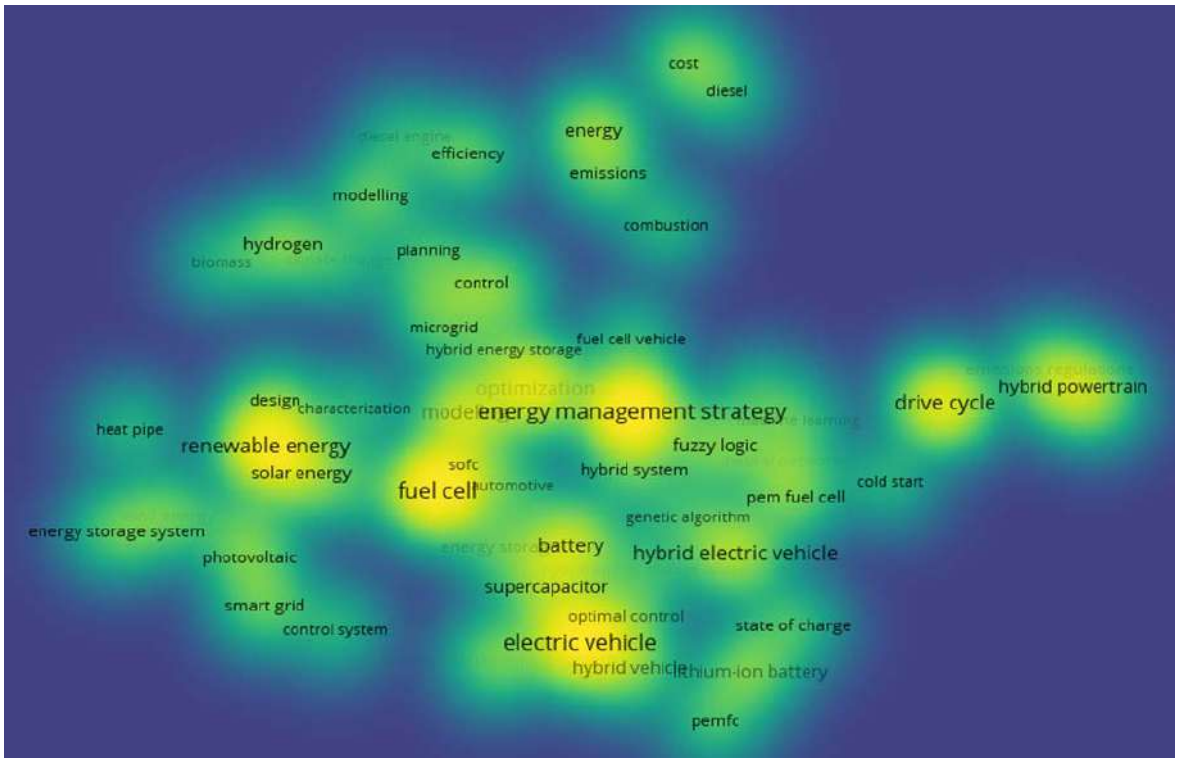

Figure 2-8: Visualisation des résultats d'analyse bibliométrique des véhicules électriques

Les auteurs de les références [124,125] est utilisé des estimations de la demande d'énergie pour proposer un nouveau SGE et l'ont appliqué au cycle de bus de Buenos Aires. Dans la référence [126], l'auteur a mené des recherches basées sur différents SGE et mené une analyse économique des pelles hybrides à pile à combustible. Dans la référence [127], l'auteur a utilisé l'optimisation multi-objectifs dans SGE. Dans la référence [128], l'auteur utilise soft run pour aider à contrôler l'algorithme en temps réel. L'auteur dans la référence [129]a proposé une conception optimale pour les véhicules à pile à combustible. L'auteur dans la référence [130] proposé une méthode passives pour déterminer la taille des sources d'énergie dans un système hybrides composée de PàC / SC. L'auteur dans la référence [131] a proposé une configuration hybride PàC/ SC pour les portiques sur pneus. Dans la référence [132], l'auteur a développé un cadre de programmation convexe pour optimiser la gestion de l'énergie et la taille des composants des véhicules à pile à combustible. Dans l'article [133], les chercheurs ont utilisé le principe de l'analyse du point de pincement pour calculer la taille idéale des piles à combustible et des systèmes de stockage. L'auteur dans la référence [134] a généré un cycle de conduite aléatoire basé sur le cycle de conduite combiné. Ensuite, il a utilisé MATLAB pour étudier l'effet du nombre de supercondensateurs sur le système. Muñoz et coll. [135] En utilisant des réseaux de neurones.

2.4.2.3. Gestion d'énergie dans ce travail

Dans ce travail, un SGE simple a été utilisé (Figure 2-9), qui reposait principalement sur PàC. Il est chargé de fournir l'énergie nécessaire au véhicule ; pour le SC, il n'est responsable que de l'incapacité de la PàC de fournir tous les besoins énergétiques du véhicule. En raison de la vitesse de réponse lente, dans ce cas, le SC fournira au véhicule une énergie insuffisante dans les limites de l'énergie stockée par le véhicule et sa puissance maximale.

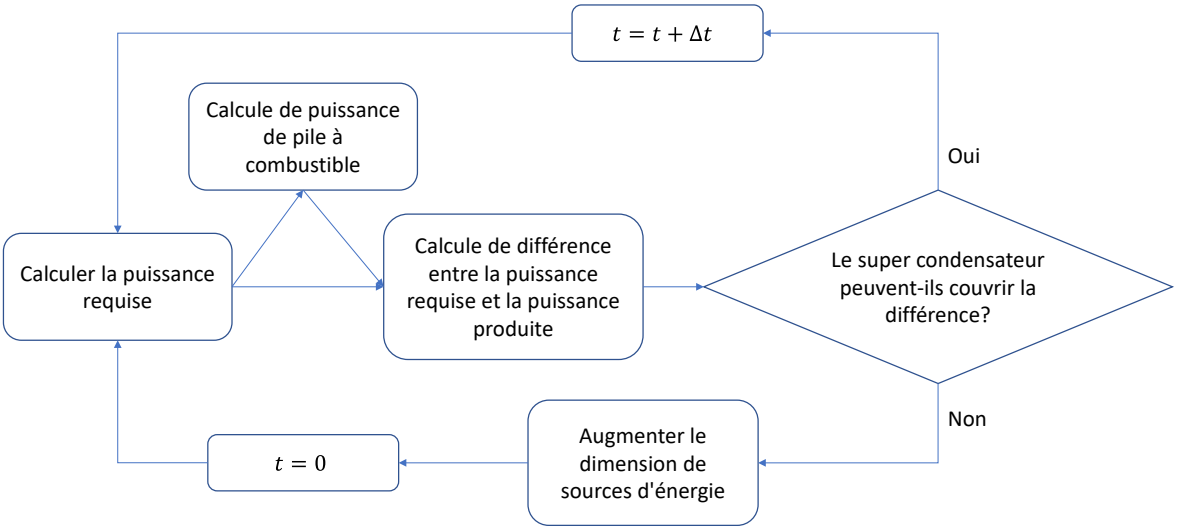

Figure 2-9:Organigramme correspondant à SGE.

SC peut également être utilisé lorsque l'énergie générée par le PàC dépasse le véhicule, dans ce cas le SC stockera l'énergie excédentaire dans les limites de l'état de charge.

2.4.3. Méthode de calcul de la taille

La taille des différentes sources d'énergie affecte directement les performances du système, car la taille insuffisante du PàC / SC signifie qu'il ne peut pas répondre aux exigences de conduite, et la grande taille augmentera inutilement le coût et la qualité. L'objectif de cette partie de travail est de déterminer la puissance maximale de la pile à combustible et le nombre de supercondensateurs nécessaires pour répondre aux exigences de conduite, et réduire la consommation d'hydrogène.

La méthode de sélection est basée sur le fonctionnement du véhicule sous différentes tailles de source d'alimentation, et l'accent est mis sur le calcul des pannes du système. La méthode est basée sur deux tests : dans le premier test, les groupes PàC et SC doivent être capable de maintenir les performances du véhicule. Vitesse ; Dans le deuxième test, SC Bank doit être en mesure de récupérer et de stocker l'énergie excédentaire.

Le premier test consiste à déterminer la taille de la PàC nécessaire pour atteindre les besoins énergétiques du véhicule, en plus de déterminer le nombre de SC nécessaires pour mieux répondre aux changements de puissance pendant l'accélération ; dans le second test, l'objectif est de déterminer la quantité de SC nécessaire pour récupérer l'énergie excédentaire produite par pile à combustible pendant la décélération. La taille du composant est basée sur la formule suivante :

$$P_n = P_{req} - (P_{FC}\eta_B + P_{SC}\eta_{\frac{B}{B}}) \tag{2-19}$$

$$P_{n_total} = \sum_{i=1}^{k} P_{n,i} \tag{2-20}$$

$$P_p = P_{FC}\eta_B - (P_{req} + P_{SC}\eta_{\frac{B}{B}}) \tag{2-21}$$

$$P_{p_total} = \sum_{i=1}^{k} P_{p,i} \tag{2-22}$$

$$M_{source} = M_{FC} + N_{SC}m_{SC} \tag{2-23}$$

Tableau 2-5: Paramètres du véhicule d'essai [136]

Paramètre	Symbol	Value
Masse du véhicule de base	m_v	950 kg
Accélération de la gravité	g	9.8 m/s^2
Densité de l'air	ρ	1.2 kg/m^3
Coefficient de résistance au roulement	f_r	0.014
Coefficient de traînée	C_d	0.3
Zone avant	A_f	1.746 m^2
Masse SC	m_{SC}	0.406 kg
Puissance spécifique SC	$E_{SC,max}$	3600 kJ
Rapport poids/puissance du FC	$P_{SC\ max}$	12 kW
Efficacité du convertisseur Buck/boost		0.333 kW/kg
Convertisseur	η_B	0.95
Efficacité du convertisseur Buck/boost	$\eta_{\frac{B}{B}}$	0.95
Efficacité de l'onduleur	η_{inv}	0.95
Efficacité du moteur électrique	η_m	0.95
Efficacité de la boîte de vitesses	η_{Gb}	0.9

Avec P_n est le manque d'énergie à chaque instant, et $P_{n,total}$ est la quantité totale de manque d'énergie dans tous le cycle de conduite, P_p est le SC ne l'a pas stockée à chaque étape, et $P_{p\ total}$ est la somme de l'énergie qui ne peut pas être stockée dans tous les cycles de conduite.

Enfin, choisissez la taille qui remplit les conditions suivantes comme taille idéale pour PàC et SC :

$$\begin{cases} P_{n_total} = 0 \\ P_{p_total} = 0 \\ min\ (M_{source}) \end{cases} \tag{2-24}$$

2.4.4. Résultat obtenue

Dans cette section, les résultats de la simulation de la méthode de dimensionnement est présentée. Un l'algorithme préparez et exécutez dans MATLAB en fonction de l'organigramme illustré à la Figure 2-9. De plus, $P_{n\ total}$ est calculé pour chaque étape selon l'équation (2-19) et

l'équation (2-20), et $P_{p\ total}$ est calculé selon l'équation (2-21) et l'équation (2-22) ci-dessus. les paramètres utilisée représentée dans le Tableau 2-5 [136]

Les résultats ont montré que la voiture a besoin d'une pile à combustible de 13 kW et de 95 SC pour faire fonctionner la voiture normalement selon le cycle de conduite développée au cours de ce travail. La puissance de PàC qui en résulte correspond à un dixième de la taille de la PàC utilisée dans la Toyota Mirai, et bien que la demande de puissance maximale de la voiture pendant son trajet ait été de 42,435 kW, soit environ quatre fois la puissance maximale de la PàC, le véhicule a obtenu tous ses besoins énergétiques pendant son voyage.

La Figure 2-10 montre le profil de charge du véhicule apparaît au cours du trajet, les valeurs positives représentent la puissance consommée par le véhicule lors de son déplacement, et les valeurs négatives expriment l'énergie récupérable lors de la décélération dans le déplacement du véhicule.

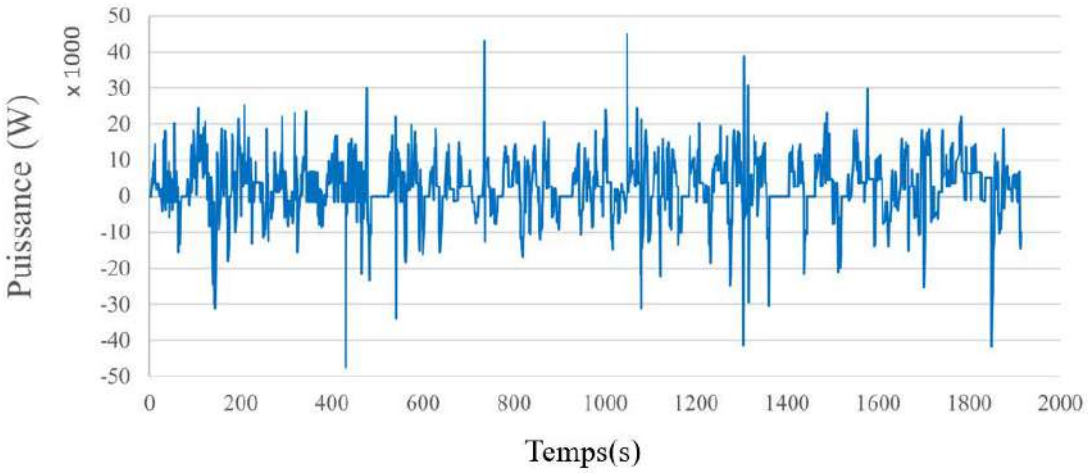

Figure 2-10: Puissance requise par le véhicule

Pendant le trajet du véhicule, le véhicule a consommé un total de 8,03 MJ d'énergie, la pile à combustible a économisé un total de 57 % et le reste de l'énergie nécessaire est fourni par la pile à combustible. En pratique, le supercondensateur n'est capable de stocker qu'environ 700 kJ, ce qui indique que le véhicule a profité de l'énergie récupérée lors de la décélération, car elle a été stockée puis réutilisée, représentant 40 % de l'énergie nécessaire au fonctionnement du véhicule.

Les valeurs négatives dans le profil de charge représentent la puissance qui peut être récupérée pendant le processus de ralenti, ces valeurs représentent environ un quart du profil pour un total d'environ 3 MJ d'énergie récupérable. Pendant le trajet, la valeur maximale de l'énergie instantanée récupérable était d'environ 48 kW, tandis que la valeur moyenne de l'énergie récupérée était d'environ 6.258 kW. La grande valeur qui peut être récupérée est la

raison derrière le grand nombre de super condensateurs dont le véhicule a besoin selon les résultats obtenus au cours de cette étude.

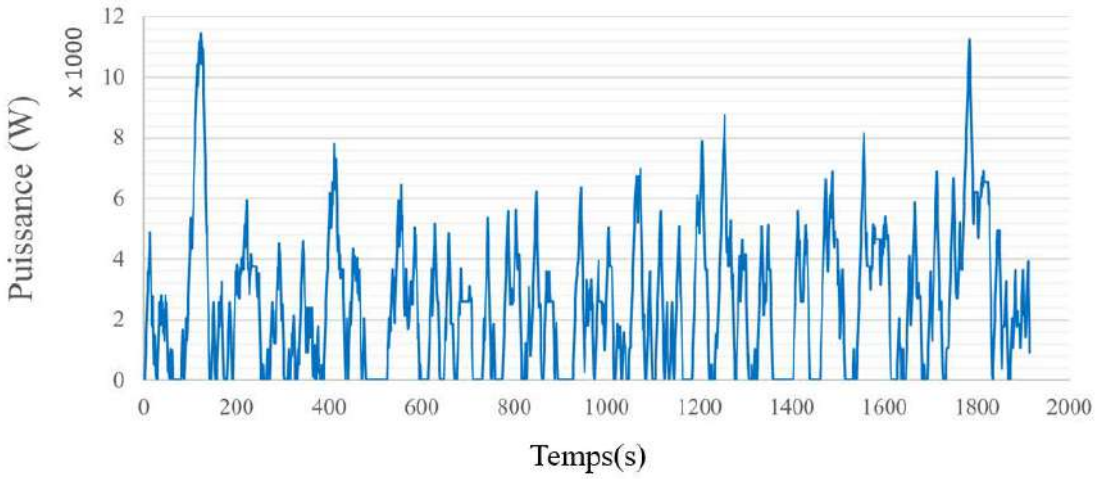

Figure 2-11: Puissance de PàC

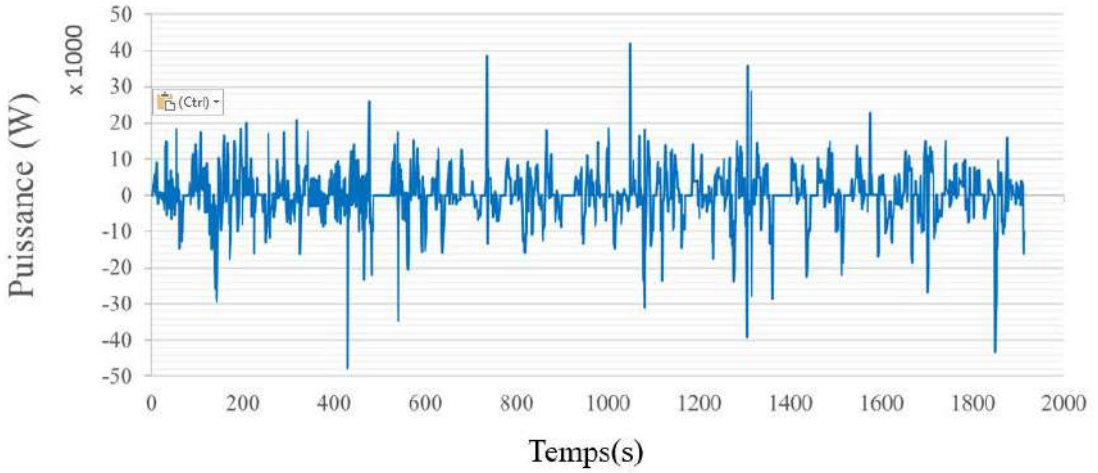

Figure 2-12: Puissance de SC

Le Figure 2-11 montre l'évolution de l'énergie produite par la PàC. La PàC a fonctionné pendant toute la durée du trajet sans s'arrêter même dans les cas où le véhicule n'avait pas besoin d'énergie, l'énergie moyenne produite par la PàC était d'environ 2,5 kW, soit environ 35 % de la demande énergétique moyenne d'un véhicule et environ 27 % de la puissance moyenne produite par la PàC Toyota Mirai.

La Figure 2-12 montre l'évolution de la puissance du SC. Les résultats montrent que le supercondensateur a fourni au véhicule de l'énergie pendant 722 s à une puissance moyenne de 5883,15 W. L'énergie totale fournie par le SC atteint 4,2 MJ d'énergie, soit plus que l'énergie produite par la PàC d'environ 1,7 MJ, et cette contribution s'élève à environ 53 % des besoins énergétiques du véhicule.

Les SC ont stocké environ 3,9 mégajoules au cours de $892\,s$ de trajet, à une puissance moyenne de $4426{,}36\,J/s$. Cette énergie représentait 93 % de l'énergie apportée par les SC dans le même trajet. Les SC ont récupéré toute l'énergie possible produite par la décélération du véhicule, tout en recevant le reste de la PàC dans les cas où l'énergie produite par la PàC était supérieure à la demande énergétique du véhicule.

Les résultats obtenus ont montré une diminution significative de la taille de la PàC, qui a été compensée par un plus grand nombre de SC, ce qui a permis de récupérer plus d'énergie et donc une plus grande contribution des SC à fournir l'énergie nécessaire au fonctionnement du véhicule. Mais contrairement à cela, il est clair que ces résultats sont idéaux pour le cycle de conduite uniquement, et que toute différence dans le cycle de conduite peut conduire à ne pas fournir au véhicule l'énergie requise.

2.5. Conclusion

Ce chapitre est une contribution au domaine des études liées aux véhicules à PàC. Au début du chapitre, un cours de conduite a été proposé et développé. Le cours de conduite est essentiel pour simuler et tester les émissions d'échappement des véhicules, la gestion de l'énergie et l'économie de carburant. Les données ont été collectées dans les rues les plus importantes de la ville de Ouargla, en Algérie. Ces données ont été analysées puis un cycle de conduite Ouargla a été proposé. En comparant le cycle de conduite d'Ouargla avec d'autres cycles de conduit, les résultats ont montré que le cycle d'Ouargla a une accélération et une décélération maximales plus élevées par rapport aux autres cycles de conduite, et il a une différence dans la taille du système d'alimentation. Une étude de simulation a été menée sur le véhicule Toyota Mirai, afin d'avoir un aperçu préliminaire des performances qu'il atteindra lors de sa conduite dans la ville de Ouargla. Comme autre application dans ce chapitre, des expériences de simulation a été réalisées sur différentes tailles de PàC et SC, et les résultats ont été que le volume optimal était $M_{FC} = 38\,kg$ et $N_{SC} = 94$.

Chapitre 3. Contribution à la gestion d’énergie thermique dans les piles à combustible

3.1. Introduction

La gestion thermique est l'un des points chauds et des problèmes dans le développement des véhicules électriques à pile à combustible. Afin d'obtenir le meilleur fonctionnement, le PàC doit être chauffé avant de démarrer, car le PàC est dans un état de basse température avant le fonctionnement, puis après que le PàC commence à fonctionner, il perdra beaucoup de chaleur. Par conséquent, il doit être refroidi pour le maintenir à une température appropriée.

Dans ce chapitre, une stratégie spéciale de gestion thermique des PàC pour les véhicules est proposée. La recherche comprend principalement deux procédés : Le premier procédé consiste à chauffer la PàC avec un rendement élevé et une consommation optimale d'hydrogène dans des conditions idéales. Le deuxième procédé vise à assurer la stabilité de la température de la PàC dans la plage de température idéale. Afin d'étudier l'efficacité du système, un module de simulation a été implémenté dans le cadre du programme MATLAB, et le module a été utilisé pour effectuer les expériences nécessaires sur le système afin de prouver son efficacité. En plus des questions soulevées dans cette partie, la deuxième partie clarifie l'idée du système proposé, la troisième partie introduit le modèle du système et la quatrième partie présente les résultats obtenus.

3.2. Structure d'une PAC

La pile à combustible (PàC) se compose de plusieurs cellules unitaires, qui forment un stack. Ces cellules de base se composent de trois parties : membrane, électrode (anode, cathode) et plaque (Figure 3-1) [137].

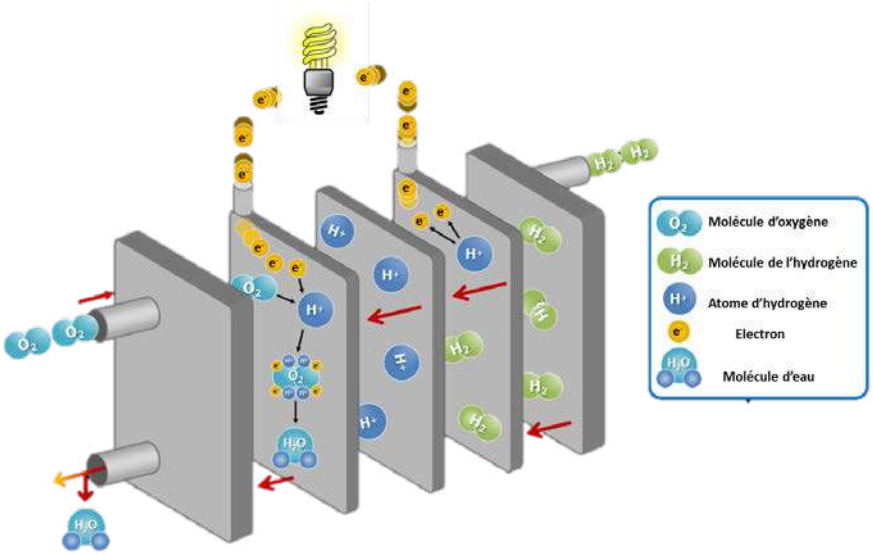

Figure 3-1: Structure d'une cellule PEMFC

3.2.1. Membranes polymères ioniques

La membrane conductrice protonique constitue le cœur d'une PàCMEP. Leur importance est évidente, car ce sont leurs propriétés conductrices qui vont réguler la recombinaison électrochimique de l'hydrogène avec l'oxygène, affectant ainsi ses performances. La chute ohmique limite le fonctionnement à des densités de courant élevées et est principalement liée à la membrane (la résistance de la membrane est liée au rapport épaisseur sur conductivité protonique). De plus, ce dernier doit avoir de bonnes propriétés mécaniques et une bonne résistance chimique dans les conditions de fonctionnement, être étanche à l'air et éventuellement conserver une forte teneur en eau à des températures élevées, car cela conditionne la conductivité électrique [138].

3.2.2. Electrodes

Le rôle des électrodes est de [139] :

- Le catalyseur finement divisé est supporté et mis en contact avec le gaz.
- Les espèces protiques peuvent se déplacer du site catalytique de l'oxydation de l'hydrogène vers le site où l'oxygène est réduit en raison de la présence du polymère ionique.
- Evacuer les électrons du site catalytique de l'anode et redistribuer ces électrons vers le site catalytique de la cathode.

Ces électrodes sont fabriquées en déposant de très petites particules de platine (2 à 3 nanomètres supportées par de la poudre de carbone), des particules de poly tétra fluore éthylène (PTFE) et un électrolyte polymère liquide sur un tissu ou un feutre conducteur en fibre de carbone. Ils peuvent être réalisés en plusieurs couches laminées.

Les électrodes ont été assemblées puis collées de part et d'autre de la membrane par thermocompression. Les assemblages d'électrodes à membrane d'électrode (EME) ont une épaisseur inférieure à un millimètre. L'ensemble EME est intégré entre deux plaques bipolaires [140].

3.2.3. Plaques bipolaires

Les plaques bipolaires sont en contact avec la surface de l'électrode et permettent toute la surface de l'électrode :

- Collecter les électrons du courant.
- Distribution et séparation des gaz à l'anode et à la cathode.
- Évacué le produit formé (eau à l'anode).

Le matériau de la plaque bipolaire doit présenter une conductivité électrique suffisante, une étanchéité aux gaz supérieure aux membranes échangeuses de protons et une bonne inertie chimique aux fluides (eau, acide, oxygène...) présents dans la cellule [141].

3.3. Architecture du système pile à combustible

Divers périphériques sont nécessaires à la mise en œuvre d'un générateur d'énergie à PàCMEP

3.3.1. Alimentation en fluide

Le système fournit à la PàC les réactifs nécessaires pour la production d'électricité, à la cathode, le système fournit de l'oxygène au PàC à partir de l'air ambiant sous une pression allant de quelques centaines de millibars à 1,5 bar (relatif) selon le constructeur ; et à l'anode, le PàC est alimenté en hydrogène par un système de conditionnement qui applique une pression sensiblement égale à la pression cathodique pour limiter l'effort mécanique latéral sur la membrane électrolytique [142].

3.3.2. Elimination de l'eau produite

Le débit d'air à la cathode draine l'eau produite par la réaction et traverse un séparateur en sortie de la PàC. Cette eau peut être soit stockée pour servir à diverses fonctions (humidificateur, reformeur), soit être directement rejetée à l'extérieur.

3.3.3. Elimination de la chaleur

L'énergie thermique générée dans la batterie est du même ordre de grandeur que l'énergie électrique, et il faut l'évacuer pour éviter une surchauffe et donc une détérioration de la membrane. Il existe trois méthodes d'évacuation :

- Toutes les 2 à 3 cellules de la plaque bipolaire assurent la circulation du liquide caloporteur.
- Injecter de l'eau avec de l'air à l'entrée de la piscine. La chaleur est évacuée par évaporation partielle de l'eau.
- Chaque plaque bipolaire est équipée d'ailettes qui dissipent la chaleur vers l'extérieur par circulation forcée d'air. Si la plaque bipolaire a une section plus importante, le transfert de chaleur longitudinal peut être amélioré en conférant à la plaque une fonction de caloduc.

Dans toutes ces options, le circuit de refroidissement comprendra donc un circuit liquide ou gazeux avec des circulateurs, et éventuellement (dans le cas des liquides) un échangeur de chaleur vers l'extérieur.

3.4. Paramètres affectant la température de la pile à combustible

3.4.1. Structure matérielle

La conductivité de la plaque bipolaire et de la couche de diffusion de gaz et la résistance de contact entre elles affectent les performances de la PàC. Cette partie de l'impédance est la principale source de perte de polarisation ohmique. En particulier, la résistance de contact entre la plaque bipolaire et la couche de diffusion de gaz, entraînant une perte de polarisation ohmique représentant 10 % du total [143]. La perte de polarisation ohmique de la PàCMEP se manifeste par la diminution de la tension de sortie externe. D'autre part, il montre une augmentation de sa propre chaleur. La conception d'optimisation basée sur le matériau de la batterie peut réduire la température globale de la batterie, réduire la perte d'énergie inutile et améliorer les performances de la PàC.

La plaque bipolaire fournit un chemin d'écoulement de gaz pour empêcher l'hydrogène et l'oxygène dans la chambre à gaz de la batterie de communiquer entre eux, et pour établir un chemin de courant entre la cathode et l'anode en série pour gérer la dissipation thermique de l'ensemble de la PàC.

La couche de diffusion joue un rôle dans le support de l'assemblage d'électrodes à membrane dans la PàCMEP, le transport des réactifs et des produits, et la conduction de l'électricité et de la chaleur. Il est considéré comme un matériau solide à résistivité constante dans la plupart des études, et la résistance est parfois ignorée [144]. En fait, la conductivité thermique de la couche de diffusion, la résistance volumique et la résistance de contact avec la plaque bipolaire ne sont pas seulement affectées par la structure du matériau lui-même, mais également par la charge mécanique lors du processus de préparation de la PàC, qui a une influence déterminée sur les propriétés du matériau et sa microstructure [145].

La concentration des réactifs dans la PàCMEP affecte directement la vitesse de réaction électrochimique [146] et contrôle indirectement la densité de courant et l'uniformité de la distribution de température. La distribution de la concentration des réactifs avec le même débit massique est contrôlée par la surface effective de la structure du canal. La distribution de la température interne des PàCMEP est largement influencée par les caractéristiques internes de l'écoulement du fluide. Au fur et à mesure que le processus de refroidissement progresse, les performances de refroidissement du réfrigérant diminuent le long des canaux de refroidissement.

Certains chercheurs [147] ont conçu des canaux de refroidissement avec un tuyau de refroidissement non uniforme avec différentes sections transversales pour améliorer la capacité de refroidissement en aval des canaux de refroidissement.

3.4.2. Fluide de refroidissement

L'uniformité de la distribution de température d'une PàC a une grande influence sur sa durée de vie et ses performances. La manière générale d'améliorer l'uniformité de la distribution de la température interne consistait à réduire la différence de température entre l'entrée et la sortie du fluide de refroidissement en ajustant le débit du liquide de refroidissement [148]. Le mode d'évacuation de la chaleur résiduelle d'une PàC est principalement lié à sa puissance. Selon le milieu de refroidissement impliqué, le mode de refroidissement est divisé en dissipation thermique basée sur le milieu gazeux et dissipation thermique basée sur le milieu liquide. La dissipation thermique basée sur le milieu gazeux comprend principalement : le refroidissement par air cathodique, le refroidissement par air séparé et le refroidissement des bords ; La densité du système de refroidissement de la disposition n'est pas seulement limitée par les exigences de refroidissement, mais également par la puissance de sortie, le volume et le poids de la PàC [149].

3.4.2.1. Refroidissement à air

Les systèmes de refroidissement par air pour PàC comprennent généralement des équipements ou des structures, tels que des ventilateurs/soufflantes, des capteurs de température, des canaux de refroidissement, etc. L'air ambiant doit passer à travers la plaque de dissipation thermique du côté cathode de la PàC, ou entre les électrodes. Pour cela, la sélection des ventilateurs est critique et est généralement basée sur le débit massique et la perte de charge volumique du système de PàC fonctionnant à la puissance maximale [150].

3.4.2.2. Refroidissement par liquide

Les liquides de refroidissement ont une capacité calorifique plus élevée que les milieux gazeux et sont souvent utilisés pour refroidir de grandes PàC. Lorsque la puissance de la PàC est plus élevée et que les exigences de dissipation thermique sont plus importantes, l'utilisation du refroidissement liquide a souvent un meilleur effet de dissipation thermique. Le contrôle de la température à l'aide du refroidissement liquide se fait généralement en ajustant les canaux de refroidissement, en optimisant la sélection du liquide de refroidissement, en contrôlant le débit massique et d'autres méthodes. Le système de dissipation thermique du fluide de refroidissement liquide est principalement composé de pompes, de tuyaux de refroidissement et de condenseurs [151].

La pompe est le fournisseur de la puissance de circulation du système de refroidissement, qui aide le liquide de refroidissement à collecter et à restituer la chaleur, mais elle n'est pas indispensable. Par exemple, dans un système de refroidissement passif en boucle fermée, seul le changement de phase du milieu de refroidissement liquide peut compléter l'ensemble du processus de dissipation de la chaleur [152].

3.4.3. Démarrage à froid

Le démarrage à froid est également un aspect important du contrôle de la température de la PàC. Ce qui est différent du précédent est que le maintien d'une température uniforme et stable de la PàC nécessite souvent une dissipation thermique. Le démarrage à froid nécessite que la PàC soit préchauffée. Afin de rendre l'application des PàC plus universelle, il est nécessaire de considérer diverses situations possibles [153]. Un démarrage à froid à basse température est l'un des défis techniques auxquels sont confrontés. Des études ont montré que les PàC sont capables de démarrer à basse température, elles fonctionneront pendant une courte période après le démarrage. Cela se produit parce que la PàC peut normalement fonctionner à basse température, mais l'eau produit se condense dans l'environnement à basse température, bloquant les pores d'admission, ce qui l'empêche de démarrer [154]. De plus, un gel répété élargira facilement l'espace et augmentera la résistance de contact interne, en raison de l'expansion après condensation [155], ce qui finira par endommager les composants et affecter la durée de vie de la PàC. Par conséquent, avant d'envisager d'améliorer les performances de démarrage à froid de la PàC, il est nécessaire d'explorer le comportement de démarrage à froid et la recherche de mécanismes associés pour améliorer le fonctionnement de la PàC [156].

3.5. Revue de littérature

La température, l'humidification, la nutrition de l'hydrogène et de l'air et de nombreux autres facteurs jouent un rôle essentiel dans l'efficacité, la longévité et la sécurité du PàCMEP. Dans ce cas, de nombreux articles ont été publiés. Par exemple, l'auteur de [157] a mené une analyse objective pour trouver les facteurs d'entrée qui ont une influence significative sur la variable de réponse, qui dépend de (le modèle mathématique du modèle de simulation) et MATLAB SIMULINK. Dans [158], une étude sur une cheminée Ballard FC de 9 SSL 21 kW utilisant une base de données expérimentale vise à réduire les contraintes thermiques et à soutenir le besoin d'études de température sur le modèle de contrôle du système de PàC. Dans [70], une stratégie de contrôle adaptatif pour ajuster la température de la PàC au point optimal a été proposée. Dans [159], Becherif et al. Proposent un système d'empilage multi-pack installé en parallèle avec des batteries, l'idée étant d'utiliser un nombre suffisant de PàC équivalentes pour répondre à la

puissance requise, au lieu de toutes les démarrer. L'auteur dans [160] a mené une étude préliminaire sur l'humidificateur à bulles utilisé pour humidifier le PàCMEP. La recherche comprenait l'influence de la température de l'eau dans le réservoir d'eau, du niveau d'eau dans le réservoir d'eau et de la prise d'air sur les performances de l'humidificateur. Dans la recherche [161], les caractéristiques de fonctionnement du réservoir d'eau ont été analysées par simulation numérique. L'éjecteur dans le système PàCMEP - un éjecteur utilisé pour récupérer l'anode à hydrogène dans le système PàCMEP et une étude incluant l'impact de quatre paramètres d'ingénierie sur les performances. Dans l'article [162], un schéma basé sur la logique proportionnelle-intégrale, la logique floue et le réseau neuronal artificiel est proposé pour contrôler le flux d'hydrogène et d'oxygène, et avec l'aide de MATLAB / Simulink, pour chaque contrôleur dans des conditions de fonctionnement différentes. Performance. Les auteurs de [163] ont mené des expériences pour étudier la dégradation locale des PàCMEP pendant la terminaison anodique. Qiu et coll. [164] ont étudié la conductivité et la conductivité thermique du couche de diffusion de gaz sous charges cycliques et stables et la variation de sa microstructure. Il est à noter que si la compression de couche de diffusion de gaz peut améliorer sa conductivité, elle doit être contrôlée dans une certaine plage [165], sinon elle sera contre-productive ; Chi et al. [166] ont étudié la relation entre l'épaisseur de la membrane et la distribution de la température en établissant un modèle d'agrégats bidimensionnel non isotherme (2D). Les résultats de la simulation correspondent bien aux données expérimentales. Les résultats montrent que l'épaisseur de la membrane est positivement corrélée à la température de la batterie, et en raison de la faible conductivité thermique de la membrane, l'augmentation d'épaisseur n'est pas propice.

3.6. Control thermique basée sur le multi-pack PàC

Généralement, le système énergétique dans VPàC est composé d'un PàC et d'un élément de stockage d'énergie, mais la décomposition de la PàC en un système multi-pack présente de nombreux avantages, par exemple, il est pratique pour les travaux de maintenance, car PàC peut être installé en parallèle, donc il peut être remplacé séparément, Il a l'avantage de contrôler le nombre de PàC en fonction de la puissance moyenne demandée lors de la conduite, mais pour ce travail, l'avantage du PàC multi-stack est qu'il ne peut chauffer qu'un petite quantité d'énergie en s'appuyant sur élément de stockage d'énergie à PàC, puis utilisez le chauffage pour fournir l'énergie nécessaire pour augmenter la température d'un autre composant PàC. En théorie, cela réduit l'énergie que l'SSE doit fournir et réduit automatiquement la taille de l'SSE par rapport au chauffage du PàC directement dans un volume normal.

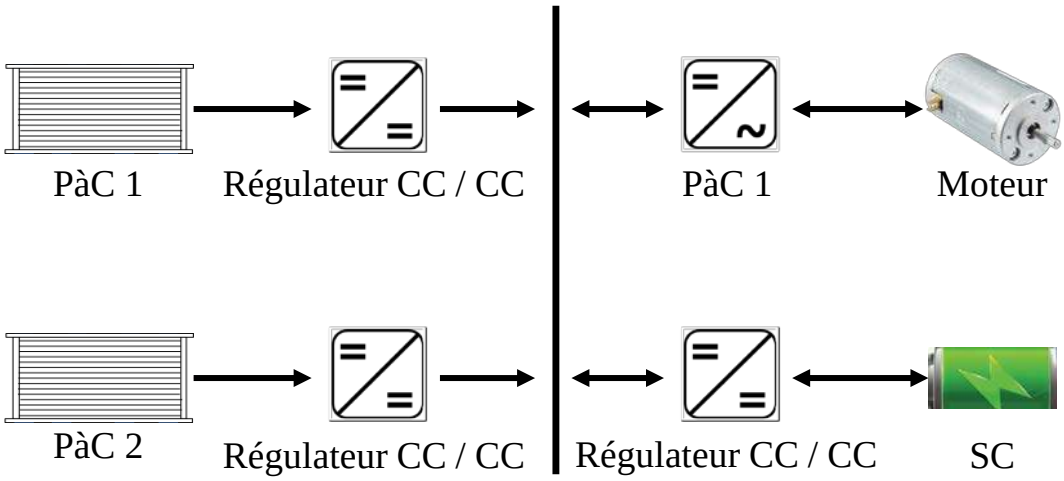

Figure 3-2: Connexion électrique de système PàC / SC

3.6.1. Prédimensionnement de système

Le système PàC multi stack utilisé dans cette étude (comme illustré dans la Figure 3-2 et la Figure 3-3 se compose de deux PàC, qui sont connectés en parallèle dans le système électrique et connectés en série dans le système de refroidissement. Chaque PàC du système a un nombre différent d'unités, le premier a 20 cellules et le deuxième a 110 cellules. La surface active de chaque PàC est de $285{,}5\ cm^2$. Cette configuration peut générer $33675\ W$ en conduction de fonctionnement maximale, ce qui est suffisant pour nécessiter la demande d'énergie d'un VPàC à une vitesse de $130\ km\ /\ h$ [70].

L'élément de stockage d'énergie est un élément important pour garantir que le VPàC répond pleinement à ses besoins énergétiques sans interruption. Pour ce travail, cette question est plus importante, car l'SSE sera également utilisé pour obtenir l'énergie nécessaire au premier chauffage du PàC pour cela, l'élément de stockage d'énergie est ajouté au système (comme le montre la Figure 3-2). La batterie ou SC peut être utilisée en parallèle avec PàC pour couvrir la demande de pointe, et lorsque la demande de PàC elle-même est faible, elle peut être chargée. Cependant, l'élément de stockage d'énergie n'est pas représenté sur la Figure 3-3, car l'étude n'a pas pris en compte l'effet de la température sur l'SSE et s'est concentrée uniquement sur le PàC.

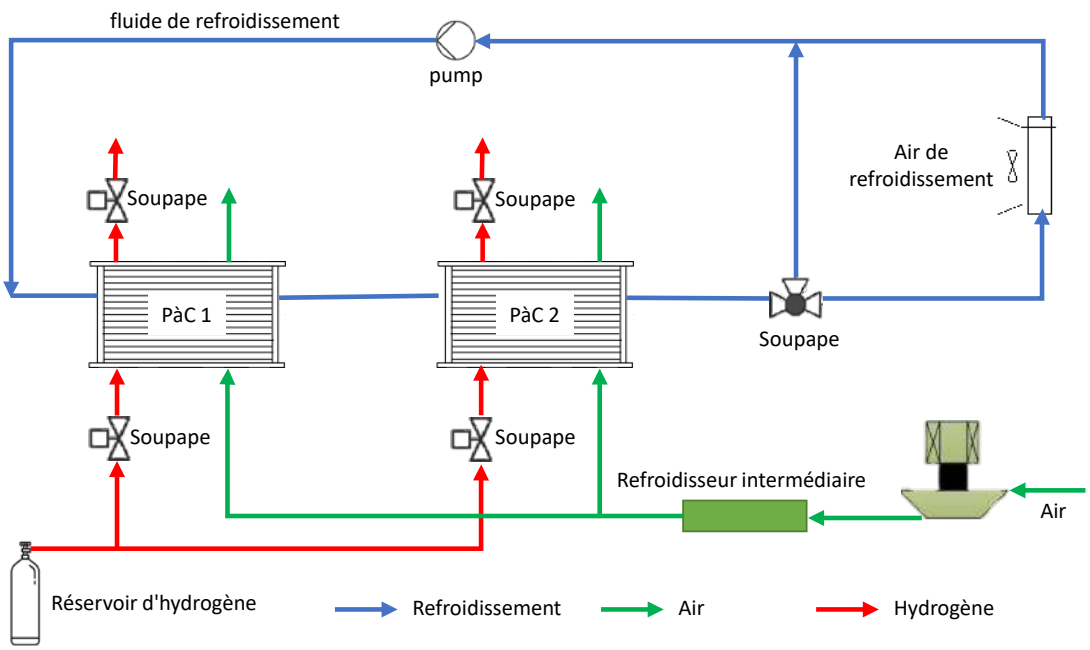

Figure 3-3: Schéma de principe d'un système de refroidissement de piles à combustible

3.6.2. Préchauffage

La recherche présentée dans ce travail comprend deux situations. La première situation est le processus de préchauffage, la deuxième situation est le processus de refroidissement, la première situation a deux parties internes et la première situation est le préchauffage de la première pile à combustible. Le deuxième cas est le préchauffage du deuxième PàC.

Pendant le processus de chauffage et en fonction de la température PàC, une gestion thermique est recommandée. Avant de démarrer le VPàC, le PàC multi-stack était chauffé à $335\,K$. Pendant cette période, le processus est divisé en deux parties : Premièrement, le processus utilise l'énergie stockée dans l'SSE pour chauffer le premier PàC à $335K$. Pour le moment, SSE ne fournit que l'énergie nécessaire au processus. Le but de la première partie a été atteint et le processus de la seconde partie a commencé. Dans cette partie, la première pile à combustible démarre et commence à générer de l'énergie. Cette énergie est utilisée pour chauffer le deuxième PàC.

Dans cette partie, la premier PàC démarre et commence à générer de l'énergie. Cette énergie est utilisée pour chauffer le deuxième PàC. Dans cette partie, SSE ne fonctionnera pas. Quelle que soit l'énergie, seule la première PàC produira la puissance requise. Dans cette partie, l'eau de refroidissement agit comme un fluide de transport d'énergie. Elle utilise l'énergie absorbée lors du refroidissement de la première PàC pour chauffer la deuxième PàC, de sorte que le processus

de chauffage de la PàC à combustible soit plus rapide et que la consommation d'énergie soit plus importante. La température du deuxième PàC est de $335\,K$, le processus de chauffage se termine, puis le véhicule peut être démarré et le processus de refroidissement démarre également.

3.6.3. Refroidissement

Théoriquement, la PàC perdra 40% de l'énergie hydrogène sous forme d'énergie thermique, et afin de maintenir la température de fonctionnement de la PàC dans la plage requise, une partie de la chaleur doit être évacuée de la PàC, par conduction et convection et à travers le système de refroidissement. Dans le pratique, les petits PàC peuvent être refroidis par air, mais cela n'est pas efficace dans les piles PàC supérieures à $10\,kW$ (comme la PàC utilisée dans cette étude). Pour cette raison, l'eau est utilisée pour refroidir le système PàC multi-pack et contrôler sa température. Cette opération est illustrée à la Figure 3-3. L'eau de refroidissement circule dans le PàC en plusieurs parties via une pompe, l'eau de refroidissement absorbe l'énergie thermique des différents FC et la transfère au flux d'air froid à travers le ventilateur du radiateur.

3.7. Modèle thermique du système

Dans cette section, le développement d'un modèle non linéaire représentant le système PàC vise à faciliter la recherche de conception. En général, l'énergie générée par PàC peut être exprimée de deux manières différentes : la première est composée de l'énergie électrique P_{elc} et de l'énergie thermique P_{the} (représentée dans l'équation 3-1)) ; mais dans le second processus, l'énergie générée est l'énergie de réaction H_{rec} et $\dot{m}_{produit}$ est la quantité d'hydrogène consommé en débit molaire (indiqué dans l'équation (3-2)).

$$P_{tot} = P_{elc} + P_{the} \tag{3-1}$$

$$P_{tot} = \dot{m}_{hydrogen} * H_{rec} \tag{3-2}$$

$$\dot{m}_{hydrogen} = \frac{i}{2 * F} * n_{cell} \tag{3-3}$$

$H_{rec}(285{,}5\ kJ/mol)$ est l'enthalpie de combustion de l'hydrogène, F est la constante de Faraday avec une valeur de $96{,}485\frac{C}{mol}$, n_{cell} est le nombre de cellules dans le PàC, et i est le courant de fonctionnement du carburant cellule. L'énergie électrique générée par la pile à combustible P_{elc} est évaluée comme :

$$P_{elc} = i * v_{cell} * n_{cell} \quad (3\text{-}4)$$

L'utilisation de la tension de batterie v_{cell} et sa définition sont basées sur les quatre termes suivants [167,168]: potentiel thermodynamique E, perte d'activation v_{act}, perte ohmique v_{ohm} et perte de concentration v_{conc}.

$$v_{cell} = E - v_{act} - v_{ohm} - v_{conc} \quad (3\text{-}5)$$

Mais dans ce travail, la tension de fonctionnement de la pile à combustible v_{cell} est calculée par une autre équation, qui est basée sur les données expérimentales d'une PàC de la mark FCvelocity 9SSL 21 kW montrées dans le Tableau 3-1. La nouvelle équation est :

Tableau 3-1: Conditions de travail de la pile à combustible [60]

$I_{PàC}$	$V_{PàC}$	$P_{PàC}$	$\dot{v}_{coolant}$	T_{in}	T_{out}	$Q_{coolant}$
[A]	[V]	[W]	[l/s]	[K]	[K]	[W]
15	94.27	1414	0.15	333.15	334.15	521.95
30	90.75	2722	0.16	333.15	336.15	1722.45
60	86.68	5200	0.18	333.15	339.15	3789.39
120	81.62	9794	0.20	333.15	340.15	4863.05
180	78.65	14157	0.21	333.15	341.15	6113.55
240	75.13	18031	0.24	333.15	341.15	6724.9
300	70.30	21219	0.26	333.15	343.15	9246.74

$$v_{cell}(i) = a\, i^3 + b\, i^2 + c\, i + d \quad (3\text{-}6)$$

Parmi eux, a, b, c et d sont calculés et fixés comme suit à l'aide de l'outil d'ajustement de courbe dans MATLAB et selon les valeurs de mesure expérimentales indiquées dans le Tableau 3-1:

$a = -1.5e^{-8}, b = 8.6e^{-6}, c = 0.002, d = 0.88$

Selon les travaux de [62,158], le modèle thermique est affecté par l'énergie stockée, qui est exprimée par la température PàC, P_{stoc}, la chaleur latente P_{lat} et l'énergie échangée entre PàC et carburant. L'environnement extérieur généré par la convection naturelle P_{loos}, l'énergie extraite

par l'eau de refroidissement $P_{cooling}$ et l'énergie absorbée par la pile à combustible lors de l'opération de chauffage $P_{heating}$, qui sont tous exprimés dans les équations présentées ci-dessous :

$$P_{the} = P_{stoc} + P_{lat} + P_{loos} + P_{cooling} - P_{heating} \tag{3-7}$$

$$P_{stoc} = M_{fc} * Cp_{fc} * \frac{dT_{fc}}{dt} \tag{3-8}$$

$$P_{lat} = \dot{m}_{H2O_pro} * H_{lat} \tag{3-9}$$

$$P_{loos} = K_{fc} * A_{fc} * \left(T_{fc} - T_{atm}\right) \tag{3-10}$$

$$P_{cooling} = \dot{m}_{H2O_cooling} * Cp_{H2O} * (1 - e^{c}) * \left(T_{fc} - T_{H2O_{in}}\right) \tag{3-11}$$

D'après [62,169] et sur la base de l'empilement Ballard Mark V, M_{fc} et Cp_{fc} sont respectivement la masse et la chaleur spécifique du FC. (8,25 $kJ\ /\ kg\ K$) est utilisé pour Cp_{fc}, M_{fc} est utilisé pour le poids du premier PàC soit 7 kg, et le poids du deuxième FC est 17 kg. A_{fc} et K_{fc} sont la surface extérieure (m^2) de l'empilement pile à combustible, et le coefficient de transfert de chaleur par convection et sa valeur sont d'environ 10 W/m^2K.

$\dot{m}_{H2O_pro}$ est la quantité d'eau produite par PàC après la réaction, et H_{lat} est la quantité de chaleur latente de vaporisation de l'eau produite. $\dot{m}_{H2O_cooling}$, Cp_{H2O} et $T_{H2O_{in}}$ sont le débit de refroidissement à l'entrée de la cheminée PàC, la capacité calorifique du liquide de refroidissement et la température de l'eau de refroidissement. Pour plus d'informations sur c et l'équation, voir l'annexe.

Grâce à la combinaison de (3-4) à (3-7), le bilan énergétique peut s'écrire :

$$M_{fc} * Cp_{fc} * \frac{dT_{fc}}{dt} = P_{tot} + P_{heating} - P_{elc} - P_{lat} - P_{cooling} - P_{loos} \tag{3-12}$$

Dans ce travail, la recherche comprend le chauffage et le refroidissement. Il y a deux parties dans le chauffage. L'équation (3-12) est exprimée sous trois formes différentes :

La première méthode pour moduler le chauffage de la pile à combustible grâce à l'alimentation en énergie de l'élément de stockage d'énergie :

$$\frac{dT_{fc}}{dt} = \frac{P_{heating} - P_{loos}}{M_{fc} * Cp_{fc}} \tag{3-13}$$

La seconde consiste à moduler l'échauffement du PàC par l'énergie générée par un autre PàC :

$$\frac{dT_{fc}}{dt} = \frac{P_{heating} + P_{cooling} - P_{loos}}{M_{fc} * Cp_{fc}} \tag{3-14}$$

Le troisième mode de fonctionnement de la modulation PàC :

$$\frac{dT_{fc}}{dt} = \frac{P_{tot} - P_{elc} - P_{lat} - P_{cooling} - P_{loos}}{M_{fc} * Cp_{fc}} \tag{3-15}$$

Le changement d'énergie thermique associé au gaz chauffé dans la pile à combustible est estimé à partir de la différence d'énergie thermique entre le gaz entrant dans la pile à combustible et le gaz sortant de la pile à combustible, car il a peu d'effet sur le refroidissement de la cheminée.

3.8. Résultats et analyse

La température dynamique de la PàC multi-stack est donnée par la solution des équations ((3-13), (3-14) et (3-15)). Pour cette raison, un modèle SIMULINK a été préparé dans MATLAB R2014b pour étudier l'efficacité du système. Cette section décrit les résultats obtenus.

3.8.1. Étude Comparative

Les résultats de l'étude comparative entre les deux cas sont donnés : le premier cas est de chauffer le système PàC multi-pack en fonction de la méthode de chauffage suggérée et le second cas est de chauffer une seule pile à combustible (la caractéristique est présentée dans Tableau 3-2). Le niveau de puissance de sortie équivaut à une pile à combustible multi-pack ; la différence entre le chauffage du système proposé et le chauffage du système debout peut être présentée ; l'étude utilise 500W de puissance de chauffage pour différentes températures extérieures.

Tableau 3-2: Paramètres de la pile à combustible

	PAC 1	PAC 2	PAC STANDARD
Nombre de cellules	20	110	130
Masse [kg]	6.85	16.75	18.93
Longueur [mm]	91	306	375
Largeur [mm]	760	760	760
Hauteur [mm]	60	60	60
Puissance [kW]	5.3	29	34.2
Surface active [cm^2]	285.5	285.5	285.5

3.8.1.1. Energie

La Figure 3-4 montre l'énergie fournie par l'SSE pour le système PàC chauffé dans deux situations. Les résultats montrent que l'énergie consommée dans les deux situations est différente, en particulier lorsque la température ambiante est basse. Température = 318,15 K. Selon le système proposé, le système nécessite $8000\,J$ de chaleur pour chauffer le PàC multi-pack, tandis que le recours à la méthode standard nécessite $24500\,J$. Pour une température ambiante de $T_{atm} = 298{,}15\,K$, sur la base du système proposé, le système nécessite $21000\,J$ pour chauffer la PàC multi-pack, tandis que la méthode standard nécessite $73500\,J$.

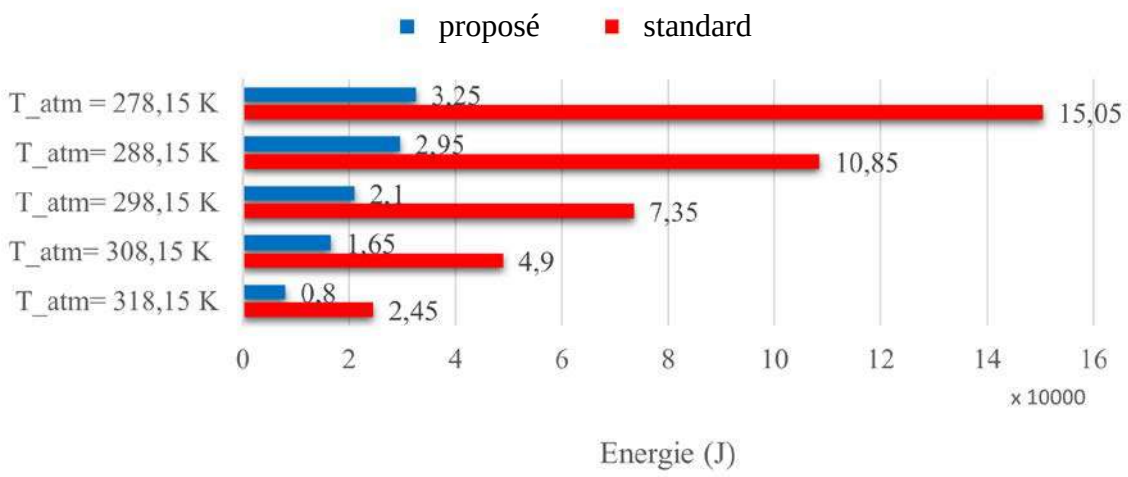

Figure 3-4: Energie fournie par l'ESS pour chauffer le système PàC

Pour le système proposé, à une température ambiante de $T_{atm} = 278{,}15\,K$, le système nécessite $32500\,J$ pour chauffer le PàC multi-pack, tandis que l'utilisation de la méthode standard nécessite $150500\,J$. Cette différence est due à la taille de la PàC chauffée. La valeur indiquée ci-dessus représente le niveau d'énergie fourni par l'SSE au système pendant le processus de chauffage. Veuillez noter que la valeur de consommation d'énergie PàC et le chiffre (La valeur illustré en Figure 3-4) ne représente pas toute l'énergie consommée par le système de chauffage, mais le système chauffe uniquement l'énergie consommée par le premier PàC, c'est-à-dire la source de l'énergie restante consommée pour terminer le chauffage du second PàC dans un multi -package PàC system C'est le premier PàC, ce qui est l'avantage de ce travail car il va permettre de réduire significativement la taille de l'SSE.

3.8.1.2. Temps

La Figure 3-5 montre le temps nécessaire pour chauffer l'ensemble du système de PàC dans deux conditions. À une température ambiante de $T_{atm} = 318{,}15\,K$, sur la base du système proposé, le système nécessite 46 secondes pour chauffer le PàC multi-pack, contre 49 secondes en utilisant la méthode standard. Pour une température ambiante de $T_{atm} = 298{,}15\,K$, basée sur le système proposé, le système nécessite 137 secondes pour chauffer le PàC multi-pack, tandis que la méthode standard nécessite 147 secondes. Pour le système proposé, à une température ambiante de $T_{atm} = 278{,}15\,K$, le système nécessite 375 secondes pour chauffer le PàC multi-pack, tandis que le recours à la méthode standard nécessite 301 secondes.

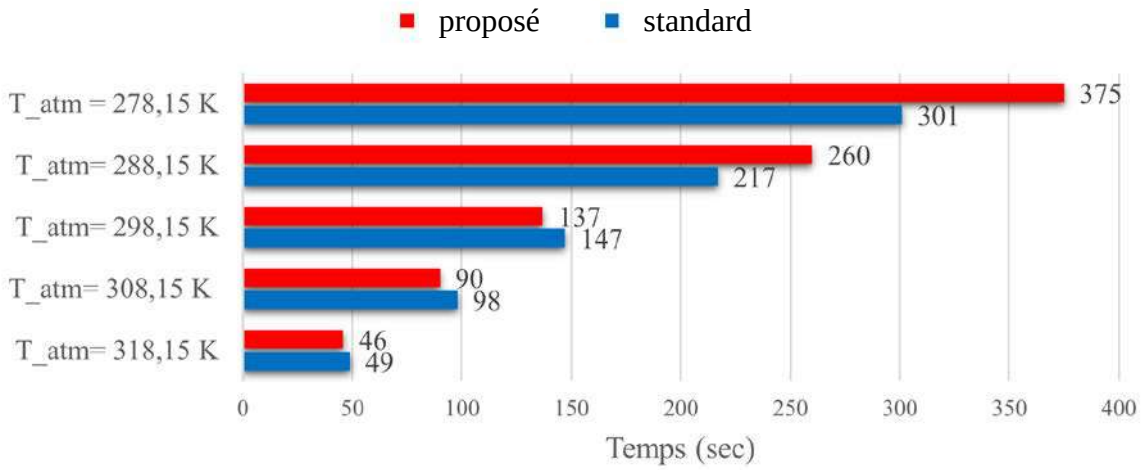

Figure 3-5: Temps nécessaire pour chauffer le système PàC

On peut voir que le temps nécessaire pour chauffer le système de PàC à une température ambiante inférieure est plus long que le temps nécessaire pour chauffer à une température ambiante plus élevée, et la vitesse de chauffage varie avec la température ambiante. Les résultats

montrent également qu'en comparant le temps de chauffage d'un PàC multi-pack et d'un PàC standard, il varie avec la température ambiante. Veuillez noter que la vitesse de chauffage du PàC standard est plus rapide que celle du PàC multi-pack à un température inférieure. La vitesse de chauffage du PàC multi-pack est plus rapide. Lorsque la température ambiante est plus élevée, par rapport à la configuration standard PàC, cela peut s'expliquer par le fait qu'à une température ambiante plus basse, l'échange thermique avec l'atmosphère gaspiller plus d'énergie, en particulier lorsque la zone d'échange du PàC multi-pack est plus grande que la surface du PàC standard lors de l'échange de chaleur.

3.8.2. Processus de chauffage

Le processus de chauffage du PàC multi-pack sous la température ambiante de $T_{atm} = 298{,}15\,K$ en utilisant le système proposé est illustré. Le processus de chauffage PàC en plusieurs parties est divisé en deux étapes

3.8.2.1. Première étape

La première étape consiste à utiliser $500\,W$ de puissance (illustré à la Figure 3-6) pour chauffer le premier PàC du système. Cela prend environ 46 secondes Pendant cette période, le Fibre Channel obtient une puissance constante de $500\,W$.

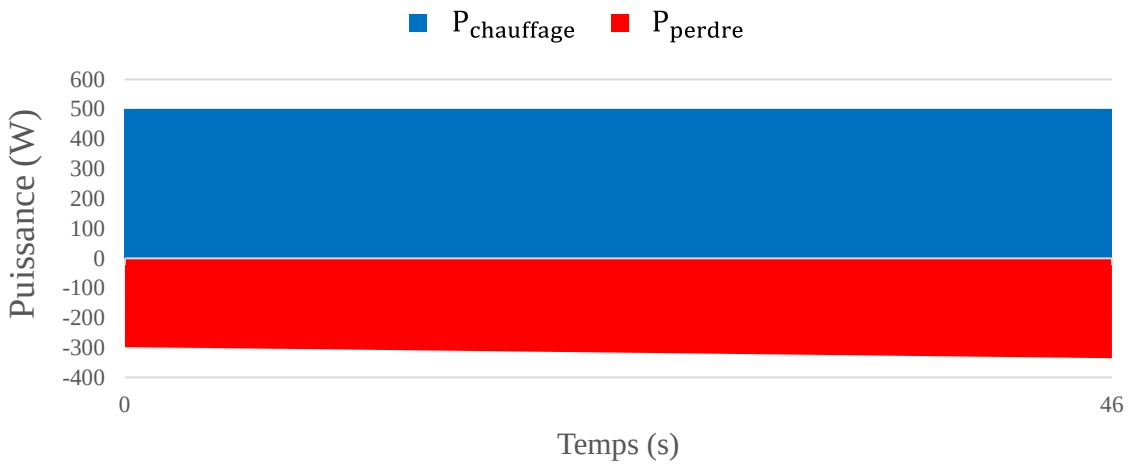

Figure 3-6: Bilan énergétique de la première PàC

En raison de l'échange thermique avec l'environnement extérieur, la PàC perd environ $300\,W$ en raison de la différence de température. La valeur de l'énergie gaspillée est très importante car elle représente plus de la moitié de l'énergie reçue par le PàC. Cela peut nous inciter à suggérer d'ajouter une isolation à la périphérie du PàC, mais cela affaiblira le refroidissement naturel du PàC (par convection de chaleur naturelle) et augmentera les coûts de refroidissement. Le

processus de chauffage de la première PàC se poursuit jusqu'à ce que sa température atteigne $335\ K$, puis entre dans la deuxième étape. À ce stade, la première PàC fonctionne et l'énergie qu'elle génère est utilisée pour chauffer la deuxième PàC.

3.8.2.2. Deuxième étape

La Figure 3-7 montre le bilan énergétique subi par le premier FC pendant le processus de chauffage du second PàC. À ce stade, la première PàC fonctionne et commence à produire l'énergie nécessaire pour chauffer la deuxième PàC et démarrer la pompe à eau de refroidissement. À ce stade, afin de maintenir la température du PàC dans la plage souhaitée, le liquide de refroidissement doit fonctionner. Par conséquent, l'eau est utilisée comme liquide de refroidissement avec un débit constant de $0{,}2\ l\ /\ sec$, de sorte que l'énergie perdue lors du processus de refroidissement du premier PàC est clairement indiquée en rouge sur la Figure 3-7.

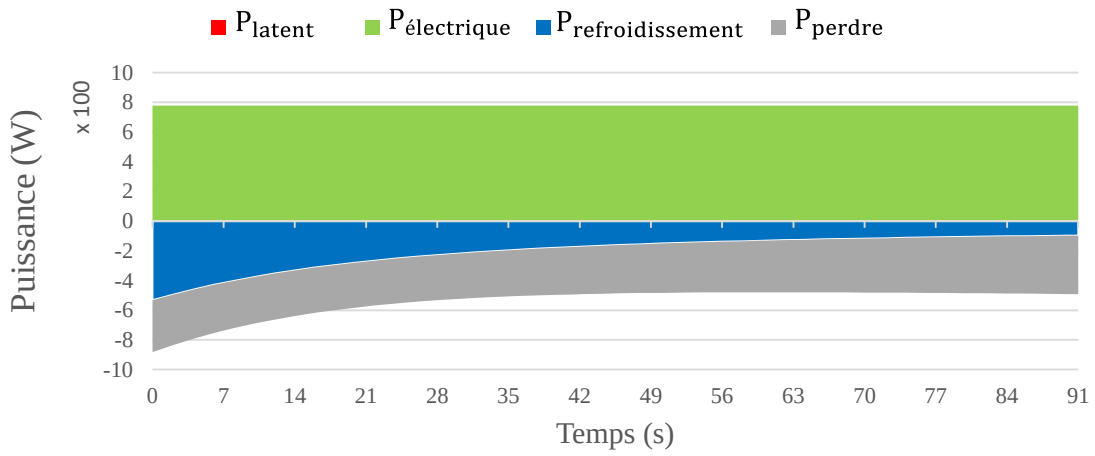

Figure 3-7: Bilan énergétique de la première PàC dans la deuxième partie du chauffage

Les résultats montrent également que le refroidissement naturel se produit dans les PàC sous diverses formes, dont la plus importante est le refroidissement par convection utilisant des milieux externes, qui est plus important que le refroidissement par eau à certains stades. Lorsque le résultat de l'analyse est que l'énergie absorbée par l'eau de refroidissement diminue avec l'écoulement du processus de chauffage, cela est causé par l'augmentation de la température de l'eau de refroidissement et l'augmentation de la température du liquide de refroidissement est due à l'eau de refroidissement afin d'utiliser l'énergie absorbée par le liquide de refroidissement. En chauffant le deuxième PàC, le ventilateur du radiateur ne le refroidira pas intentionnellement.

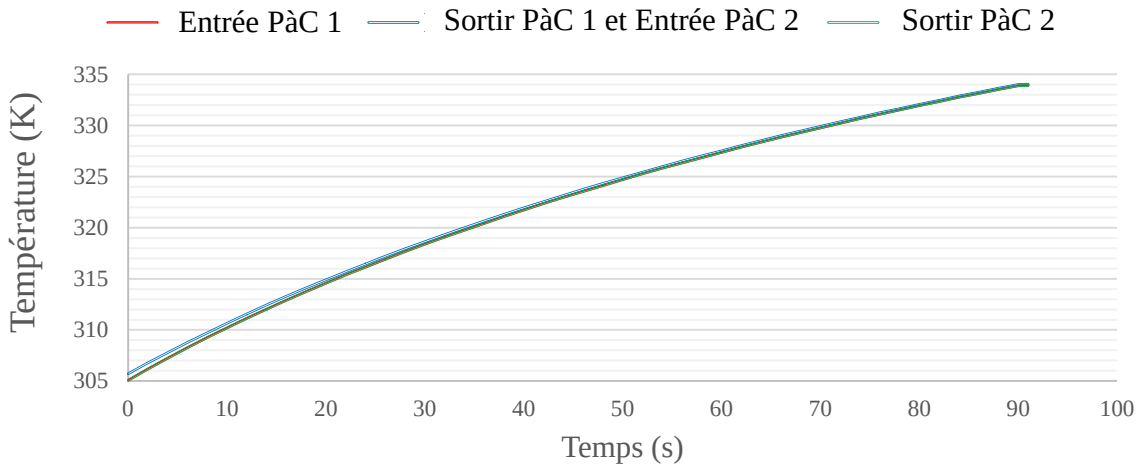

Figure 3-8: Température de l'eau de refroidissement

Dans la deuxième partie, comme le premier PàC, la puissance cible du deuxième PàC pendant le processus de chauffage est de $500\,W$ (Figure 3-9) ; en tant que source d'énergie supplémentaire, le deuxième PàC bénéficie de l'absorption du liquide de refroidissement du première PàC Ceci réduit le temps nécessaire pour chauffer le second PàC à $T_{fc} = 335\,K$, soit environ $91\,s$.

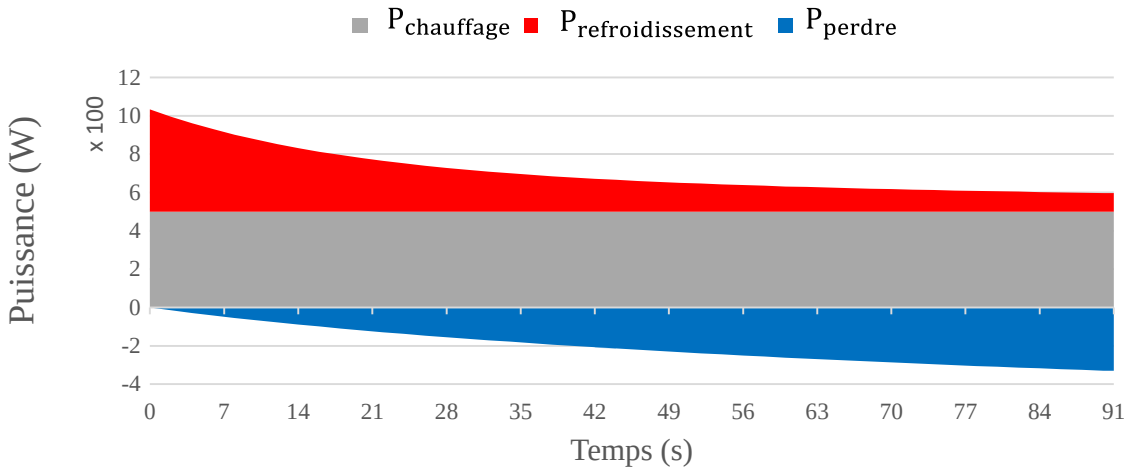

Figure 3-9: Bilan énergétique de la deuxième PàC

3.8.3. Processus de refroidissement

La deuxième partie de la recherche consiste à étudier l'efficacité du système de refroidissement pendant le fonctionnement du PàC multi-pack et sa capacité à maintenir la température du PàC multi-pack dans le champ idéal. Pour atteindre une efficacité de travail plus

élevée. Par conséquent, plusieurs groupes de PàC fonctionnent à des courants différents (comme le montre la Figure 3-10).

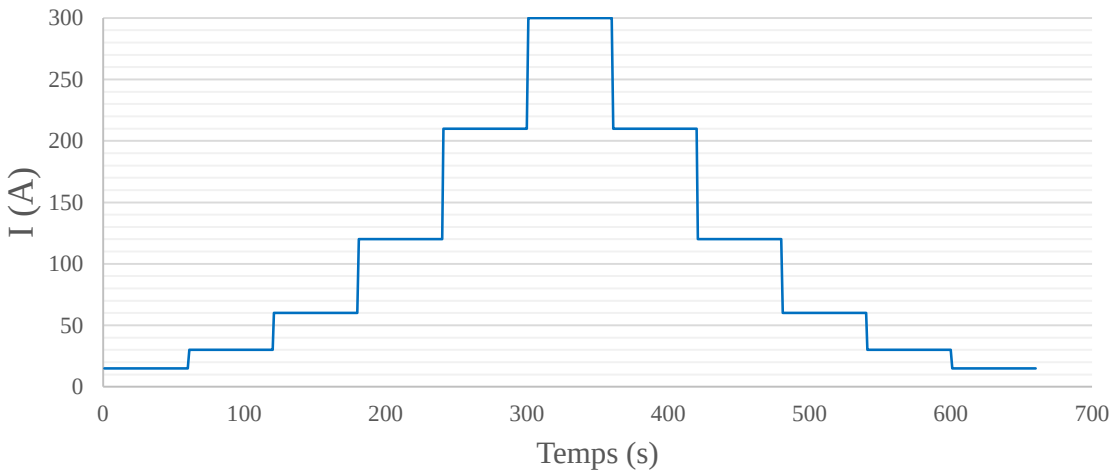

Figure 3-10: Courent électrique

La Figure 3-12 montre le changement de température du PàC constituant le système. Les résultats montrent que sous un même courant, chaque PàC a une différence de température par rapport à l'autre PàC, en particulier la température du second PàC est toujours supérieure à la température du premier PàC, ce qui est principalement dû à la quantité d'hydrogène consommée par chaque PàC et pendant le fonctionnement.

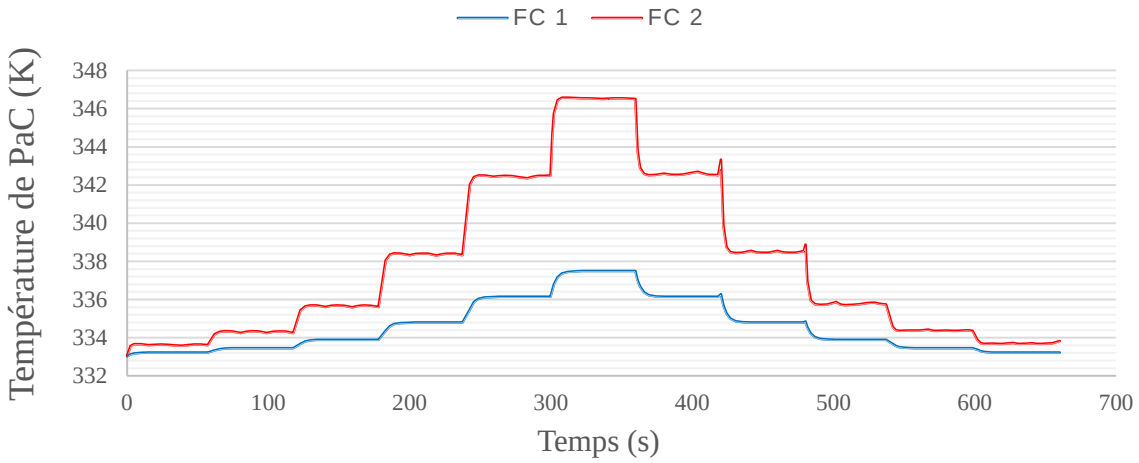

Figure 3-11: Température de PàC

Afin de générer le même courant, chaque PàC consomme différentes quantités d'hydrogène, et fondamentalement le deuxième PàC consomme plus d'hydrogène que le premier PàC. Cela est dû au nombre de batteries dans chaque PàC. Le PàC contient 20 cellules., Le second Le PàC

contient 110 cellules, par conséquent, la quantité d'hydrogène consommée produit plus de chaleur, donc la température du PàC est plus élevée.

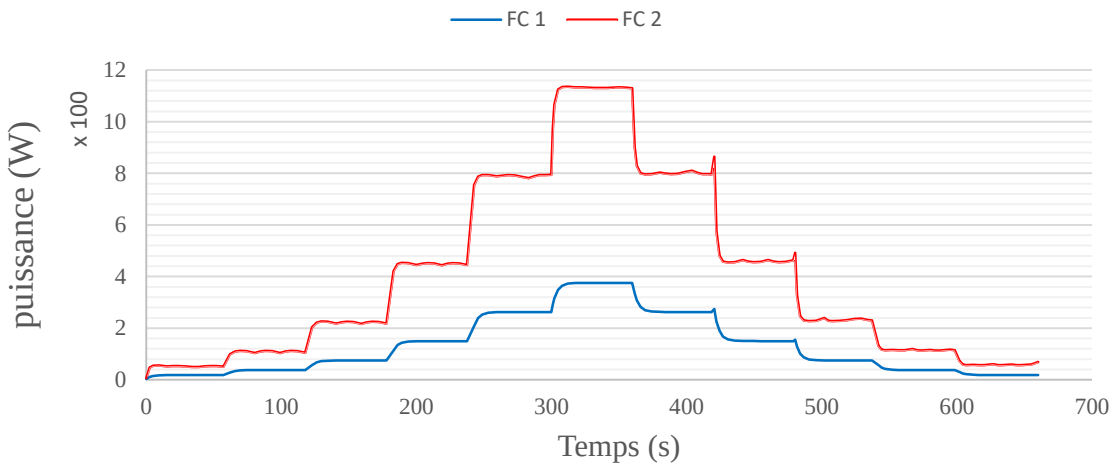

Figure 3-12: Puissance produit par les PàCs

Sur la Figure 3-13, les changements de température du liquide de refroidissement à la sortie du premier PàC et à la sortie du deuxième PàC sont représentés. Lorsque le PàC multi-pack est en marche, le liquide de refroidissement circule dans le premier PàC à une valeur constante de $0{,}2\ l\ /\ sec$, puis circule dans le second PàC pour simuler l'effet du ventilateur du radiateur, c'est-à-dire que la température du liquide de refroidissement est en le premier PàC L'entrée d'un PàC est considérée comme $333{,}15\ K$, et l'entrée du second PàC est considérée comme égale à la température du liquide de refroidissement à la sortie du premier PàC.

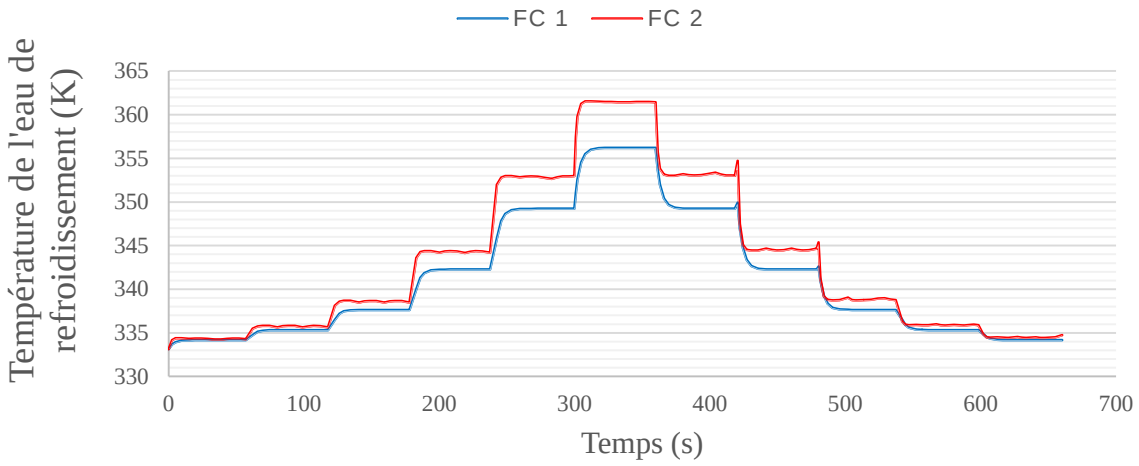

Figure 3-13: Température de l'eau de refroidissement

On peut voir que lorsque le courant généré par le PàC augmente, la température du liquide de refroidissement augmente également. Compte tenu du résultat illustré à la Figure 3-13, il s'agit

d'une séquence logique. Plus la température est élevée, plus la température de le PàC Lorsqu'il monte, plus la différence de température entre le liquide de refroidissement et le PàC est grande, ce qui signifie que le liquide de refroidissement absorbe plus d'énergie, ce qui fait monter la température du liquide de refroidissement.

3.9. Conclusion

Dans ce chapitre, un système a été proposé qui vise à chauffer le PàC avant de faire fonctionner le véhicule et à maintenir la température du PàC dans une plage souhaitée après son fonctionnement. Dans certains cas, cette approche a réduit à environ un cinquième l'énergie fournie par l'SSE pour chauffer la PàC. Pour une température ambiante de $T_{atm} = 278{,}15\,K$, l'énergie consommée pour chauffer le PàC multi-pack est réduite de $150500\,J$ selon la méthode standard à $32500\,J$ selon le système proposé. Le même système prouve la vitesse du processus de chauffage de la pile à combustible, amenant la PàC dans la plage de température requise et faisant fonctionner le véhicule en seulement 6 minutes. De plus, l'efficacité du système de refroidissement lors de l'utilisation du véhicule dans des conditions sévères a été étudiée, et les résultats ont montré que le système a réussi à maintenir la température de la PàC dans la plage idéale.

Chapitre 4. Gestion et optimisation d’énergie dans le tramway de Ouargla

4.1. Introduction

Le transport ferroviaire est devenu le mode de transport le plus répandu dans le monde. De plus, les tramways sont l'un des moyens de transport ferroviaire les plus populaires en raison de leurs nombreux avantages. En bref, il est très utile pour les gens de l'utiliser pour échapper au trafic. En outre,

Ce chapitre une étude de comparaison entre défirent stratégie de gestion d'énergie est fait pour le tramway de Ouargla. Dans un premier temps, nous préciserons la définition et les différents modes de transport ferroviaire. Ensuite, nous définirons le tramway et son contexte historique. Ensuite, nous verrons comment fonctionnent le tramway et ses composants. Nous nous sommes ensuite penchés sur les différents modèles de tramway de la famille Citadis. Enfin, nous terminerons le chapitre avec les avantages et les facilités que les installations de tramway offrent aux personnes

4.2. Informations générales sur le transport ferroviaire

Le transport ferroviaire est un système de transport guidé, constitué d'une infrastructure appelée ligne de chemin de fer, servant au transport de passagers et de marchandises. Il s'agit par définition d'un transport collectif dont le fonctionnement et les horaires étaient à l'origine très réglementés par l'État. Son influence sur l'urbanisme est importante car c'est un élément essentiel de l'aménagement du territoire. Surtout, il est peu coûteux, plus sûr et plus économe en énergie [170].

Le système ferroviaire comprend :

4.2.1. Train

C'est un moyen de transport composé d'un ensemble de voitures tractées par une ou plusieurs locomotives rattachées à un même convoi et qui circulent sur une voie formée de deux files parallèles de rails. Il existe plusieurs types de trains : train de véhicules, train mixte, train omnibus, train semi-direct et train pendulaire [171].

4.2.2. Trains à grande vitesse (TGV)

TGV (Train à Grande Vitesse) ce sont des trains qui roulent à plus de $250\,km/h$ principalement sur des voies dédiées et avec des véhicules spécialisés.

4.2.3. Métro

C'est une voie ferrée urbaine souterraine le plus souvent, sur viaduc parfois, rarement au sol, elle est conçue pour constituer un réseau permettant le transport d'un grand nombre de voyageurs

au sein d'une agglomération. Au moyen de véhicules sur rails à commande extérieure, dans un espace totalement ou partiellement dans un tunnel et entièrement réservé à cet usage. Ce mode de transport est guidé sur son propre site complet, sans croisement avec aucun autre mode de transport ou accès piéton [172].

4.2.4. Tramway

C'est un moyen de transport public urbain ou interurbain circulant sur des voies ferrées équipées de rails plats et qui est installé en site propre ou encastré à l'aide de rails à gorge dans le réseau routier, il est généralement à traction électrique [173] .

4.3. Informations générales sur le tramway

Le tram est un transport ferroviaire qualifié aux nombreuses vertus positives, il est sans aucun doute devenu l'un des systèmes de transport public les plus adaptés aux villes du monde entier.

Le tramway circule sur une voie ferrée plate et généralement à traction électrique, principalement utilisée pour le transport urbain. Le mot Tramway désigne une ligne ferroviaire formée de 2 rails parallèles sur lesquels circulent des véhicules à roues en acier assurant un service de transport urbain de voyageurs. Puis, par extension, le véhicule de transport à traction électrique circulant sur ces rails, souvent encastrés dans la chaussée [174].

4.3.1. Premiers tramways électriques

Lors de l'exposition industrielle de Berlin en mai 1879, Siemens expérimente le premier tramway électrique. En mai 1881, Siemens et Halske mettent en service le premier tramway électrique au monde à Gross Lichtervelde, près de Berlin sur une longueur de 2,5 km. Il est exploité par de petites motrices à quais ouverts de 26 places sous une tension de 1000 volts fournie par les 2 rails. Le moteur placé sous la caisse actionne les essieux par câbles. La vitesse atteinte est de 40 km/h [175].

En parallèle, un tramway électrique à accumulateurs est en test à Paris entre Montreuil et la place de la Nation. Au printemps de la même année, lors du Salon de l'électricité à Paris, Siemens et Halske expérimentent leur premier tramway électrique à prise aérienne sur une ligne d'environ 500 mètres reliant la place de la Concorde au Palais de l'Industrie qui occupe le site du Grand Palais. Dès 1883, les premiers tramways électriques apparaissent en service régulier à Vienne, Francfort-sur-le-Main et Offenbach.

A partir de ces années, le tramway électrique va se développer rapidement au niveau mondial. En 1888, 33 lignes nouvelles s'étendent sur 210 km, exploitées par 265 voitures [171,172] .

4.3.2. Principe de fonctionnement du tramway

Les tramways sont généralement conçus pour fonctionner sur un courant continu de 750 volts. Leurs capacités d'accélération et de décélération leur permettent d'offrir des temps de parcours attractifs tout en desservant un maximum de gares. Les tramways ont une vitesse maximale de 80 km/h

Afin de transporter le courant (750 V DC), des lignes aériennes de contact (OCL) sont utilisées. Les OCL sont ancrés à des poteaux qui délimitent la plate-forme. Sur ces OCL, le pantographe du tram va frotter afin de lui fournir l'électricité nécessaire à son déplacement. Le pantographe est monté sur le toit du tram. Il est chargé de collecter le courant qui alimente le tramway [173].

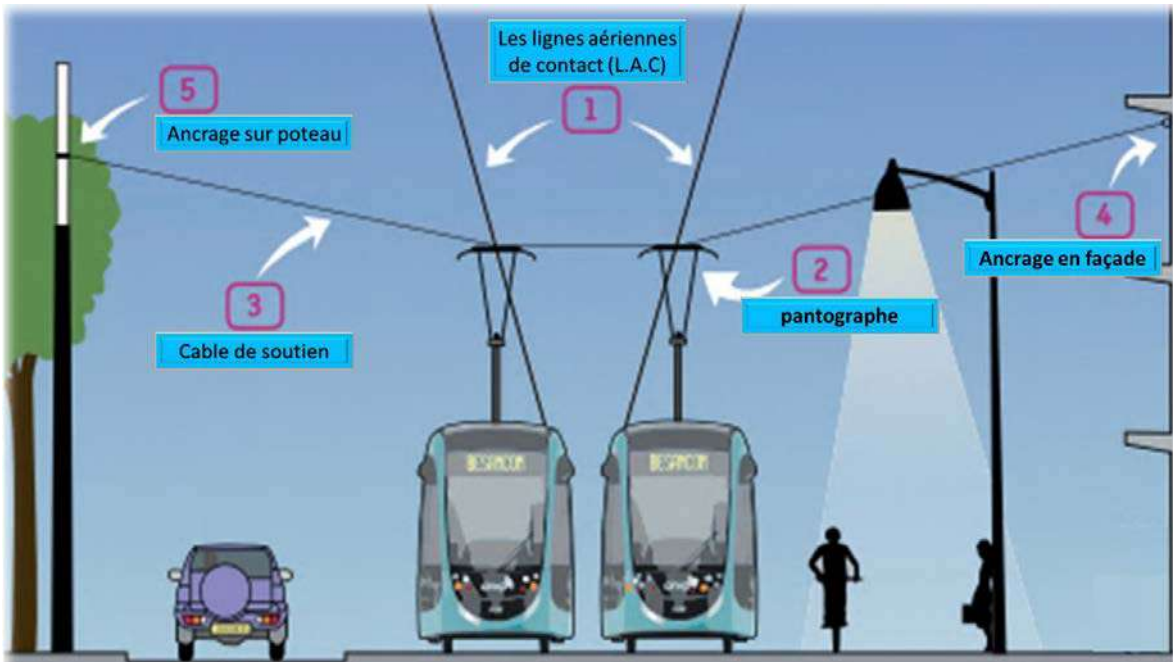

Figure 4-1: Matériels fixes de tramway

4.3.3. Composants de tramway

Le tramway, comme les transports en commun de chantier spécifiques, nécessite une infrastructure et un mode de fonctionnement particuliers [174].

4.3.3.1. Matériel fixe

Les matériaux fixes sont en production de l'énergie de traction moderne et La voie ferrée Ensemble production de l'énergie de traction moderne.

- La voie ferrée : il se compose des éléments suivants : Rail, système de fixation, joint isolant, appareil de dilatation, appareil de voie.

- Ensemble production de l'énergie de traction moderne : Le système de traction électrique comprend trois systèmes suivants : Sous-stations, Sous-système caténaire, ligne aérienne de contact, alimentations par le Sol (APS), Sous-système SCADA.

4.3.3.2. Matériel roulant

Il comprend tous les véhicules, moteurs ou remorques, conçus pour se déplacer sur le rail. Ils sont comme suit :

- Les composants de la rame : La rame du tramway est de type bidirectionnel, elle comporte les composants suivants : Cabine de la conduite - Cabine motrice - Nacelle motorisée - Nacelle porteuse – Caisse suspendue.
- Les pièces utilisables : Bogies, Moteurs, Appareillage, Convertisseurs auxiliaires, Transformateurs de traction Systèmes d'alimentation Carboni, Amortisseurs Dispen.

4.3.4. Avantages du tramway

Le tramway s'inscrit dans une grande attention en faveur du développement durable, de l'amélioration de la qualité de vie, de l'environnement et de la facilité de déplacement pour les habitants de manière rapide et dans des conditions plus confortables.

Les tramways sont précis et réguliers, et ont une capacité d'embarquement supérieure à celle des bus, où cette possibilité de grandes longueurs permet, à coût de roulage égal, d'offrir un débit allant jusqu'à 7 000 passagers par heure et par sens, soit 3 à 4 fois supérieur à celui d'une ligne exploitée par des véhicules routiers articulés.

Le tramway électrique ne pollue pas l'atmosphère : La pollution atmosphérique est déportée vers le lieu de production d'électricité, et réduite lorsqu'elle est produite par des sources propres [173].

4.3.5. Coûts du tramway

L'entretien et la maintenance sont lourds du fait d'une infrastructure importante

Un tramway ne peut pas contourner les obstacles. Un petit obstacle peut donc bloquer la circulation du tramway.

En cas de manifestations publiques (défilés politiques, grèves, etc.), le tram s'avère être une cible privilégiée pour être facilement bloqué, causant des désagréments importants (contrairement aux bus).

Le coût d'investissement est élevé par rapport au bus qui peut aussi être conçu sur son propre site.

La construction des infrastructures nécessite des travaux qui gênent les riverains et la circulation.

Les travaux de mise en place des infrastructures nécessaires au tramway nécessitent de repenser l'aménagement des espaces publics et sa répartition. L'espace occupé par l'automobile est généralement réduit. Les commerçants du centre-ville peuvent craindre que leurs clients les quittent pour des zones commerciales périphériques, qui disposent de grands parkings. En réalité, ces contraintes sont généralement utilisées pour réhabiliter les centres-villes et les rendre plus attractifs et dynamiques.

La vitesse est lente par rapport au métro et le débit est moindre : autour de 7000 passagers par heure au maximum contre plus de 12000 pour le métro.

Les rails creux sont dangereux pour les cyclistes lorsqu'ils partagent la même chaussée que le tramway. Cet inconvénient peut être pratiquement éliminé en insérant un élastique dans la gorge

4.4. Tramway de Ouargla

4.4.1. Présentation de la société d’exploitation

La SETRAM est issue d'une convention entre la Société du Métro d'Alger, et la Régie Autonome des Transports de Paris.

Par ailleurs, la SETRAM exploite et entretient des lignes de tramway en Algérie. Actuellement, elle exploite toutes les lignes de tramway en Algérie, avec son siège à Alger. L'entreprise exploite six lignes de tramway dans six États (Figure 4-2) et vise à rendre le transport par tramway plus populaire dans le pays [175].

De plus, la SETRAM vise à :

- Offrir un service de transport de qualité où la sécurité, le confort, la régularité et la propreté sont essentiels ;
- Accompagner les Algériens dans la phase d'adaptation à ce nouveau mode de transport et l'ancrer dans leurs habitudes de déplacement ;
- Se positionner comme une référence en Afrique et dans le monde.

Figure 4-2: Tramway en service [175]

4.4.2. Présentation de tramway d'Ouargla

L'unité d'Ouargla a été inaugurée le 20 mars 2018 et ce projet a été mis en œuvre dans le cadre du développement du secteur des transports sous la tutelle du ministère des Travaux publics et des Transports. Le tramway d'Ouargla a été le premier tramway du désert, conçu pour résister aux conditions climatiques difficiles liées à la proximité du désert.

La ligne de tramway Ouargla relie la vieille ville de Qasr (Sid Rouhou) et la nouvelle ville de Nasr City (station Chenine Kadour) à travers la nouvelle ville en plus de la nouvelle gare routière et passe à l'Université Kasdi Merbah, faisant du tram une ligne centrale de transport dans la ville [176].

Le tramway d'Ouargla est un système de transport en commun en site propre desservant la ville d'Ouargla, au sud de l'Algérie. Comprend une ligne à double voie d'une longueur d'environ 9,6 km et comporte 16 stations (au niveau de la chaussée de la voie). Cette ligne est empruntée par une flotte de rames Citadis 402 alimentées électriquement par une Lignes Aériennes de Contact (LAC). Le tramway d'Ouargla est équipé de 23 rames du type Citadis 402.

Figure 4-3: Vue générale de la ligne du tramway d'Ouargla

4.4.3. Caractéristiques du type de tramway Ouargla (Alstom Citadis 402)

Tramway Citadis 402 à plancher entièrement bas. Ils sont de type bidirectionnel [177]. Leur fonctionnement est dans une seule unité. Les véhicules sont climatisés et disposent de 5 portes doubles d'accès et 2 portes simples de chaque côté. De plus, toutes les portes sont équipées d'un seuil fixe en porte-à-faux avec une partie réglable pour limiter l'écart horizontal nominal au droit des portes afin de favoriser l'accessibilité aux personnes à mobilité réduite. Aussi, la longueur des véhicules est d'environ 44 m et sa capacité en passagers est de 320 personnes en charge normale. De plus, ce type de trains est constitué de 7 modules articulés reposant sur 4 bogies dont 3 moteurs. Les bogies moteurs sont notamment situés sous les caissons d'extrémité, appelés groupes moteurs 1 et 2 (M1 et M2), et un caisson intermédiaire appelé nacelle moteur (MN). Ensuite, le bogie porteur est installé sous l'un des caissons centraux appelé nacelle porteuse (CN). Enfin, entre chaque groupe moteur et les nacelles (groupe moteur et porteur) sont insérés des caissons suspendus [177].

Tableau 4-1: Caractéristique de tramway de type Citadis 402 [177]

Caractéristiques	Rames 402
Largeur d'une rame	$2{,}4\ m$
Longueur d'une rame	$44\ m$
Masse de rame	$54000\ kg$
Capacité maximale d'une rame (à 4 $passagers/m^2$)	230 places debout et 70 assises
Capacité maximale d'une rame (à 6 $passagers/m^2$)	345 places debout et 70 assises
Nombre de portes doubles par rame	10
Nombre de portes simples par rame	4
Largeur de passage des portes simples	$800\ mm$
Largeur de passage des portes doubles	$1300\ mm$
Accélération (performances contractuelles)	$1{,}09\,\frac{m}{s^2}$
Vitesse maximale du train (spécifications techniques)	$60\,\frac{km}{h}$
Moteur	$6 * 120\ kW\ =\ 720\ kW$

4.5. Consommation d'énergie par le tramway de Ouargla

4.5.1. Profile de conduire

Les tramways sont alimentés en énergie à partir d'une source centrale, où la consommation d'énergie peut être surveillée tout au long du trajet. Dans ce travail, il y a eu des tentatives pour obtenir la consommation instantanée d'énergie électrique par un tramway au hasard pendant son trajet depuis la station de départ jusqu'à la gare d'arrivée. L'objectif d'obtenir la consommation d'énergie est d'utiliser des données réalistes dans ce travail, mais malheureusement le processus n'a pas abouti.

Afin d'obtenir la consommation d'énergie du véhicule de tramway lors de son fonctionnement, il a été recouru à l'extraction d'un cycle de conduite du véhicule lors d'un trajet aléatoire et lors d'une journée de travail normale afin d'assurer la similitude des vitesses extraites avec le reste des autres jours.

Les résultant obtenue représente dans la Figure 4-4, Le trajet en tramway du début à la fin selon le cycle de conduite obtenu prend environ 1903 s, dont 413 s sont des arrêts à différentes

stations. La vitesse maximale atteinte par le tram est de $15\,m/s$ avec une vitesse moyenne pendant le trajet est d'environ $6.56\,m/s$. La valeur de l'accélération maximal est $0.4\,m/s^2$, et la valeur décélération maximal est de $0.5\,m/s^2$.

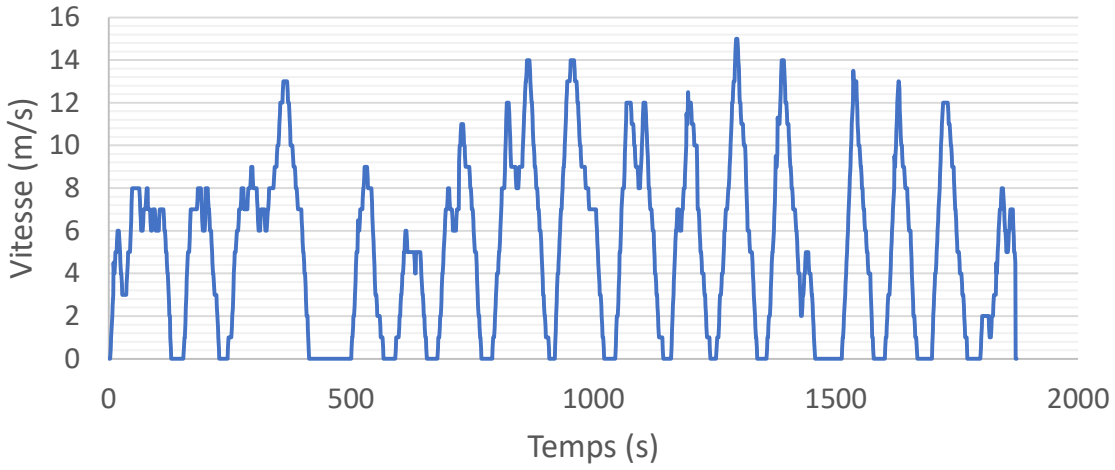

Figure 4-4: Profile de vitesse

4.5.2. Profil de charge de tramway Ouargla

La déterminions de profile de charge du tramway est basée sur l'Equation 2-16), et de Tableau 4-2. La Figure 4-5 représente le profil de puissance total consommée et produit par le tramway d'Ouargla, il dépende de la masse et la vitesse de tramway. Cette courbe a été le point de départ de la conception d'un système de tramway hybride.

En pouvez remarquer que les valeurs de puissance incluent des valeurs positives et négatives ; les valeur positives représente l'énergie consommée par le tramway, il attendre une valeur maximale $554\,kW$ avec une consommation moyenne de $144\,kW$; et les valeurs négatives représente les puissances récupérées par le système pendent le freinage et attendre une valeur maximale $552\,kW$.

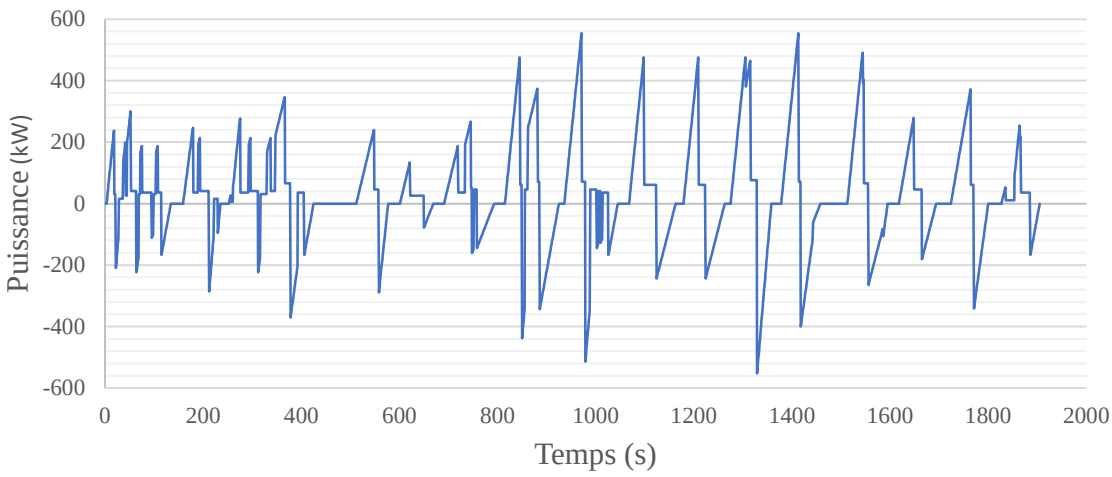

Figure 4-5: Profile de charge de tramway de Ouargla

Tableau 4-2: Caractéristique de tramway

Paramètre		Valeur
Accélération gravitationnelle	g	$9.8\ \frac{m}{s^2}$
Densité de l'air	ρ	$1.2\frac{kg}{m^3}$
Coefficient de résistance au roulement	f_r	0.014
Coefficient de traînée	C_d	0.3
La surface de zone avant	A_f	$1.746\ m^2$
La masse de SC	m_{SC}	$0.406\ kg$
Capacité spécifique de SC	$E_{SC,max}$	$5\ Wh/kg$
Puissance spécifique de SC	$P_{SC\ max}$	$12\ kW/kg$
Rapport (puissance / Masse) de PàC		$0.333\ kW/kg$
L'efficacité du convertisseur	$\eta_{\frac{B}{B}}$	0.95
Efficacité du convertisseur	η_{inv}	0.95
Efficacité du moteur électrique	η_m	0.95

4.6. Conception d'un tramway hybride

La configuration proposée du système hybride alimenté par PàC et de SC pour le tramway est illustrée sur Figure 4-6. Le système hybride est composé du PàC, du SC, du convertisseur CC / CC unidirectionnel, des convertisseurs CC / CC bidirectionnels, le système de gestion de l'énergie (SGE)

Le PàC est la principale source d'énergie de tramway. Il est connecté à un convertisseur CC / CC unidirectionnel élévateur pour augmenter la basse tension continue fournie par PàC. D'autre part, le SC sont utilisées comme système de stockage d'énergie (ESS) pour compléter la puissance de sortie du PàC lors de l'accélération de la voiture électrique et pour la récupération d'énergie lors du freinage. En particulier, en raison de sa réponse dynamique élevée et de sa puissance spécifique élevée, SC peut consommer une puissance de crête que ni le PàC ni la batterie ne peuvent stocker.

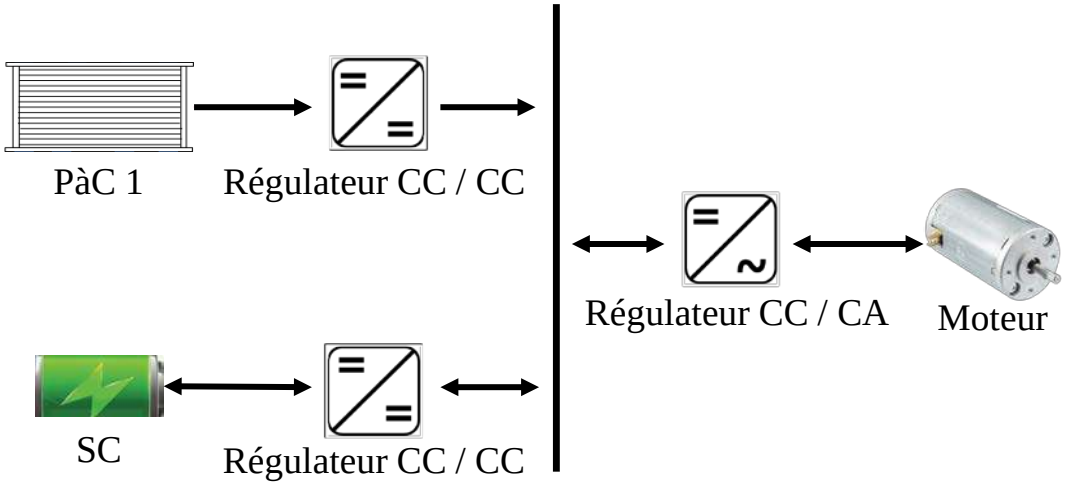

Figure 4-6: Configuration proposée du tramway hybride

4.6.1. Méthode de dimensionnement

La consommation énergétique du tramway se caractérise en général par le fait qu'elle se divise en deux parties principales, la première est l'énergie consommée par le moteur du tramway pour déplacer la voiture du premier point au deuxième point, et la deuxième partie est liée à la consommation d'énergie résultant de l'éclairage et de la climatisation et à l'énergie consommée pour faire fonctionner tous les autres appareils du tramway.

Dans cette étude, l'accent a été mis sur celle consommée par le moteur uniquement. L'autre partie de la consommation a été négligée. La raison de sa négligence est que nous suggérons qu'il

dispose d'une source d'alimentation distincte de la source principale qui alimente le moteur en puissance nécessaire.

Comme nous l'avons mentionné précédemment, le système proposé se compose de deux sources d'énergie, la première est la PàC et la seconde est les SC, la PàC sera la principale source d'alimentation, elle doit donc pouvoir fournir au moteur le maximum puissance avec laquelle il peut fonctionner, et sur cette base, l'Equation 4-1) a été proposé pour déterminer l'énergie maximale qu'une pile à combustible peut produire.

$$P_{dom,max} = \frac{P_{moteur,max}}{\eta_{\frac{B}{B}}\, \eta_{inv}\, \eta_m} \qquad 4\text{-}1)$$

Sur la base de la méthode proposée dans l'Equation (4-1) proposée, il a été conclu que la pile à combustible doit être d'une taille capable de produire une puissance maximale de 840 kW, ce qui lui permettra de fournir au moteur la puissance maximale de fonctionnement.

Le SC est le deuxième composant du système d'alimentation électrique, son rôle est de couvrir le déficit de puissance qui peut résulter de la réponse lente de la PàC aux variations rapides de la demande de puissance. Pour cela, le nombre de SC a été déterminé pour que les deux sources d'énergie puissent fournir collectivement au tramway la puissance nécessaire pour passer de la vitesse nulle à la vitesse maximale avec une accélération maximale.

Pour cela, une simulation a été faite du passage du tramway de la vitesse 0 à la vitesse 60 m/s avec une accélération constante de 1,09 m/s^2, puis l'évolution moyenne de la demande d'énergie résultant du déplacement du tramway a été calculée, cette évolution que les deux sources d'énergie doivent pouvoir suivre ensemble. Les résultats ont montré que le tramway a besoin de 16 SC, ce nombre est capable de produire 65 kW d'énergie et est capable de stocker environ 1,2 MJ d'énergie.

4.7. Stratégie de gestion de l'énergie

SGE peut être divisé en stratégie basée sur des règles, stratégie basée sur la fréquence et stratégie basée sur l'optimisation. Les stratégies basées sur des règles peuvent également être divisé en stratégie basée sur des règles déterministe et stratégie basée sur des règles floues.

Les règles de contrôle sont conçues sur la base de l'intelligence et de l'expérience humaines, généralement sans connaissance préalable du cycle de conduite. Les stratégies basées sur la fréquence sont spécifiquement utilisées pour les véhicules électriques en raison des faibles caractéristiques dynamiques des piles à combustible. Les stratégies basées sur l'optimisation peuvent être divisées en stratégies basées sur l'optimisation locale et stratégies globales.

Dans ce travail, l'utilisation de l'optimisation a été utilisée dans la gestion de l'alimentation et pour déterminer la contribution de chacun des composants, nous avons donc utilisé l'outil d'optimisation intégré dans Matlab 2017. Le processus est basé sur la division du chemin en étapes temporelles, chaque étape consistant en $\Delta t = 1\ s$, puis dans chaque étape, et à la base du niveau de demande d'énergie et basée sur le niveau de production d'énergie par les deux sources d'énergie dans le système, et aussi sur la base des contraints présentés dans les Equation 2-17), les algorithmes MATLAB déterminent les points de fonctionnement de la PàC et des SC.

4.7.1. Scénario 1

La première stratégie vise à faire fonctionner la PàC à des niveaux proches des niveaux de demande d'énergie. La PàC dans cette stratégie fournit au véhicule toute l'énergie nécessaire à son fonctionnement, et le SC n'intervient que pour couvrir la panne de l'énergie. Que résultant de faible réponse de PàC par rapport à l'évolution rapide de la demande d'énergie, ou afin de stocker l'énergie excédentaire résultant de la décélération du Tramway.

$$P_{PàC} \approx P_{domondée} \qquad 4\text{-}2)$$

Le changement du niveau d'énergie de la PàC est considéré comme une nature à réponse lente, contrairement à ce qui se caractérise par le changement de la demande d'énergie, il sera très difficile de réaliser l'équation 4-2), et au lieu de cela, l'objectif sera de réduire la différence entre la demande d'énergie et l'énergie produite par la pile à combustible est donc la fonction objective est l'équation 4-3) .

$$\min J = abs(P_{PàC} - P_{domondée}) \qquad 4\text{-}3)$$

Les résultats obtenus sont présentés dans la Figure 4-7, selon les résultats La PàC fonctionne le long du chemin, à une puissance de $74448{,}41\ W$, produisant un total de $141{,}67\ MJ$ d'énergie. Le taux de production représente en moyenne $52\ \%$ du taux de consommation du tramway. Ce qui est un chiffre un peu éloigné de notre objectif de la stratégie suivie, qui vise à couvrir par la pile à combustible toute la demande d'énergie requise par le tramway.

Le SC est intervenu pour contribuer à alimenter le véhicule en énergie sur $40\ \%$ du trajet à un taux de $1272{,}9\ W$, cette valeur est très faible par rapport à la consommation moyenne d'énergie du Tramway puisqu'elle ne représente que $0{,}9\%$, ce qui met en évidence la forte dépendance à la PàC pour obtenir l'énergie dont elle a besoin. Portant l'énergie totale qui a contribué à $1{,}015\ MJ$.

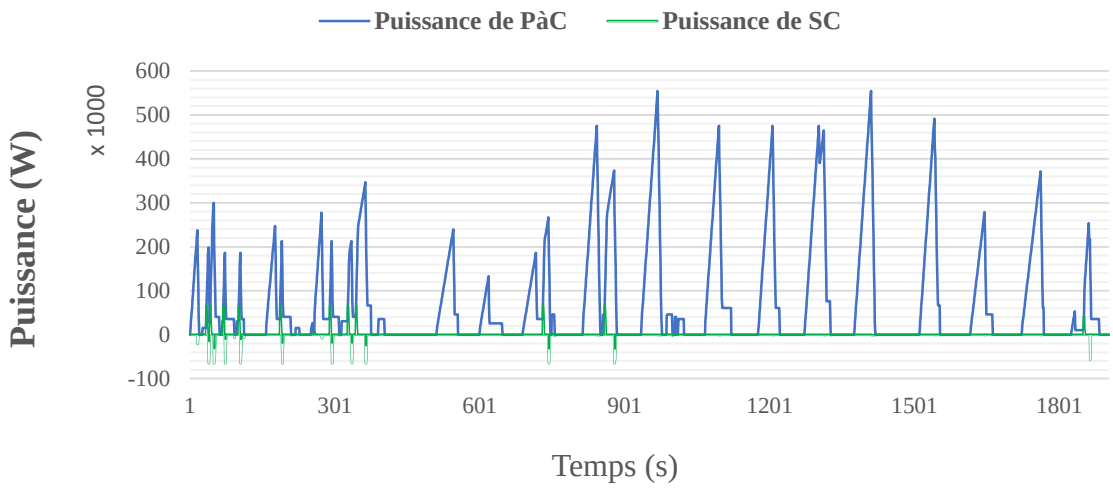

Figure 4-7: Contribution des éléments de source d'énergie pour scénario 1

Le SC est intervenu pendant 11% du trajet afin de stocker l'énergie excédentaire à un taux d'environ 5622 W, portant le volume d'énergie qui a été stocké à 1,18 MJ, ce qui est supérieur d'environ 165 kJ à l'énergie qu'il a fournie.

Ces résultats ont montré que le tramway est fortement dépendant de la PàC, car l'apport du SC était faible, ce qui nous fait supposer que l'on peut réduire la consommation d'hydrogène si l'on diminue la contribution de la PàC et augmente la contribution du SC.

4.7.2. Scénario 2

La stratégie est conçue pour minimiser l'énergie produite par la PàC, réduisant ainsi automatiquement la quantité d'hydrogène consommée pendant la conduite.

$$\min J = P_{PàC} \qquad 4\text{-}4)$$

Au cours de cette stratégie, la PàC (Figure 4-8) a fourni au Tramway jusqu'à 135,24 MJ d'énergie à une moyenne de 71071,14 W, ce qui représente 49 % de la demande moyenne du Tramway. Ceci est considéré comme réduisant la contribution de la pile à combustible et augmentant le niveau de la contribution des SC, car les SC sont intervenus pour fournir au tram dans de 11816.82 W , portant la valeur totale de l'énergie fournie par le SC à 4,33 MJ. Cette contribution est trois fois le potentiel du SC pour stocker l'énergie, Cette énergie est une réutilisation de l'énergie stockée puisque l'énergie récupérée était de 4,8 MJ à raison de 9669 W pendant le traject.

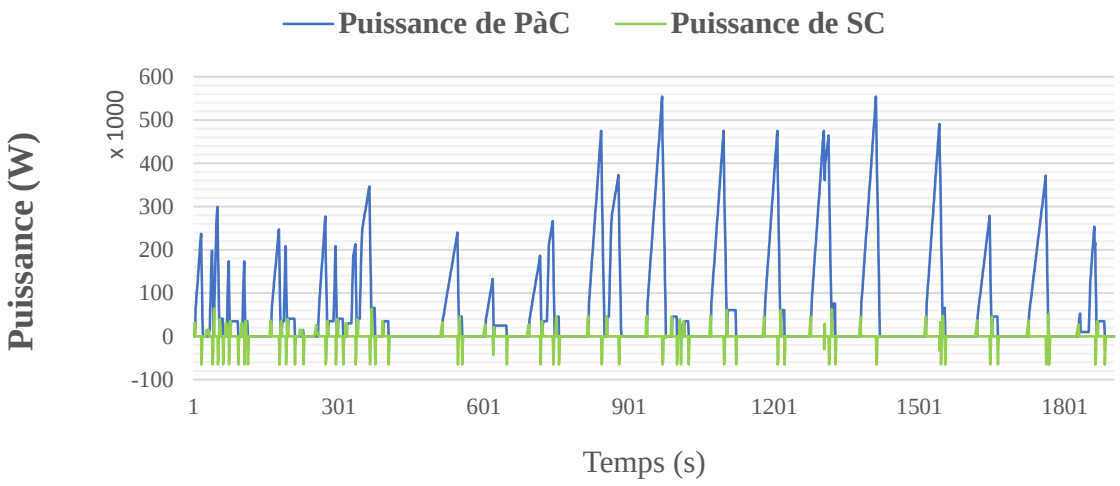

Figure 4-8: Contribution des éléments de source d'énergie pour scénario 2

4.7.3. Scénario 3

Des tentatives ont été faites pour combiner les première et deuxième stratégie dans le but de combiner leurs forces, de réduire leurs faiblesses respectives et de réduire leur impact. La stratégie est basée sur un fonctionnement minimal de la PàC Lorsque le niveau de charge du SC est supérieur à 60 %, on suppose donc qu'à ce niveau, la PàC pourra répondre à la demande d'énergie sans être compromise. Dans d'autres cas où le niveau d'énergie est inférieur à 60 %, la PàC fonctionnera seule pour répondre à la demande d'énergie et s'efforcera de réduire la dépendance à l'égard de la PàC.

$$\begin{cases} \min J = P_{PàC}\,, & SOC > 60\% \\ \min J = abs(P_{PàC} - P_{domondée})\,, & SOC \leq 60\% \end{cases} \qquad 4\text{-}5)$$

Les résultats de cette stratégie sont présentés dans la Figure 4-9, où la PàC produit 137 MJ d'énergie avec un puissance moyenne de 72016,81 W, ce qui représente la moitié des besoins énergétiques moyens, cette consommation est inférieure à la première stratégie et supérieur à la seconde stratégie. Tandis que SC l'a contribué environ 3,8 MJ à un taux de 6251 W sur 416 s sur 1904 s, le temps total du trajet ; Cette énergie est obtenue par le SC à partir d'environ de 4,12 MJ d'énergie en stockant à une puissance de 9900 W, cette énergie a été réutilisée pour alimenter le Tramway, et diminue la contribution de PàC.

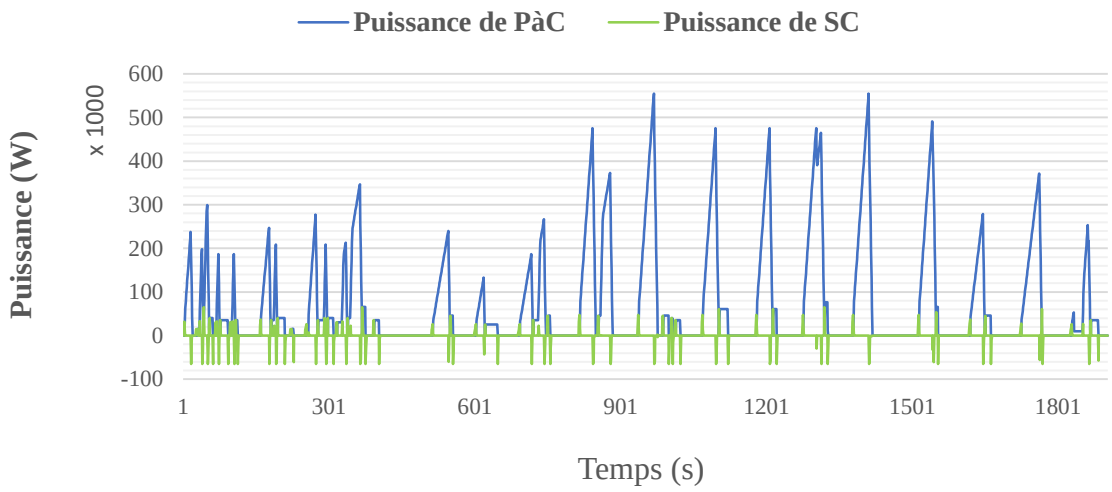

Figure 4-9: Contribution des éléments de source d'énergie pour scénario 3

4.7.4. Scénario 4

La quatrième stratégie vise à stabiliser le niveau de charge du SC à 60%, ce qui lui permet de stocker l'énergie excédentaire et peut également intervenir pour alimenter le véhicule en énergie si nécessaire. Pratiquement parlant, la réalisation de cette stratégie est impossible, en raison du besoin constant du système en SC, donc l'équation objective de cette stratégie est de réduire la différence entre le SOC réel du SC et le SOC que nous voulons que le SC soit stable à. Cette stratégie peut être exprimée par l'équation 4-6)

$$\min J = abs(SOC - 60\%) \qquad 4\text{-}6)$$

Les résultats obtenus grâce à cette stratégie peuvent être vus à travers la Figure 4-10.

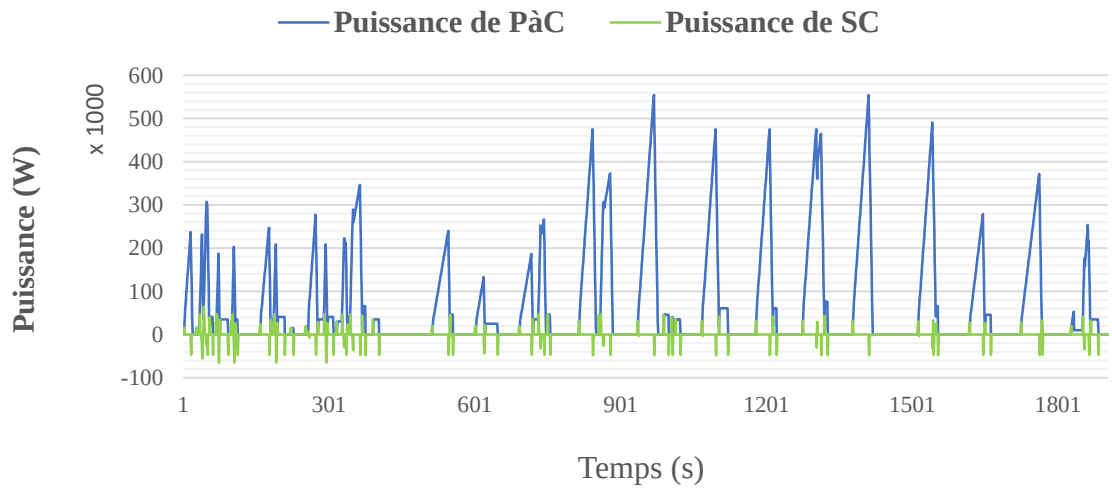

Figure 4-10: Contribution des éléments de source d'énergie pour scénario 4

Au cours de cette stratégie, la PàC est produit environ 140 MJ d'énergie afin d'alimenter le Tramway à un rythme d'environ 73 kJ d'énergie par seconde, soit plus de la moitié de la demande d'énergie dont le Tramway a besoin pour se déplacer du point de départ station à la station d'arrivée. La valeur maximale de la puissance produite par la PàC était d'environ 555 kW, ce qui représente environ 66 % de la puissance maximale que la PàC peut produire.

D'autre part, le SC est intervenu pour alimenter le tramway en énergie pendant environ 30% de la période de fonctionnement, économisant 2,77 MJ d'énergie, à un taux de 4958 W, et la valeur maximale de la puissance avec laquelle le SC intervenu atteint 64880 W, qui est la valeur maximale que le SC peut superlatifs fournis en une seule fois. L'énergie apportée par le SC est plus du double de sa capacité de stockage, ce qui signifie que le SC réutilise l'excédent d'énergie qu'il a stocké. Le SC est intervenu pour stocker l'énergie excédentaire pendant environ 22% de la durée du trajet, lui permettant de récupérer en moyenne 2,82 MJ d'énergie, à une moyenne de 6914 W.

4.7.5. Scénario 5

Cette dernière stratégie vise à réduire la consommation d'hydrogène, contrairement aux la deuxième stratégie qui vise à réduire la puissance de la PàC. L'équation objective indiquée dans l'équation 4-7) est construite sur la base des données indiquées dans le Tableau 3-1. Lors de la deuxième stratégie, l'équation d'objectif était de réduire l'énergie produite par la pile à combustible, mais produire moins d'énergie ne signifie pas nécessairement moins consommer d'hydrogène car la relation entre la capacité produite et l'hydrogène consommé est une relation non linéaire, et donc théoriquement il y aura une différence dans les résultats entre cette stratégie et la deuxième stratégie.

$$\min J = 3.6\ 10^{-17}\ P_{PàC}^{3} - 1.5\ 10^{-10}\ P_{PàC}^{2} + 1.5\ 10^{-5}\ P_{PàC} + 9.5\ 10^{-3} \qquad 4\text{-}7)$$

Les résultats obtenus à partir de cette stratégie peuvent être vus sur la Figure 4-11. Au cours de cette stratégie, la PàC a produit environ 140 MJ d'énergie à un taux de 73,4 kW le long du parcours, ce qui représente environ 49 % de la consommation énergétique moyenne du tramway. La valeur maximale de la puissance produite par la PàC était d'environ 554,5 kW, ce qui représente 66 % de la puissance maximale de la PàC.

Le SC est intervenu 26 % du temps de trajet afin d'alimenter le tramway à un puissance de 6724 W, portant la contribution du SC à 3,16 mégajoules en fin de parcours, cette quantité d'énergie représentant 250 % de son Cela est dû au fait que le SC réutilise l'énergie récupérée du

système, car le SC est intervenu 27% du temps de trajet pour récupérer 3,22 MJ de puissance à une moyenne de 6389 W.

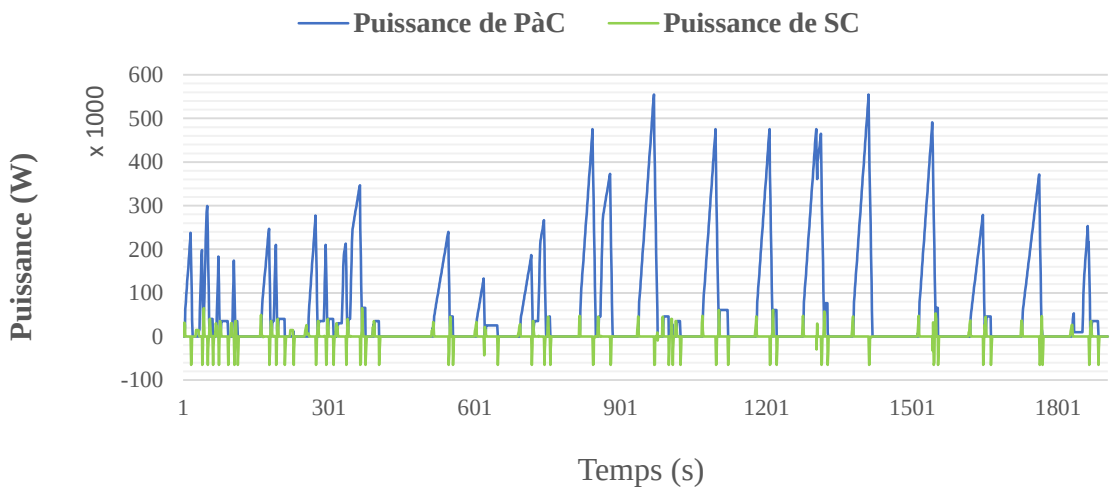

Figure 4-11: Contribution des éléments de source d'énergie pour scénario 5

4.8. Résultant

Dans cette partie, les résultats obtenus à partir de l'application des cinq stratégies différentes seront comparés. La comparaison sera faite du côté énergétique uniquement, y compris la quantité d'énergie produite par la PàC, ainsi que la contribution du supercondensateur.

4.8.1. Energie produite par la pile à combustible.

La comparaison des résultats en fonction de la quantité totale d'énergie produite par la PàC a été présentée sur la Figure 4-12. Les résultats ont montré une convergence de l'énergie produite entre la deuxième stratégie et la cinquième stratégie, avec une légère progression pour la deuxième stratégie avec une production d'environ 38,27 kJ de moins que ce qui a été produit dans la cinquième stratégie. Dans l'ensemble, la deuxième stratégie a atteint son objectif principal de réduction de la production d'énergie par PàC et a produit environ 95 % de l'énergie produite dans la première stratégie, qui était le cas le plus producteur d'énergie.

Indépendamment de la cinquième stratégie, dont les résultats étaient très proches des résultats de la deuxième stratégie, bien qu'elle n'ait pas montré que notre hypothèse lorsqu'elle a été proposée n'est pas exacte. La différence de production d'énergie avec le reste des stratégies variait entre 1,79 MJ pour la quatrième stratégie et 6,42 MJ par rapport à la première stratégie.

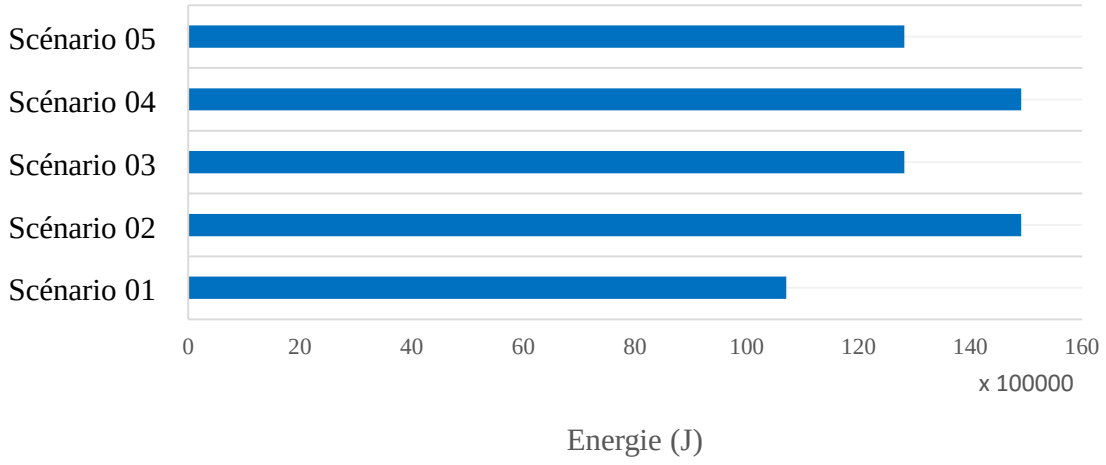

Figure 4-12: Energie produite par PàC

4.8.2. Contribution de super condensateur

La comparaison des cinq stratégies à travers la contribution SC est montrée dans la **Error! Reference source not found.**, et comprend l'énergie totale stockée par le SC pendant le trajet en vert, et l'énergie qui a été apportée pour alimenter le Tramway en bleu.

Les cinq stratégies sont apparues interrelations entre l'énergie stockée et l'énergie qui a été présentée au système. Ceci est le résultat du nombre de décharges et de charges du SC. Plus le SC apporte d'énergie, plus d'énergie est créée, et plus le super condensateur stocke d'énergie, plus il y a de potentiel pour fournir plus d'énergie au système. Cela fait du SC un élément qui recycle l'énergie excédentaire du système et la réutilise pour réduire la charge sur la PàC.

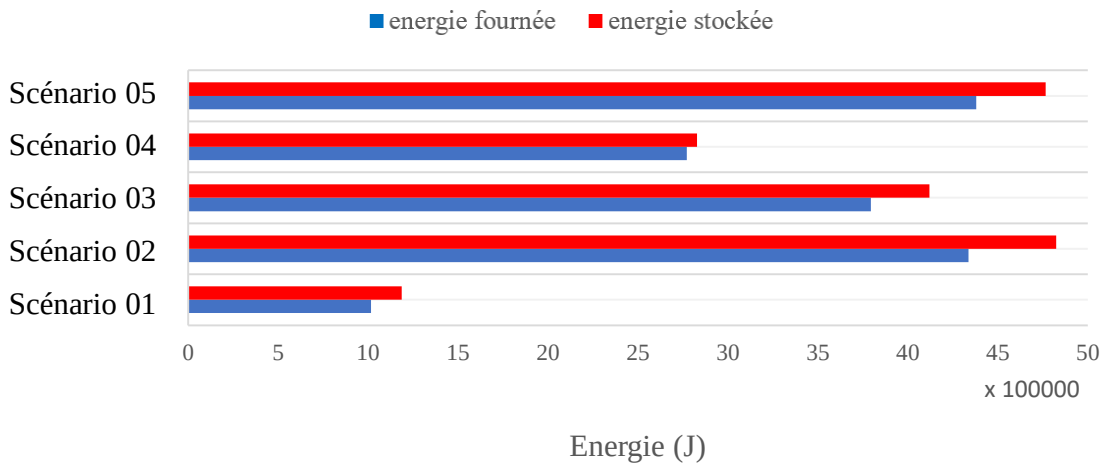

Figure 4-13: Contribution SC

Les résultats montrent que la meilleure stratégie est la deuxième et la cinquième, où elles ont eu la contribution la plus élevée avec la supériorité de la cinquième stratégie en termes de fourniture au système de l'énergie nécessaire à son fonctionnement d'environ 43.047 kJ, avec la supériorité de la deuxième stratégie sur la cinquième stratégie en termes d'énergie stockée d'environ 58.949 kJ. Ces résultats confirment ce qui a été atteint lors de la comparaison en termes de contribution de la PàC, ce qui montre l'avantage des deuxièmes et cinquièmes stratégies. La grande contribution du SC résultait de la dépendance réduite à l'énergie produite par la PàC.

4.8.3. Capacité du système

Dans cette partie, les stratégies ont été comparées en termes de quantité d'énergie que le système n'a pas fourni au tramway et le résultat obtenu est présentée dans Figure 4-14, et la première stratégie était la meilleure et la moins quantité d'énergie avec une valeur de 1,8 MJ, ce qui représente 1,3 % de l'énergie totale demandée. Avec un total de 3,2 MJ, ce qui représente environ 2,3 % de l'énergie produite.

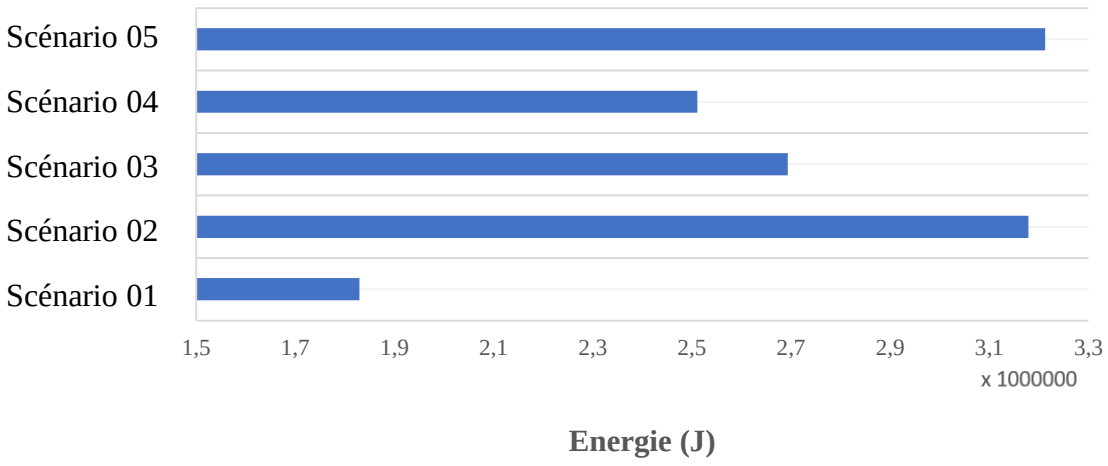

Figure 4-14: Energie perdue par le système

4.8.4. Etat de charge de super condensateur

Une comparaison récente en termes d'état de charge moyen d'un SC est illustrée à la Figure 4-15. Les résultats ont montré que le niveau de charge moyen des deuxièmes et cinquièmes stratégies est le plus bas parmi le reste des stratégies, tandis que le niveau de charge moyen de la deuxième stratégie est le plus élevé.

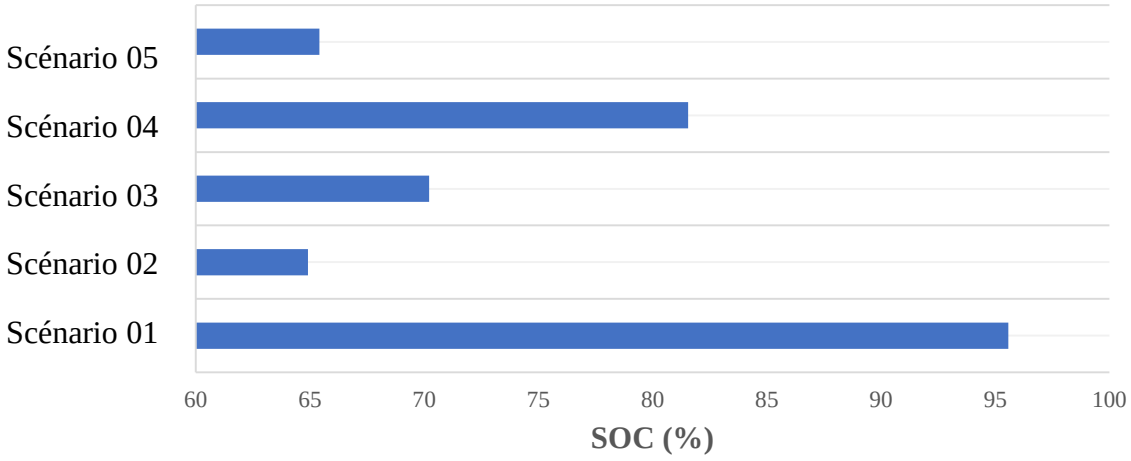

Figure 4-15: Etat de charge moyen

Ces résultats sont principalement dus au niveau d'interférence du SC pour fournir au système l'énergie nécessaire au fonctionnement du tramway. Au cours des deuxième et cinquième stratégies, le rôle du SC était plus important pour fournir au tramway l'énergie nécessaire pour son fonctionnement, ce qui signifie un plus grand nombre de cycles de charge et de décharge, ce qui rend le SOC moyen inférieur à ce qui est dans d'autres stratégies. En revanche, la PàC avait un rôle plus important pour fournir au tramway l'énergie nécessaire lors de la première stratégie, ce qui rend le SOC moyen du SC élevé par rapport au reste des stratégies.

4.9. Conclusion

La dépendance du tramway aux centrales électriques pour produire de l'électricité présente plusieurs inconvénients, notamment : la pollution due à la production d'électricité en raison de la dépendance de la station aux combustibles fossiles tels que le gaz naturel, qui ne sont pas renouvelables et, comme les autres combustibles fossiles, expire en un jour. De plus, le réseau a été mis à rude épreuve, provoquant des pannes de courant et la suspension du service de tramway. Dans ce chapitre, un modèle de système d'alimentation énergétique construit sous une forme hybride d'une PàC et des SC a été présentée et étudiée la possibilité de l'utiliser le pour alimenter le tramway de la ville de Ouargla pour fonctionner. Un ensemble de stratégies de gestion de l'énergie entre les deux sources d'énergie ont également été étudiées et comparées, et la meilleure d'entre elles a été déterminée.

Pour tester la technique proposée, les courbes de charge et de consommation d'énergie du tramway Ouargla ont été déterminées, avec une valeur maximale de 554515,6 W consommés. Les résultats ont également montré que la stratégie de gestion de l'énergie basée sur la réduction

de l'énergie produite par la PàC est la meilleure en termes d'économie de consommation d’hydrogène, et également en termes de récupération et de réutilisation d’énergie.

Conclusion générale

La tendance mondiale à utiliser une énergie propre et durable fait de l'hydrogène le carburant alternatif le plus important pour les véhicules, car la combustion de l'hydrogène est propre et ne contient pas de produits nocifs pour l'environnement. Par conséquent, le développement des PàC, leur recherche et leur utilisation comme sources d'énergie dans les applications stationnaires et les véhicules sont très importants, en particulier la température de fonctionnement de la pile à combustible, car elle doit être maintenue en permanence dans la plage idéale; lorsqu'elle est fixée, la Température du carburant de la pile à combustible Insuffisant, le véhicule doit être préchauffé avant de démarrer, et le changement de température dans le PàCMEP est nettement plus élevé, et une contrainte thermique est générée dans le PàC et sa durée de vie est raccourcie, ce qui a un impact négatif.

Un cycle de conduite a été proposé et développé. La comparaissent de cycle de conduite d'Ouargla avec d'autres cycles de conduit, montré une différence à l'accélération et la décélération maximales, pour cela lorsqu'une simulation d'une course par le véhicule Toyota Mirai dans la vile de Ouargla, ont obtenu la peccabilité de la minimisation de la dimension de source d'énergie. Comme autre application dans ce chapitre, des expériences de simulation a été réalisées sur différentes tailles de PàC et SC, et les résultats ont été que le volume optimal était $M_{PàC} = 38\ kg$ et $N_{SC} = 94$.

Un système de chauffage et refroidissement a été proposé pour contrôler la température de PàC orienté à l'utilisation dans les VPàC, le système proposé basé sur le multi-pack pile à combustible. Les résultats montrés que dans certains cas, cette approche a réduit à environ un cinquième l'énergie fournie par l'SSE pour chauffer la PàC. Pour une température ambiante de $T_{atm} = 278{,}15\ K$, l'énergie consommée pour chauffer le PàC multi-pack est réduite de $150500\ J$ selon la méthode standard à $32500\ J$ selon le système proposé. Le même système prouve la vitesse du processus de chauffage de la pile à combustible, amenant la PàC dans la plage de température requise et faisant fonctionner le véhicule en seulement 6 minutes. De plus, l'efficacité du système de refroidissement lors de l'utilisation du véhicule dans des conditions sévères a été étudiée, et les résultats ont montré que le système a réussi à maintenir la température de la PàC dans la plage idéale.

Un modèle de système d'alimentation énergétique construit sous une forme hybride d'une PàC et des SC a été présentée et étudiée pour l'utiliser comme source d'énergie dans le tramway de la ville de Ouargla pour fonctionner. Un ensemble de stratégies de gestion de l'énergie entre les deux sources d'énergie ont également été étudiées et comparées, et la meilleure d'entre elles a été déterminée.

Pour tester la technique proposée dans le tramway de Ouargla, les courbes de charge et de consommation d'énergie du tramway Ouargla ont été déterminées, avec une valeur maximale de 554515,6 W consommés. Les résultats ont également montré que la stratégie de gestion de l'énergie basée sur la réduction de l'énergie produite par la PàC est la meilleure en termes d'économie de consommation d'hydrogène, et également en termes de récupération et de réutilisation d'énergie.

Il existe de nombreuses façons de gérer la consommation d'énergie dans les véhicules à pile à combustible, d'autant plus que l'hydrogène n'est pas librement disponible dans la nature, et qu'il est très important de le conserver et de l'utiliser de manière rationnelle. L'année dernière, une université allemande annonçait la production de ce qu'elle appelait de la pâte énergétique, l'un des avantages de ce matériau est qu'il se transforme en hydrogène lorsqu'on y ajoute de l'eau. Son utilisation dans les véhicules est une excellente solution aux problèmes de stockage, mais crée des défis quant à sa gestion efficace, car elle nécessite plusieurs études, notamment en ce qui concerne la vitesse de la réaction, et la possibilité de contrôler la quantité d'hydrogène produite pour conserver au rythme de la grande mutation énergétique qui caractérise les véhicules.

Bibliographies

[1] Sulaiman N, Hannan MA, Mohamed A, Majlan EH, Daud WRW. A review on energy management system for fuel cell hybrid electric vehicle: Issues and challenges. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2015;52:802–14.

[2] International Energy Agency (IEA). Emissions from fuel combustion highlights 2017:www.iea.org.

[3] Tie SF, Tan CW. A review of energy sources and energy management system in electric vehicles. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2013;20:82–102. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.11.077.

[4] Chau KT, Chan CC. Emerging energy-efficient technologies for hybrid electric vehicles. Proceedings of the IEEE 2007;95:821–35.

[5] Rahmouni S, Negrou B, Settou N, Dominguez J, Gouareh A. Prospects of hydrogen production potential from renewable resources in Algeria. International Journal of Hydrogen Energy 2017;42:1383–95. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.07.214.

[6] Messaoudi D, Settou N, Negrou B, Settou B, Mokhtara C, Amine CM. Suitable Sites for Wind Hydrogen Production Based on GIS-MCDM Method in Algeria. Advances in Renewable Hydrogen and Other Sustainable Energy Carriers, Springer; 2020, p. 405–12.

[7] Boudries R. Analysis of solar hydrogen production in Algeria: Case of an electrolyzer-concentrating photovoltaic system. International Journal of Hydrogen Energy 2013;38:11507–18. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.04.136.

[8] Negrou B, Settou N, Chennouf N, Dokkar B. Valuation and development of the solar hydrogen production. International Journal of Hydrogen Energy 2011;36:4110–6.

[9] Chennouf N, Settou N, Negrou B, Bouziane K, Dokkar B. Experimental study of solar hydrogen production performance by water electrolysis in the south of Algeria. Energy Procedia 2012;18:1280–8.

[10] Messaoudi D, Settou N, Negrou B, Settou B. GIS based multi-criteria decision making for solar hydrogen production sites selection in Algeria. International Journal of Hydrogen Energy 2019;44:31808–31.

[11] Settou B, Settou N, Gouareh A, Negrou B, Mokhtara C, Messaoudi D. GIS-Based Method for Future Prospect of Energy Supply in Algerian Road Transport Sector Using Solar Roads Technology. Energy Procedia 2019;162:221–30. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.04.024.

[12] Messaoudi D, Settou N, Negrou B, Rahmouni S, Settou B, Mayou I. Site selection methodology for the wind-powered hydrogen refueling station based on AHP-GIS in Adrar, Algeria. Energy Procedia 2019;162:67–76.

[13] Rahmouni S, Settou N, Negrou B, Gouareh A. GIS-based method for future prospect of hydrogen demand in the Algerian road transport sector. International Journal of Hydrogen Energy 2016;41:2128–43.

[14] Gong A, Verstraete D. Fuel cell propulsion in small fixed-wing unmanned aerial vehicles: Current status and research needs. International Journal of Hydrogen Energy 2017;42:21311–33. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.06.148.

[15] Dokkar B, Settou NE, Imine O, Saifi N, Negrou B, Nemouchi Z. Simulation of species transport and water management in PEM fuel cells. International Journal of Hydrogen Energy 2011;36:4220–7.

[16] Edwards RL, Demuren A. Interface model of PEM fuel cell membrane steady-state behavior. International Journal of Energy and Environmental Engineering 2019;10:85–106. https://doi.org/10.1007/s40095-018-0288-2.

[17] Badji A, Abdeslam DO, Becherif M, Eltoumi F, Benamrouche N. Analyze and evaluate of energy management system for fuel cell electric vehicle based on frequency splitting. Mathematics and Computers in Simulation 2020;167:65–77.

[18] González A, Goikolea E, Barrena JA, Mysyk R. Review on supercapacitors: technologies and materials. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2016;58:1189–206.

[19] Gidwani M, Bhagwani A, Rohra N. Supercapacitors: the near Future of Batteries. International Journal of Engineering Inventions 2014;4:22.

[20] Wilberforce T, El-Hassan Z, Khatib FN, Al Makky A, Baroutaji A, Carton JG, et al. Developments of electric cars and fuel cell hydrogen electric cars. International Journal of Hydrogen Energy 2017;42:25695–734. https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2017.07.054.

[21] Markvart T. From steam engine to solar cells: can thermodynamics guide the development of future generations of photovoltaics? Wiley Interdisciplinary Reviews: Energy and Environment 2016;5:543–69.

[22] Mashadi B, Crolla DA. Vehicle powertrain systems. Wiley Online Library; 2012.

[23] Heywood JB. Internal combustion engine fundamentals. McGraw-Hill Education; 2018.

[24] Ministère de l'Énergie | Algérie 2021. https://www.energy.gov.dz/?article=bilan-energetique-national-du-secteur (accessed May 27, 2021).

[25] Libes SM. The origin of petroleum in the marine environment. Introduction to Marine Biogeochemistry 2009:1–33.

[26] U.S.Energy Information Administration. Petroleum and other liquids n.d. https://www.eia.gov (accessed January 20, 2022).

[27] Transport - Energy Transitions Commission n.d. https://www.energy-transitions.org/sector/transport/ (accessed September 27, 2021).

[28] U.S. Energy Information Administration (EIA) - Ap n.d. https://www.eia.gov/environment/emissions/carbon/ (accessed February 12, 2022).

[29] Gaston B, Drazen JM, Loscalzo J, Stamler JS. The biology of nitrogen oxides in the airways. American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine 1994;149:538–51.

[30] Council NR. Transitions to alternative vehicles and fuels. National Academies Press; 2013.

[31] Werpy MR, Burnham A, Bertram K. Propane vehicles: status, challenges, and opportunities. Illinois, USA: Center for Transportation Research, Argonne National Laboratory 2010.

[32] Yenilmez B. Payback period analysis of using green energy: within the scope of smart urban regenration and selection of green vehicles in Turkey 2016.

[33] Neffati A. Stratégies de gestion de l'énergie électrique d'un système multi-source: décision floue optimisée pour véhicule électrique hybride 2013.

[34] Li X, Williamson SS. Assessment of efficiency improvement techniques for future power electronics intensive hybrid electric vehicle drive trains. 2007 IEEE Canada Electrical Power Conference, IEEE; 2007, p. 268–73.

[35] Chan CC. The state of the art of electric, hybrid, and fuel cell vehicles. Proceedings of the IEEE 2007;95:704–18.

[36] Momoh OD, Omoigui MO. An overview of hybrid electric vehicle technology. 2009 IEEE vehicle power and propulsion conference, Ieee; 2009, p. 1286–92.

[37] Emadi A, Lee YJ, Rajashekara K. Power electronics and motor drives in electric, hybrid electric, and plug-in hybrid electric vehicles. IEEE Transactions on Industrial Electronics 2008;55:2237–45.

[38] Cano ZP, Banham D, Ye S, Hintennach A, Lu J, Fowler M, et al. Batteries and fuel cells for emerging electric vehicle markets. Nature Energy 2018;3:279–89. https://doi.org/10.1038/s41560-018-0108-1.

[39] Wu P, Bucknall R. Hybrid fuel cell and battery propulsion system modelling and multi-objective optimisation for a coastal ferry. International Journal of Hydrogen Energy 2020;45:3193–208.

[40] Changizian S, Ahmadi P, Raeesi M, Javani N. Performance optimization of hybrid hydrogen fuel cell-electric vehicles in real driving cycles. International Journal of Hydrogen Energy 2020. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.01.015.

[41] Siangsanoh A, Bahrami M, Kaewmanee W, Gavagsaz-ghoachani R, Phattanasak M, Martin JP, et al. Series

hybrid fuel cell/supercapacitor power source. Mathematics and Computers in Simulation 2020.

[42] Ajanovic A, Haas R. Prospects and impediments for hydrogen and fuel cell vehicles in the transport sector. International Journal of Hydrogen Energy 2020. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.03.122.

[43] Kim J-H, Kim H-J, Yoo S-H. Willingness to pay for fuel-cell electric vehicles in South Korea. Energy 2019;174:497–502. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.02.185.

[44] Vasconcelos AS, Martinez LM, Correia GHA, Guimarães DC, Farias TL. Environmental and financial impacts of adopting alternative vehicle technologies and relocation strategies in station-based one-way carsharing: An application in the city of Lisbon, Portugal. Transportation Research Part D: Transport and Environment 2017;57:350–62. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.08.019.

[45] Goor M, Menkin S, Peled E. High power direct methanol fuel cell for mobility and portable applications. International Journal of Hydrogen Energy 2019;44:3138–43. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.12.019.

[46] Zhou M, Yang M, Wu X. Research on Control Strategy of Quasi-Z Source Network DC/DC Converter for Fuel Cell Vehicle. DEStech Transactions on Environment, Energy and Earth Sciences 2019.

[47] Inoue Y, Sanada M. Current Specifications of Vehicle Motors * Generator n.d.

[48] Kelly KJ, Mihalic M, Zolot M. Battery usage and thermal performance of the Toyota Prius and Honda Insight during chassis dynamometer testing. Seventeenth Annual Battery Conference on Applications and Advances. Proceedings of Conference (Cat. No. 02TH8576), IEEE; 2002, p. 247–52.

[49] Burress T, Campbell S. Benchmarking EV and HEV power electronics and electric machines. 2013 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC), IEEE; 2013, p. 1–6.

[50] Ahsan K. Understanding trends of car recalls. 2010 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management, IEEE; 2010, p. 1123–7.

[51] Andari W, Ghozzi S, Allagui H, Mami A. Design, Modeling and Energy Management of a PEM Fuel Cell / Supercapacitor Hybrid Vehicle. IJACSA) International Journal of Advanced Computer Science and Applications 2017;8:273–8.

[52] Eriksson EL V, Gray EM. Optimization and integration of hybrid renewable energy hydrogen fuel cell energy systems–A critical review. Applied Energy 2017;202:348–64.

[53] Dafalla AM, Jiang F. Stresses and their impacts on proton exchange membrane fuel cells: A review. International Journal of Hydrogen Energy 2018;43:2327–48. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.12.033.

[54] Álvarez Fernández R, Corbera Caraballo S, Beltrán Cilleruelo F, Lozano JA. Fuel optimization strategy for hydrogen fuel cell range extender vehicles applying genetic algorithms. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2018;81:655–68. https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.08.047.

[55] Kraa O, Ghodbane H, Saadi R, Ayad MY, Becherif M, Aboubou A, et al. Energy Management of Fuel Cell/ Supercapacitor Hybrid Source Based on Linear and Sliding Mode Control. Energy Procedia 2015;74:1258–64. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.07.770.

[56] Song K, Li F, Hu X, He L, Niu W, Lu S, et al. Multi-mode energy management strategy for fuel cell electric vehicles based on driving pattern identification using learning vector quantization neural network algorithm. Journal of Power Sources 2018;389:230–9. https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2018.04.024.

[57] Ahmadi S, Bathaee SMT, Hosseinpour AH. Improving fuel economy and performance of a fuel-cell hybrid electric vehicle (fuel-cell, battery, and ultra-capacitor) using optimized energy management strategy. Energy Conversion and Management 2018;160:74–84. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.01.020.

[58] Corrêa JM, Farret FA, Gomes JR, Simões MG. Simulation of fuel-cell stacks using a computer-controlled power rectifier with the purposes of actual high-power injection applications. IEEE Transactions on Industry Applications 2003;39:1136–42.

[59] Wipke KB, Cuddy MR, Burch SD. ADVISOR 2.1: A user-friendly advanced powertrain simulation using a combined backward/forward approach. IEEE Transactions on Vehicular Technology 1999;48:1751–61. https://doi.org/10.1109/25.806767.

[60] Liso V, Nielsen MP, Kær SK, Mortensen HH. Thermal modeling and temperature control of a PEM fuel cell system for forklift applications. International Journal of Hydrogen Energy 2014;39:8410–20. https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2014.03.175.

[61] Arat HT, Sürer MG, Gökpinar S, Aydin K. Conceptual design analysis for a lightweight aircraft with a fuel cell hybrid propulsion system. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects 2020:1–15.

[62] Li H, Ravey A, N'Diaye A, Djerdir A. Equivalent consumption minimization strategy for hybrid electric vehicle powered by fuel cell, battery and supercapacitor. IECON 2016-42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, IEEE; 2016, p. 4401–6.

[63] Sykes M, Axsen J. No free ride to zero-emissions: Simulating a region's need to implement its own zero-emissions vehicle (ZEV) mandate to achieve 2050 GHG targets. Energy Policy 2017;110:447–60. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.08.031.

[64] Nonobe Y. Development of the fuel cell vehicle mirai. IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering 2017;12:5–9.

[65] Zhang W, Li J, Xu L, Ouyang M. Optimization for a fuel cell/battery/capacity tram with equivalent consumption minimization strategy. Energy Conversion and Management 2017;134:59–69.

[66] Wang Y, Chen KS, Mishler J, Cho SC, Adroher XC. A review of polymer electrolyte membrane fuel cells: Technology, applications, and needs on fundamental research. Applied Energy 2011;88:981–1007. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.09.030.

[67] Claude F, Ramadan HS, Becherif M, Boulon L. Heat management methodology for enhanced global efficiency in hybrid electric vehicles. Case Studies in Thermal Engineering 2017;10:325–34. https://doi.org/10.1016/j.csite.2017.06.006.

[68] Becherif M, Claude F, Hervier T, Boulon L. Multi-stack Fuel Cells Powering a Vehicle. Energy Procedia 2015;74:308–19. https://doi.org/10.1016/J.EGYPRO.2015.07.613.

[69] Benmouna A, Becherif M, Dépature C, Boulon L, Depernet D. Experimental study of energy management of FC/SC hybrid system using the Passivity Based Control. International Journal of Hydrogen Energy 2018;43:11583–92. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.03.191.

[70] Fragiacomo P, Piraino F. Fuel cell hybrid powertrains for use in Southern Italian railways. International Journal of Hydrogen Energy 2019;44:27930–46. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.09.005.

[71] Zhu X, Xu D, Wu P, Shen G, Chen P. Energy management design for a 5kW fuel cell distributed power system. 2008 Twenty-Third Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, IEEE; 2008, p. 291–7.

[72] Lin R, Xiong F, Tang WC, Técher L, Zhang JM, Ma JX. Investigation of dynamic driving cycle effect on the degradation of proton exchange membrane fuel cell by segmented cell technology. Journal of Power Sources 2014;260:150–8.

[73] Zheng CH, Xu GQ, Park YI, Lim WS, Cha SW. Prolonging fuel cell stack lifetime based on Pontryagin's Minimum Principle in fuel cell hybrid vehicles and its economic influence evaluation. Journal of Power Sources 2014;248:533–44.

[74] Pei P, Chen H. Main factors affecting the lifetime of Proton Exchange Membrane fuel cells in vehicle applications: A review. Applied Energy 2014;125:60–75.

[75] Kaya K, Hames Y. Two new control strategies: For hydrogen fuel saving and extend the life cycle in the hydrogen fuel cell vehicles. International Journal of Hydrogen Energy 2019;44:18967–80. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.12.111.

[76] Wang Y, Zhang X, Liu C, Pan R, Chen Z. Multi-timescale power and energy assessment of lithium-ion battery and supercapacitor hybrid system using extended Kalman filter. Journal of Power Sources 2018;389:93–105. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2018.04.012.

[77] Wang Y, Liu C, Pan R, Chen Z. Modeling and state-of-charge prediction of lithium-ion battery and ultracapacitor hybrids with a co-estimator. Energy 2017;121:739–50. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.01.044.

[78] Barthelemy H, Weber M, Barbier F. Hydrogen storage: recent improvements and industrial perspectives. International Journal of Hydrogen Energy 2017;42:7254–62.

[79] Becherif M, Ramadan HS, Cabaret K, Picard F, Simoncini N, Béthoux O. Hydrogen energy storage: new techno-economic emergence solution analysis. Energy Procedia 2015;74:371–80.

[80] Ezzat MF, Dincer I. Development and assessment of a new hybrid vehicle with ammonia and hydrogen. Applied Energy 2018;219:226–39. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.03.012.

[81] Ezzat MF, Dincer I. Development , analysis and assessment of a fuel cell and solar photovoltaic system powered vehicle. Energy Conversion and Management 2016;129:284–92. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.10.025.

[82] Ali DM, Salman SK. A comprehensive review of the fuel cells technology and hydrogen economy. Proceedings of the 41st international universities power engineering conference, vol. 1, IEEE; 2006, p. 98–102.

[83] El-Emam RS, Özcan H. Comprehensive review on the techno-economics of sustainable large-scale clean hydrogen production. Journal of Cleaner Production 2019;220:593–609. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.309.

[84] Barbir F. PEM fuel cells: theory and practice. Academic press; 2012.

[85] Services EG& G, Company RMP, Corporation SAI. Fuel Cell Handbook. DIANE Publishing; 2000.

[86] Buch BKSGC. Hydrogen 2002.

[87] Ehsani M, Gao Y, Longo S, Ebrahimi K. Modern electric, hybrid electric, and fuel cell vehicles. CRC press; 2018.

[88] Zhang H, Kong W, Dong F, Xu H, Chen B, Ni M. Application of cascading thermoelectric generator and cooler for waste heat recovery from solid oxide fuel cells. Energy Conversion and Management 2017;148:1382–90. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.06.089.

[89] Xu H, Chen B, Tan P, Zhang H, Yuan J, Irvine JTS, et al. Performance improvement of a direct carbon solid oxide fuel cell through integrating an Otto heat engine. Energy Conversion and Management 2018;165:761–70. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.04.008.

[90] Xu H, Chen B, Tan P, Cai W, He W, Farrusseng D, et al. Modeling of all porous solid oxide fuel cells. Applied Energy 2018;219:105–13. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.03.037.

[91] Spiegel C. Designing and building fuel cells. vol. 87. Citeseer; 2007.

[92] Pollet BG, Staffell I, Shang JL. Current status of hybrid, battery and fuel cell electric vehicles: From electrochemistry to market prospects. Electrochimica Acta 2012;84:235–49. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.electacta.2012.03.172.

[93] Sudworth JL. The sodium/nickel chloride (ZEBRA) battery. Journal of Power Sources 2001;100:149–63.

[94] Dustmann C-H. Advances in ZEBRA batteries. Journal of Power Sources 2004;127:85–92.

[95] Thounthong P. Conception d'une source hybride utilisant une pile à combustible et des supercondensateurs 2005.

[96] Wilberforce T, Alaswad A, Mooney J, Olabi AG. Hydrogen production for solar energy storage. A proposed design investigation. Proceedings of the 8th International Conference on sustainable Energy and Environmental Protection, 2015.

[97] Das HS, Tan CW, Yatim AHM. Fuel cell hybrid electric vehicles: A review on power conditioning units and topologies. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2017;76:268–91. https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.056.

[98] Azidin FA, Hannan MA, Mohamed A. Renewable energy technologies and hybrid electric vehicle challenges. Prz Elektrotech 2013;89:150–6.

[99] Hu L, Shi C, Guo K, Zhai T, Li H, Wang Y. Electrochemical Double-Layer Capacitor Energized by Adding an Ambipolar Organic Redox Radical into the Electrolyte. Angewandte Chemie 2018;130:8346–50.

[100] B Aziz S, Hamsan MH, M Nofal M, Karim WO, Brevik I, Brza M, et al. Structural, impedance and electrochemical characteristics of electrical double layer capacitor devices based on chitosan: Dextran biopolymer blend electrolytes. Polymers 2020;12:1411.

[101] Najib S, Erdem E. Current progress achieved in novel materials for supercapacitor electrodes: mini review. Nanoscale Advances 2019;1:2817–27.

[102] Changizian S, Ahmadi P, Raeesi M, Javani N. Performance optimization of hybrid hydrogen fuel cell-electric vehicles in real driving cycles. International Journal of Hydrogen Energy 2020. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.01.015.

[103] Zhang X, Mi C. Vehicle power management: modeling, control and optimization. Springer Science & Business Media; 2011.

[104] Wang Q, Huo H, He K, Yao Z, Zhang Q. Characterization of vehicle driving patterns and development of driving cycles in Chinese cities. Transportation Research Part D: Transport and Environment 2008;13:289–97.

[105] Esteves-Booth A, Muneer T, Kirby H, Kubie J, Hunter J. The measurement of vehicular driving cycle within the city of Edinburgh. Transportation Research Part D: Transport and Environment 2001;6:209–20.

[106] Saleh W, Kumar R, Kirby H, Kumar P. Real world driving cycle for motorcycles in Edinburgh. Transportation Research Part D: Transport and Environment 2009;14:326–33.

[107] Villatico F, Zuccari F. Efficiency comparison between FC and ice in real urban driving cycles. International Journal of Hydrogen Energy 2008;33:3235–42.

[108] Lin J, Niemeier DA. An exploratory analysis comparing a stochastic driving cycle to California's regulatory cycle. Atmospheric Environment 2002;36:5759–70.

[109] Zhang G, Chen W, Yu J, Li Q. Study on equivalent consumption minimization strategy for fuel cell hybrid tramway. 2017 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo, Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific), IEEE; 2017, p. 1–5.

[110] Han J, Kum D, Park Y. Synthesis of predictive equivalent consumption minimization strategy for hybrid electric vehicles based on closed-form solution of optimal equivalence factor. IEEE Transactions on Vehicular Technology 2017;66:5604–16.

[111] Caux S, Gaoua Y, Lopez P. A combinatorial optimisation approach to energy management strategy for a hybrid fuel cell vehicle. Energy 2017;133:219–30.

[112] Li H, Ravey A, N'Diaye A, Djerdir A. A novel equivalent consumption minimization strategy for hybrid electric vehicle powered by fuel cell, battery and supercapacitor. Journal of Power Sources 2018;395:262–70. https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2018.05.078.

[113] Soumeur MA, Gasbaoui B, Abdelkhalek O, Ghouili J, Toumi T, Chakar A. Comparative study of energy management strategies for hybrid proton exchange membrane fuel cell four wheel drive electric vehicle. Journal of Power Sources 2020;462. https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2020.228167.

[114] Jiang Q, Béthoux O, Ossart F, Berthelot E, Marchand C. A comparison of real-time energy management strategies of FC/SC hybrid power source: Statistical analysis using random cycles. International Journal of Hydrogen Energy 2020. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.06.003.

[115] Djerioui A, Houari A, Zeghlache S, Saim A, Benkhoris MF, Mesbahi T, et al. Energy management strategy of Supercapacitor/Fuel Cell energy storage devices for vehicle applications. International Journal of Hydrogen Energy 2019;44:23416–28. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.07.060.

[116] Rezk H, Nassef AM, Abdelkareem MA, Alami AH, Fathy A. Comparison among various energy management strategies for reducing hydrogen consumption in a hybrid fuel cell/supercapacitor/battery system. International Journal of Hydrogen Energy 2019. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.11.195.

[117] Fu Z, Li Z, Si P, Tao F. A hierarchical energy management strategy for fuel cell/battery/supercapacitor hybrid electric vehicles. International Journal of Hydrogen Energy 2019;44:22146–59. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.06.158.

[118] Fathy A, Rezk H, Nassef AM. Robust hydrogen-consumption-minimization strategy based salp swarm

algorithm for energy management of fuel cell/supercapacitor/batteries in highly fluctuated load condition. Renewable Energy 2019;139:147–60. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.02.076.

[119] Chen H, Zhang Z, Guan C, Gao H. Optimization of sizing and frequency control in battery/supercapacitor hybrid energy storage system for fuel cell ship. Energy 2020;197:117285. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117285.

[120] Jiang H, Xu L, Li J, Hu Z, Ouyang M. Energy management and component sizing for a fuel cell/battery/supercapacitor hybrid powertrain based on two-dimensional optimization algorithms. Energy 2019;177:386–96. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.04.110.

[121] Carignano M, Costa-Castelló R, Nigro N, Junco S. A Novel Energy Management Strategy for Fuel-Cell/Supercapacitor Hybrid Vehicles 11This work has been supported by the scholarship program BE-CAR of Ministerio de Modernizacion of Argentina, by the project DPI2015-69286-C3-2-R (MINECO/FEDER) and by the Eur. IFAC-PapersOnLine 2017;50:10052–7. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2017.08.1776.

[122] Carignano MG, Costa-Castelló R, Roda V, Nigro NM, Junco S, Feroldi D. Energy management strategy for fuel cell-supercapacitor hybrid vehicles based on prediction of energy demand. Journal of Power Sources 2017;360:419–33. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2017.06.016.

[123] Li T, Huang L, Liu H. Energy management and economic analysis for a fuel cell supercapacitor excavator. Energy 2019;172:840–51. https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.02.016.

[124] Xu L, Mueller CD, Li J, Ouyang M, Hu Z. Multi-objective component sizing based on optimal energy management strategy of fuel cell electric vehicles. Applied Energy 2015;157:664–74. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.02.017.

[125] Hu Z, Li J, Xu L, Song Z, Fang C, Ouyang M, et al. Multi-objective energy management optimization and parameter sizing for proton exchange membrane hybrid fuel cell vehicles. Energy Conversion and Management 2016;129. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.09.082.

[126] Yu Z, Zinger D, Bose A. An innovative optimal power allocation strategy for fuel cell, battery and supercapacitor hybrid electric vehicle. Journal of Power Sources 2011;196:2351–9. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2010.09.057.

[127] Dépature C, Macías A, Jácome A, Boulon L, Solano J, Trovão JP. Fuel cell/supercapacitor passive configuration sizing approach for vehicular applications. International Journal of Hydrogen Energy 2020. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.05.040.

[128] Corral-Vega PJ, García-Triviño P, Fernández-Ramírez LM. Design, modelling, control and techno-economic evaluation of a fuel cell/supercapacitors powered container crane. Energy 2019;186:115863. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.115863.

[129] Wu X, Hu X, Yin X, Li L, Zeng Z, Pickert V. Convex programming energy management and components sizing of a plug-in fuel cell urban logistics vehicle. Journal of Power Sources 2019;423:358–66. https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2019.03.044.

[130] Gaikwad SD, Ghosh PC. Sizing of a fuel cell electric vehicle: A pinch analysis-based approach. International Journal of Hydrogen Energy 2020;45:8985–93. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.01.116.

[131] Feroldi D, Carignano M. Sizing for fuel cell/supercapacitor hybrid vehicles based on stochastic driving cycles. Applied Energy 2016;183:645–58. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.09.008.

[132] Muñoz PM, Correa G, Gaudiano ME, Fernández D. Energy management control design for fuel cell hybrid electric vehicles using neural networks. International Journal of Hydrogen Energy 2017;42:28932–44. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.09.169.

[133] Meyer Q, Mansor N, Iacoviello F, Cullen PL, Jervis R, Finegan D, et al. Investigation of Hot Pressed Polymer Electrolyte Fuel Cell Assemblies via X-ray Computed Tomography. Electrochimica Acta 2017;242:125–36. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.electacta.2017.05.028.

[134] Wei S, Choudhury S, Xu J, Nath P, Tu Z, Archer LA. Highly stable sodium batteries enabled by functional ionic polymer membranes. Advanced Materials 2017;29:1605512.

[135] Litster S, McLean G. PEM fuel cell electrodes. Journal of Power Sources 2004;130:61–76.

[136] Costamagna P, Costa P, Antonucci V. Micro-modelling of solid oxide fuel cell electrodes. Electrochimica Acta 1998;43:375–94.

[137] Andre J. Optimisation des propriétés de conduction électrique et de passivité d'aciers inoxydables pour la réalisation de plaques bipolaires de pile à combustible de type pemfc 2007.

[138] Olliver J. Fuel cells: state of the art in the world; Piles a combustible: etat de l'art dans le monde 2000.

[139] Netwall CJ, Gould BD, Rodgers JA, Nasello NJ, Swider-Lyons KE. Decreasing contact resistance in proton-exchange membrane fuel cells with metal bipolar plates. Journal of Power Sources 2013;227:137–44.

[140] Qiu D, Yi P, Peng L, Lai X. Assembly design of proton exchange membrane fuel cell stack with stamped metallic bipolar plates. International Journal of Hydrogen Energy 2015;40:11559–68.

[141] Mason TJ, Millichamp J, Neville TP, El-Kharouf A, Pollet BG, Brett DJL. Effect of clamping pressure on ohmic resistance and compression of gas diffusion layers for polymer electrolyte fuel cells. Journal of Power Sources 2012;219:52–9.

[142] Guo H, Wang MH, Ye F, Ma CF. Experimental study of temperature distribution on anodic surface of MEA inside a PEMFC with parallel channels flow bed. International Journal of Hydrogen Energy 2012;37:13155–60.

[143] Li S, Sundén B. Numerical study on thermal performance of non-uniform flow channel designs for cooling plates of PEM fuel cells. Numerical Heat Transfer, Part A: Applications 2018;74:917–30.

[144] Ou K, Yuan W-W, Choi M, Yang S, Kim Y-B. Performance increase for an open-cathode PEM fuel cell with humidity and temperature control. International Journal of Hydrogen Energy 2017;42:29852–62.

[145] De las Heras A, Vivas FJ, Segura F, Redondo MJ, Andújar JM. Air-cooled fuel cells: Keys to design and build the oxidant/cooling system. Renewable Energy 2018;125:1–20.

[146] Tolj I, Penga Ž, Vukičević D, Barbir F. Thermal management of edge-cooled 1 kW portable proton exchange membrane fuel cell stack. Applied Energy 2020;257:114038.

[147] Hossain MS, Shabani B. Metal foams application to enhance cooling of open cathode polymer electrolyte membrane fuel cells. Journal of Power Sources 2015;295:275–91.

[148] Clement J, Wang X. Experimental investigation of pulsating heat pipe performance with regard to fuel cell cooling application. Applied Thermal Engineering 2013;50:268–74.

[149] Luo Y, Jiao K. Cold start of proton exchange membrane fuel cell. Progress in Energy and Combustion Science 2018;64:29–61.

[150] Tajiri K, Tabuchi Y, Wang C-Y. Isothermal cold start of polymer electrolyte fuel cells. Journal of The Electrochemical Society 2006;154:B147.

[151] Yamada K, Suzuki K, Tabe Y, Chikahisa T. Analysis of ice distribution in cathode catalyst layer and shutdown mechanism at PEFC cold start. ECS Transactions 2013;58:463.

[152] Amamou AA, Kelouwani S, Boulon L, Agbossou K. A comprehensive review of solutions and strategies for cold start of automotive proton exchange membrane fuel cells. Ieee Access 2016;4:4989–5002.

[153] Chavan SL, Talange DB. Statistical design of experiment approach for modeling and optimization of PEM fuel cell. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects 2018;40:830–46.

[154] Huang L, Chen J, Liu Z. Adaptive thermal control for PEMFC systems with guaranteed performance. International Journal of Hydrogen Energy 2018;43:11550–8. https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2017.12.121.

[155] Ramadan HSM, de Bortoli Q, Becherif M, Claude F. Multi-stack fuel cell efficiency enhancement based on thermal management. IET Electrical Systems in Transportation 2016;7:65–73.

[156] Ahmaditaba AH, Afshari E, Asghari S. An experimental study on the bubble humidification method of polymer electrolyte membrane fuel cells. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects 2018;40:1508–19.

[157] Feng J, Han J, Hou T, Peng X. Performance analysis and parametric studies on the primary nozzle of ejectors in proton exchange membrane fuel cell systems. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects 2020:1–20.

[158] Pachauri RK, Chauhan YK, Gupta A. Proton exchange membrane fuel cells: Investigation of control schemes for reactants' flow pressure. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects 2017;39:75–82.

[159] Yang Y, Zhang X, Guo L, Liu H. Local degradation in proton exchange membrane fuel cells with dead-ended anode. Journal of Power Sources 2020;477:229021.

[160] Qiu D, Janßen H, Peng L, Irmscher P, Lai X, Lehnert W. Electrical resistance and microstructure of typical gas diffusion layers for proton exchange membrane fuel cell under compression. Applied Energy 2018;231:127–37.

[161] Lin J-H, Chen W-H, Su Y-J, Ko T-H. Effect of gas diffusion layer compression on the performance in a proton exchange membrane fuel cell. Fuel 2008;87:2420–4.

[162] Jung C-Y, Shim H-S, Koo S-M, Lee S-H, Yi S-C. Investigations of the temperature distribution in proton exchange membrane fuel cells. Applied Energy 2012;93:733–41.

[163] Pessot A, Turpin C, Jaafar A, Soyez E, Rallières O, Gager G, et al. Contribution to the modelling of a low temperature PEM fuel cell in aeronautical conditions by design of experiments. Mathematics and Computers in Simulation 2019;158:179–98.

[164] El Aabid S, Régnier J, Turpin C, Rallières O, Soyez E, Chadourne N, et al. A global approach for a consistent identification of static and dynamic phenomena in a PEM Fuel Cell. Mathematics and Computers in Simulation 2019;158:432–52.

[165] Amphlett JC, Baumert RM, Mann RF, Peppley BA, Roberge PR, Harris TJ. Performance modeling of the Ballard Mark IV solid polymer electrolyte fuel cell: I. Mechanistic model development. Journal of the Electrochemical Society 1995;142:1.

[166] IMPERATIVE AN. LE TRANSPORT DURABLE: UN IMPERATIF POUR LE DEVELOPPEMENT DURABLE CAS DE L'ALGERIE n.d.

[167] Mejri H. Un système d'aide à la régulation d'un réseau de transport multimodal perturbé: réponse au problème de congestion 2012.

[168] Augé M. Un ethnologue dans le métro. Fayard/Pluriel; 2013.

[169] Simon C. Le tramway. Minuit; 2013.

[170] Redondo B. Tramway et territoire: quel urbain en perspective? Revue Géographique de l'Est 2012;52.

[171] Morin E. Modélisation d'un réseau électrique de tramway: du composant au système 2005.

[172] Benhassani W. La commande de tramway Cas de tramway de constantine 2016.

[173] Becker F, Dämmig A. Catenary free operation of light rail vehicles—topology and operational concept. 2016 18th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'16 ECCE Europe), IEEE; 2016, p. 1–10.

[174] Kanacilo EM, Verbraeck A. Assessing tram schedules using a library of simulation components. 2007 Winter Simulation Conference, IEEE; 2007, p. 1878–86.

[175] SETRAM - TRANSTEV n.d. https://transtev.dz/setram/ (accessed January 19, 2022).

[176] Ouargla | RATPDev n.d. https://www.ratpdev.com/fr/references/algerie-ouargla-tramway (accessed November 10, 2021).

[177] Les Rames Citadis® 402 n.d. http://www.ferro-lyon.net/nouveau-tram/498-les-rames-citadis-402 (accessed December 10, 2021).

[178] Lachaize J. Etude des stratégies et des structures de commande pour le pilotage des systèmes énergétiques à Pile à Combustible (PAC) destinés à la traction 2004.

Annexes

Les différents types de pile à combustible [178]

	PEMFC	DMFC	PAFC	AFC	SOFC	MCFC
	Basse Température				Haute Température	
TEMPERATURES	60 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	Membraneen polymère	Solide Acide phosphorique liquide	Potasse (KOH) liquide	Céramique solide	Sel de carbonate fondu liquide
COMBUSTIBLES POSSIBLES	Hydrogène	Méthanol	Hydrogène, gaz naturel (Reforma)	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%	55 – 60%	50 – 55%	50 – 60%

Comparaison des paramètres de performance des VPàC.

ENTREPRISE		TOYOTA MIRAI	HYUNDAI IX35	HONDA CLARITY	GENERAL EQUINIX	NISSAN X TRAIL
TEMPS D'ACCELERATION	$[s]$	9.6	12.5	11	12	14
VITESSE MAXIMALE	$[km \cdot h^{-1}]$	175	160	165	160	150
AUTONOMIE	$[km]$	650	594	750	483	500
DURABILITE PAC	$[h]$	>5000	>5500	>5000	>5500	–
PUISSANCE PAC	$[kW]$	114	100	103	93	90
VOLUME PAC	$[L]$	37	33	33.2	–	34
POIDS PAC	$[kg]$	56	–	–	130	43
DENSITE DE PUISSANCE	$[kW \cdot L^{-1}]$	3.1	3.1	3.1	1.5	2.5
PUISSANCE DU MOTEUR	$[kW]$	113	100	130	94	90
CAPACITE DE LA BATTERIE	$[kWh]$	1.6	0.95	–	1.8	–