

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université A.MIRA Bejaia
Faculté de technologie
Département de Génie Electrique

Mémoire de fin d'étude

En vue de l'obtention du Diplôme de Master

Spécialité Energies Renouvelables en Electrotechnique

Thème

**Contribution à l'optimisation du
flux énergétique dans un véhicule
électrique hybride**

Présenté par :

Mlle CHELOUH Kenza
Mlle SAIDANI Chahrazed

Encadré par :

Mme MOKRANI Zahra

Année universitaire
2024/2025

Remerciements

Nous remercions avant tout Allah, le Tout-Puissant, pour nous avoir accordé la force et la patience nécessaires à la réalisation de ce travail.

Nos sincères remerciements à Mme Mokrani Zahra, notre encadrante, pour son accompagnement, ses conseils et sa disponibilité tout au long de ce projet.

Nous remercions sincèrement l'ensemble des membres du jury pour l'intérêt porté à notre travail et pour l'honneur qu'ils nous font en acceptant d'en assurer l'évaluation.

Nos remerciements vont aussi à nos camarades, dont le soutien, l'échange d'idées et le partage de connaissances ont grandement contribué à enrichir cette expérience.

Enfin, nous tenons à exprimer toute notre gratitude à nos parents pour leur soutien moral, leur patience et leurs encouragements inconditionnels tout au long de notre parcours académique. Leur présence et leur confiance ont été un pilier essentiel dans notre réussite.

Dédicaces

Je dédie ce travail avec tout mon cœur à mes parents, pour leur amour inconditionnel, leur patience et leur soutien constant tout au long de mon parcours.

À mon frère et ma sœur, pour leur tendresse, leur encouragement et leur présence rassurante.

À mes plus proches, Rayan et Kenza, pour leur soutien et leur présence qui m'ont tant aidée tout au long de ce chemin.

Enfin, à tous mes amis ainsi qu'à toute ma famille, merci pour votre présence, vos encouragements et votre confiance.

Chelouh Kenza

Dédicaces

À ma famille, source de force et de sérénité.

À mes parents, Pour l'amour qu'ils m'ont toujours porté, le soutien sans faille qu'ils m'ont offert, et les valeurs profondes qu'ils m'ont transmises, qui ont éclairé chaque étape de mon chemin.

À ma très chère sœur Lamia, d'avoir toujours été là pour moi sa présence m'a donné beaucoup de force.

À mon frère Lamine, pour son aide et tout ce qu'il m'a appris.

À ma belle-sœur Jasmine, pour son encouragement et sa gentillesse.

À mon beau-frère Adel, pour sa bonne humeur et sa joie de vivre, qui ont toujours apporté une belle énergie autour de moi.

À mes neveux Emilie, Elya Lara et Kenzy.

Ceux qui me font sourire même dans les journées les plus grises.

À ma cousine Karima, pour sa générosité, sa disponibilité et sa constante écoute.

À mes plus proches Hichem, Nadine, Nihad et Rania.

Pour leur présence réconfortante, leur écoute sincère et leurs encouragements précieux tout au long de ce parcours.

Ce mémoire est le fruit d'un chemin parcouru ensemble. Je vous le dédie avec tout mon cœur.

Sommaire

Liste des abreviations	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Introduction générale	1
Chapitre I : État d'art des véhicules électriques hybrides	
I.1 Histoire et développement	3
I.1.1 Histoire de la voiture électrique	3
I.1.2 Histoire de la voiture hybride	5
I.2 Types des véhicules à motorisation électrique.....	6
I.2.1 Véhicule tout électrique	6
I.2.1.1 Définition	6
I.2.1.2 Principe de fonctionnement	6
I.2.1.3 Avantages et inconvénients de la voiture électrique	7
I.2.2 Véhicule hybride.....	7
I.2.2.1 Définition	7
I.2.2.2 Principe de fonctionnement.....	8
I.2.2.3 Avantages et inconvénients de la voiture hybride.....	9
I.3 Etat de l'art des systèmes de stockage utilisés.....	9
I.3.1 Batterie.....	
I.3.1.1 Définition	9
I.3.1.2 L'accumulateur.....	10
I.3.1.3 Principe de fonctionnement.....	10
I.3.1.4 Principaux paramètres d'une batterie	11
I.3.1.5 Technologies de batteries utilisées pour la traction des véhicules électrique hybride.....	11
I.3.2 Supercondensateurs	12
I.3.2.1 Définition	12
I.3.2.2 Principe de fonctionnement.....	13
I.3.2.3 États de fonctionnement	13
I.3.2.4 Différentes familles de supercondensateurs	15
I.3.2.5 Type des supercondensateurs	16
I.3.2.6 Systèmes d'équilibrage des supercondensateurs.....	17

Sommaire

I.3.2.7	Applications des supercondensateurs	17
I.3.2.8	Avantages des supercondensateurs	17
I.3.2.9	Inconvénients des supercondensateurs	17
I.3.3	Pile à combustible.....	18
I.3.3.1	Définition	18
I.3.3.2	Fonctionnement et réactions électrochimiques	18
I.3.3.3	Types de la pile à combustible	20
I.4	Hybridation des sources de stockage d'énergie.....	21
I.4.1	Stockage de l'énergie.....	21
I.4.2	Comparaison entre piles à combustible et supercondensateurs pour la mobilité électrique	22
I.4.3	Principe de l'hybridation des sources de stockage d'énergie	22
I.5	Differentes associations des sources de stockage d'énergie	23
I.5.1	Association Batterie/Supercondensateur	23
I.5.2	Hybridation supercondensateur/pile à combustible.....	24
I.5.3	Hybridation batterie/pile à combustible	25
I.5.4	Hybridation batterie/pile à combustible/supercondensateur.....	26
Conclusion.....		26
Chapitre II: étude et dimensionnement de la pile à combustible et supercondensateur		
II.1	Introduction	27
II.2	Modélisation des sources d'alimentation	27
II.2.1	Modèle de la pile à combustible	27
II.2.2	Caractéristiques de la pile a combustible	33
II.3.3	Dimensionnement de la pile à combustible	33
II.3	Dimensionnement des supercondensateurs	34
II.3.1	Modèle de supercondensateur	36
II.4	Modélisation des convertisseurs DC/DC	37
II.4.1	Modèle du convertisseur DC/DC Boost	37
II.4.1.1	Modèle à valeurs moyennes	38
II.4.2	Dimensionnement du convertisseur DC/DC Boost	39
II.4.3	Dimensionnement du convertisseur DC/DC Buck-Boost	40
Conclusion.....		38

Chapitre III: Gestion de puissance du système hybride

III.1 Introduction.....	41
III.2 Architecture du système étudié	41
III.3 Objectifs et stratégie de gestion de puissance	41
III.3.1 Logique de répartition de la puissance.....	42
III.3.2 Organigramme de gestion proposé pour la gestion de puissance hybride PAC/SC	43
III.4 Modélisation sous MATLAB.....	44
III.4.1 Résultats de la simulation.....	44
III.4.2. Répartition dynamique de la puissance.....	47
III.4.5 Comportement du SOC	47
III.4.6 Économie d'énergie et réduction du stress.....	47
III.5 Analyse et limites	47
Conclusion.....	48
Conclusion générale.....	49

Liste des abréviations et symboles

ER	Énergie renouvelable
SEH	Système d'énergie hybride
CA	Courant alternatif
CC	Courant continu
ENT	Nombre entier
EDC max	Etat de charge de la batterie maximal [90%]
EDC min	Etat de charge de la batterie minimum [30%]
CO₂	Dioxyde de carbone
PAC	Pile à combustible
H₂	Hydrogène
VE	Véhicules électriques
VEH	Véhicules électriques hybrides
SC	Super condensateur
EDC	État de charge
SOC	state of charge
O₂	Dioxygène
PEM	Pile à combustible membrane échangeuse de protons
H₂O	Formule brute de l'eau
PEMFC	La pile à combustible à membranes polymères échangeuse de protons
H+	Proton
NOX	Oxyde d'azote
N_s	Nombre de cellules mises en série qui fixe la tension du Stack
S	Surface d'une cellule qui fixe le courant du Stack
V_{act}	Polarisation d'activation de la pile
V_{ohm}	Polarisation ohmique
V_{cons}	Polarisation de concentration
T	Température opératoire absolue de la pile (°K)

Liste des abréviations et symboles

PH₂	Pression partielle de l'interface d'hydrogène (atm)
PO₂	Pression partielle de l'interface d'oxygène (atm)
Ipac	La densité de courant ipac
Ipac	Courant de la pile à combustible
Acell	Surface active d'une membrane
VPAC	Tension totale de la pile à combustible
Vcell	Tension élémentaire d'une cellule
Ncell	Nombre de cellule
PPAC	Puissance brute fournie par la pile à combustible
VPEMFC	La tension réelle d'une pile unitaire (volt)
ENerst	Potentiel thermodynamique (idéal) de chaque pile et représente la tension réversible (volt)
Uact	Pertes d'activation (volt)
Uohm	Pertes ohmique (volt)
Uconc	Pertes de concentration (volt)
C_{O₂}*	Concentration de l'oxygène dans l'interface de la surface cathodique (mol/cm ³)
C_{H₂}*	Concentration de l'hydrogène dans l'interface de la surface anodique (mol/cm ³)
Pcath	Pression de l'oxygène à la cathode
Panod	Pression de l'hydrogène à l'anode
PO₂*	Pression partielle de l'oxygène (<i>atm</i>)
PH₂*	Pression partielle à l'interface de l'hydrogène (<i>atm</i>)
TPEMFC	Température opératoire absolue de la pile (°K)
XH₂ sato	Fraction molaire de saturation d'eau dans le gaz humidifié (=0.5)
j	Densité de courant (A/cm ²)
s cell	Surface active des cellules (cm ²)
Rc	Résistance équivalente de contacte à la conduction des électrodes (Ω)
Rm	Résistance équivalente de la membrane (Ω)
rm	Résistance spécifique de la membrane (Ω.cm)
σ	Conductivité de la membrane (S.cm ⁻¹)
em	Epaisseur de la membrane (μm)
λ	Teneur en eau dans la membrane

Liste des abréviations et symboles

α_i Et β_i	Constantes adimensionnelles prisent dans les travaux d'Amphlett
R	Résistance série équivalente traduisant les pertes
C	Capacité principale du supercondensateur
Esc	L'énergie stockée à la tension
Usc	Tension pack du SC
Np_sc	Nombre de branches parallèles
Ns_sc	Nombre de connexions en série de SC Csc : Capacité SC
Vsc	Tension de supercondensateur(V)
Vpac	Tension de la pile à combustible (V)
K	Coefficient de l'efficacité
PNΔt	Energie extraite des SC
R1	Résistance principale
Idc	Courant du bus dc en sortie du convertisseur (A)
Isc	Courant du pack SC
Vsc	Tension élémentaires du SC
Ipac	Courant de pac (A)
F	fréquence
C_{DC}	capacité du filtre de sortie (F)
L₁	inductance de lissage (H)
V_{DC}	tension du bus continu(v)
ΔV_{DC}	ondulation de la tension de bus
ΔI_{pac}	ondulation du courant de la pile à combustible

Liste des figures

Figure I.1: Première voiture électrique de l'histoire.....	3
Figure I.2 : Véhicule hybride	5
Figure I.3 : Véhicule électrique.	6
Figure I.4 : Véhicule hybride.	7
Figure I.5 : Batterie d'une voiture.....	10
Figure I.6 : Supercondensateur.	12
Figure I.7 : État d'un supercondensateur chargé (a), en décharge (b), déchargé (c) et en charge (d)	14
Figure I.8 : Pile à combustible.....	18
Figure I.9 : Schéma de fonctionnement d'une pile PEMFC (acide).	19
Figure I.10 : Association d'une batterie/supercondensateur.	24
Figure I.11 : Hybridation d'un supercondensateur et une PAC.	25
Figure I.12 : Hybridation d'un supercondensateur et une PAC.	25
Figure II.1 : Schéma équivalent de la pile à combustible.....	27
Figure II.2 : Tension/courant de la pile.	33
Figure II.3 : Puissance/courant de la pile.....	31
Figure II.4 : Caractéristiques du supercondensateur utilisé.	35
Figure II.5 : Schéma équivalent d'un stack de super condensateurs.	36
Figure II.6 : Circuit électrique du convertisseur DC/DC Boost.	38
Figure II.7 : Circuit électrique du convertisseur DC/DC Buck_Boost.	40
Figure III.1 : Organigramme de gestion de puissance du système hybride.....	43
Figure III.2 : Puissance demandée par le véhicule	46
Figure III.3 : Puissance de la PAC.....	44
Figure III.4 : Puissance du super condensateur	45
Figure III.5 : Etat de charge du super condensateur	45
Figure III.6 : Les différentes puissances.....	46

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Evolution des voitures électriques.....	4
Tableau I.2 : Différents types et caractéristiques des batteries	12
Tableau I.3 : Différentes familles de super condensateurs	15
Tableau I.4 : Différents types de super condensateurs	16
Tableau I.5 : Tableau comparatif des différentes piles à combustibles.....	20
Tableau II.1 : Paramètres de la pile à combustible (PEMFC).....	34
Tableau II.2 : Résultats du calcul des paramètres du convertisseur.....	39
Tableau II.3 : Paramètres du convertisseur DC/DC Buck-Boost.....	40
Tableau III.1 : Tableau représentant les différents modes.	42

Introduction générale

Introduction générale

Actuellement, les pénuries d'énergie et la protection de l'environnement suscitent une attention croissante dans de nombreux pays, et l'utilisation massive de combustibles fossiles aggrave encore les problèmes environnementaux. Parmi les différentes sources d'énergie et technologies de remplacement des combustibles fossiles, l'hydrogène et les piles à combustible sont considérés comme des solutions prometteuses pour atteindre la neutralité carbone [1].

L'industrie automobile est un secteur important dans de nombreux pays, et les automobiles sont également indispensables au quotidien. À l'heure actuelle, les véhicules à carburant traditionnels occupent encore une part importante du marché, ce qui génère de nombreux polluants atmosphériques et gaz à effet de serre lors de la conduite. Remplacer les combustibles fossiles comme sources d'énergie pour les véhicules par des sources d'énergie propres comme l'hydrogène et l'électricité peut réduire considérablement les émissions de polluants et de gaz à effet de serre [2].

Dans les applications automobiles, les systèmes de piles à combustible doivent pouvoir s'adapter à des conditions de fonctionnement difficiles, telles que des démarriages et des arrêts fréquents, ainsi que des variations soudaines et importantes de la demande de puissance. Ces conditions sont beaucoup plus faciles à gérer si le système de piles à combustible est hybride avec des batteries et/ou des supercondensateurs. Outre l'atténuation des contraintes sur la pile à combustible grâce à la répartition de la charge, le stockage d'énergie permet de capter l'énergie de freinage régénératif, ce qui contribue à la consommation de carburant du véhicule et peut potentiellement permettre de réduire la taille du système de piles à combustible. Différentes approches d'hybridation des piles à combustible et des technologies de stockage d'énergie ont été développées. Il est intéressant de simuler et d'évaluer ces différentes configurations d'hybridation avec différents dispositifs de stockage d'énergie [3].

Les travaux exposés dans ce manuscrit sont répartis en trois chapitres, présentés comme suit :

- Le premier chapitre introduit ce travail en présentant l'état de l'art des véhicules électriques hybrides.
- Le deuxième chapitre est dédié à l'étude et à la modélisation des sources d'énergie embarquées, notamment la pile à combustible et le supercondensateur.
- Le troisième chapitre est consacré à la conception et à la mise en œuvre d'un système de gestion de puissance pour une architecture hybride.

Introduction générale

- Ce travail se conclut par une synthèse générale accompagnée des perspectives de recherche.

Chapitre I :

État d'art des

véhicules électriques

hybrides

I.1 Histoire et développement

I.1.1 Histoire de la voiture électrique

Dans un contexte de transition énergétique accélérée, le véhicule électrique s'impose progressivement comme une réponse crédible aux enjeux de mobilité durable. Contrairement à ce que l'on pourrait penser, son développement ne constitue pas une innovation récente, mais s'inscrit dans une histoire entamée il y a près de deux siècles.

L'histoire de la voiture électrique commence au XIX^e siècle. Dès 1834, Robert Anderson développe un premier prototype, suivi des travaux de Gaston Planté sur la batterie au plomb-acide en 1859. À la fin du XIX^e siècle, les véhicules électriques connaissent un certain succès, représentant jusqu'à 30% du marché automobile aux États-Unis. Cependant, l'essor des véhicules à essence, notamment avec la Ford T en 1908, entraîne leur déclin progressif. Après plusieurs tentatives de relance dans les années 1960 et 1970 en réponse aux crises pétrolières, les véhicules électriques restent marginaux. Ce n'est qu'au début du XXI^e siècle, avec l'apparition de modèles comme le Tesla Roadster en 2008, que l'électrique renaît grâce aux avancées technologiques, à la prise de conscience environnementale et à des politiques publiques favorisant la transition énergétique [4].



Figure I.1: Première voiture électrique de l'histoire.

Tableau I.1 : Evolution des voitures électriques.

Période	Evènements marquants
1830-1900 : Les débuts	<ul style="list-style-type: none"> - Premiers prototypes de véhicules électriques - Invention de la batterie rechargeable par Gaston Planté (1859) - Premiers véhicules électriques en production par Thomas Parker (1884)
1900-1960 : Le déclin	<ul style="list-style-type: none"> - Domination des voitures thermiques grâce à la Ford Model T - Batteries coûteuses et manque d'infrastructures de recharge - Voitures électriques limitées à des usages spécifiques (véhicules industriels, chariots élévateurs)
1960-2000 : La renaissance	<ul style="list-style-type: none"> - Crises pétrolières et préoccupations environnementales relancent l'intérêt pour l'électrique - Premières réglementations et programmes de recherche - Apparition de modèles modernes comme la GM EV1 (1996)
2000-2020 : La révolution Tesla	<ul style="list-style-type: none"> - Tesla bouleverse l'industrie avec le Roadster (2008) et le Model S (2012) - Développement des batteries lithium-ion et des infrastructures de recharge - Les grands constructeurs investissent massivement dans l'électrique
2020-2024 : L'accélération	<ul style="list-style-type: none"> - Réglementations environnementales strictes (fin des ventes thermiques prévues en Europe) - Hausse des performances des batteries et réduction des temps de recharge - Nouveaux acteurs innovants (NIO, Lucid, Rivian) et généralisation de la mobilité électrique

I.1.2 Histoire de la voiture hybride

L'histoire de la voiture hybride remonte à la fin du 19ème siècle, début du 20ème. En 1905, monsieur H. Piper a demandé l'octroi d'un brevet pour un moteur gasoil – électricité. Selon lui, le moteur électrique permettait d'augmenter les performances du moteur au gasoil, pour permettre à une voiture de passer de 0 à 40km/h en seulement dix secondes, bien plus que les moteurs thermiques de l'époque. Ironiquement, lorsque l'inventeur a finalement obtenu son brevet quelques années plus tard, le moteur thermique permettait d'atteindre de meilleures performances. Grâce (ou à cause) de rapides avancées technologiques dans les moteurs classiques, la popularité d'une voiture électrique ou hybride disparut jusqu'aux années 1970, lors des premières crises pétrolières. A ce moment, de nombreuses compagnies automobiles investirent dans le développement de véhicules hybrides électriques. Cependant, le prix du pétrole redescendit et l'intérêt pour ce genre de véhicule disparut à nouveau.

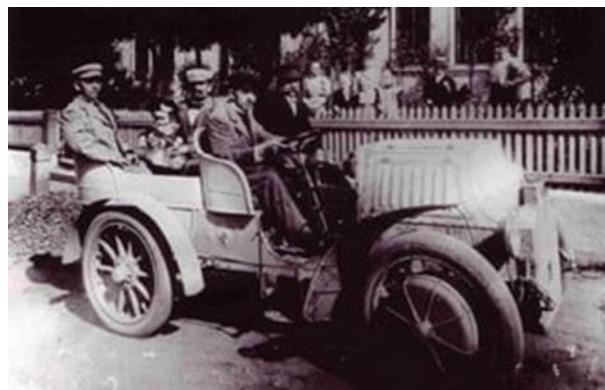


Figure I.2 : Véhicule hybride.

1899–1900 : Ferdinand Porsche développe la *Lohner-Porsche Semper Vivus*, le premier véhicule hybride combinant un moteur thermique et deux moteurs électriques logés dans les roues.

1905 : L'ingénieur américain H. Piper dépose un brevet pour un véhicule hybride à essence et électricité, anticipant le concept moderne de propulsion mixte.

1973 : Le premier choc pétrolier pousse plusieurs constructeurs (Toyota, Audi, GM) à relancer la recherche sur les systèmes hybrides afin de réduire la dépendance au pétrole.

1997 : Lancement au Japon de la **Toyota Prius**, première voiture hybride de série. Elle marque une révolution dans la conception automobile.

1999 : Arrivée de la **Honda Insight** aux États-Unis, première hybride commercialisée sur le marché américain.

Années 2000 : Les hybrides deviennent populaires : Toyota, Lexus, Ford, Honda et d'autres élargissent leur offre. Apparition des hybrides rechargeables (PHEV).

Années 2010 : Progrès techniques (batteries lithium-ion, électronique de puissance) et soutien politique favorisent l'essor des hybrides et des hybrides rechargeables dans le monde.

Années 2020 : Les véhicules hybrides deviennent une étape intermédiaire vers l'électrification totale. Essor des **hybrides légers (MHEV)**, déploiement massif dans toutes les gammes de véhicules [5].

I.2 Types des véhicules à motorisation électrique

I.2.1 Véhicule tout électrique

I.2.1.1 Définition

L'expression "tout électrique" ou "en mode tout électrique", que l'on peut trouver à de nombreuses reprises dans les discours des médias ou les articles de presse, désigne un véhicule qui roule sans utiliser de moteur thermique. Le résultat ? Une consommation de carburant et un taux d'émission de CO₂ totalement nuls [6].



Figure I.3 : Véhicule électrique.

I.2.1.2 Principe de fonctionnement

Un véhicule électrique à batterie (VEB) est constitué principalement d'une batterie de stockage, d'un moteur électrique à courant continu (ou alternatif), d'un système de commande électronique, ainsi que d'un dispositif de recharge. Le ou les moteurs de traction sont directement couplés aux roues motrices, assurant ainsi la propulsion du véhicule. L'unité de commande électronique (ou ordinateur de bord) assure la gestion de l'énergie, le contrôle de la

vitesse et la régulation de la puissance transmise au moteur. Le rechargement de la batterie s'effectue via une prise de courant classique, grâce à un chargeur intégré permettant la connexion au réseau électrique [7].

I.2.1.3 Avantages et inconvénients de la voiture électrique

Afin d'évaluer la pertinence de la voiture électrique dans le contexte actuel, il importe d'en analyser les avantages ainsi que les limites potentielles.

Avantages :

- Absence d'émissions polluantes.
- Réduction des coûts d'exploitation (moins d'entretien et d'énergie consommée).
- Fonctionnement silencieux.

Inconvénients :

- Autonomie limitée par la capacité des batteries.
- Temps de recharge relativement long.
- Coût initial élevé [8].

I.2.2 Véhicule hybride

I.2.2.1 Définition

Une voiture hybride est un véhicule qui combine deux types de motorisations : un moteur thermique et un moteur électrique. Ces deux systèmes peuvent fonctionner séparément ou ensemble, ce qui permet de réduire la consommation de carburant et les émissions polluantes. Le moteur électrique est alimenté par une batterie qui se recharge automatiquement grâce à l'énergie récupérée lors des freinages ou à l'aide du moteur thermique, sans qu'il soit nécessaire de brancher le véhicule [9].



Figure I.4 : Véhicule hybride.

I.2.2.2 Principe de fonctionnement

Le véhicule hybride repose sur un système de propulsion combinant deux sources d'énergie complémentaires, dont l'une est électrique. Ce système permet d'adapter automatiquement la source d'énergie utilisée en fonction des conditions de conduite : par exemple, l'énergie électrique est privilégiée à basse vitesse, tandis que la source complémentaire prend le relais lors des accélérations ou des longs trajets.

La batterie du moteur électrique se recharge de façon autonome, principalement par la récupération d'énergie cinétique au freinage. Ce principe permet d'optimiser l'efficacité énergétique, tout en réduisant les émissions de CO₂ et la consommation de carburant [10].

Il existe plusieurs modes de fonctionnement :

- **Mode tout électrique :** À basse vitesse, notamment lors des trajets urbains, seul le moteur électrique est utilisé. Ce mode permet de rouler sans émettre de gaz à effet de serre, puisque le moteur électrique est alimenté par la batterie. Cela est particulièrement avantageux dans des environnements où les émissions de CO₂ et la consommation de carburant doivent être minimisées, comme en ville ou lors des démarrages. L'autonomie en mode électrique dépend de la capacité de la batterie [11].
- **Mode hybride série :** Dans ce mode, le moteur thermique n'entraîne pas directement les roues. Il sert uniquement à générer de l'électricité, qui est ensuite utilisée pour alimenter le moteur électrique. Ce mode est généralement utilisé lorsque la demande en puissance est faible et que la batterie doit être rechargée. Le moteur thermique agit comme un générateur, ce qui permet de prolonger l'autonomie du véhicule électrique sans utiliser de carburant pour propulser directement les roues [12].
- **Mode hybride parallèle :** Dans ce mode, les deux moteurs (thermique et électrique) travaillent en même temps pour fournir la puissance nécessaire à la propulsion du véhicule. Le moteur thermique est utilisé pour fournir la puissance sur des trajets plus longs, tandis que le moteur électrique aide à fournir de la puissance supplémentaire lorsque nécessaire, par exemple lors d'accélérations ou dans des situations où une puissance immédiate est requise. Ce mode est particulièrement efficace pour les trajets sur autoroute ou à des vitesses plus élevées, où les deux moteurs peuvent fonctionner de manière complémentaire [12].

□ **Récupération d'énergie :** Un aspect clé du fonctionnement des véhicules hybrides est la récupération d'énergie lors du freinage. Lors de la décélération, l'énergie cinétique générée par la voiture est convertie en électricité par le moteur électrique, qui agit alors comme un générateur. Cette énergie est ensuite stockée dans la batterie pour être réutilisée plus tard. Ce système, appelé freinage régénératif, permet de maximiser l'efficacité du véhicule en réduisant les pertes d'énergie et en améliorant l'autonomie [12].

I.2.2.3 Avantages et inconvénients de la voiture hybride

La voiture hybride, bien qu'innovante et prometteuse sur le plan énergétique environnemental Présente un certain nombre d'avantages et d'inconvénients qu'il est important d'analyser.

Avantages :

- Consommation réduite de carburant.
- Meilleure autonomie qu'un véhicule tout électrique.
- Réduction des émissions polluantes.

Inconvénients :

- Complexité du système.
- Poids supplémentaire dû à la double motorisation.
- Coût d'achat plus élevé.

I.3 Etat de l'art des systèmes de stockage utilisés

I.3.1 Batterie

I.3.1.1 Définition

Une batterie est un système qui convertit l'énergie chimique en énergie électrique. Il existe deux catégories de batteries : les piles (non rechargeables) et les accumulateurs (rechargeables) [13].



Figure I.5 : Batterie d'une voiture.

I.3.1.2 Accumulateur

Est un générateur électrochimique secondaire rechargeable réversible, ou la transformation de l'énergie électrochimique en énergie électrique s'appelle la charge tandis que la transformation inverse s'appelle la décharge. L'accumulateur est constitué d'un couple électrochimique qui se compose de deux électrodes séparées par un électrolyte et aux interfaces desquelles déroulent des réactions d'oxydation ou de réduction qui cèdent ou absorbent des électrons. Les ions générés circulent dans l'électrolyte afin d'avoir une grande énergie stockée [14].

I.3.1.3 Principe de fonctionnement

Toute batterie se compose de trois éléments [15] :

1. Une anode (pôle négatif).
2. Une cathode (pôle positif).
3. Un électrolyte (un élément, liquide ou solide, conducteur permettant le passage du courant entre les deux pôles).

Le fonctionnement de la batterie repose sur une double réaction chimique à chaque pôle de la batterie qui va opérer un transfert d'électrons entre l'anode et la cathode de la façon suivant:

- L'anode cède des électrons : cette demi-réaction est une oxydation.
- La cathode les récupère : cette demi-réaction est une réduction.

Les réactions chimiques sont sensibles à la température, ainsi certains types d'accumulateurs sont inefficaces à basse température ($<0^{\circ}\text{C}$), d'autres requièrent des températures élevées (300°C). La puissance (rapidité à délivrer l'énergie) est limitée par le plus lent des nombreux processus de conduction. Pour accroître la puissance, il faut augmenter les surfaces d'électrodes, augmenter leur porosité... Pratiquement, il existe toujours un compromis énergie/puissance [16].

I.3.1.4 Principaux paramètres d'une batterie

Une batterie est caractérisée par les trois paramètres suivants :

➤ Puissance utilisable

La puissance [kW] correspond au produit de la tension fournie par la batterie (V_{bat}) et de l'intensité maximale qu'elle peut fournir (I_{bat}). Pour alimenter un moteur par une batterie la puissance utilisable de la batterie doit être au moins égale à celle de point de fonctionnement du moteur électrique.

➤ Energie stockée

L'énergie stockée, en Kilowatt-heure (kWh), dans la batterie peut être comparée à la quantité de carburant d'un véhicule thermique, c'est elle qui détermine l'autonomie d'un VE et les possibilités de récupération pour un véhicule hybride. L'énergie d'une batterie électrique s'exprime en fonction de sa capacité en Ampère heure (Ah) et sa tension.

➤ L'état de charge (SOC)

Le SOC, en Anglais "*State of Charge*" est l'état de charge de la batterie à un moment donné. L'état de charge est généralement exprimé en pourcentage, et lorsque la batterie est entièrement chargée, son état de charge atteint 100%. Lorsqu'elle est complètement déchargée, son état de charge (EDC) est de 0% [17].

I.3.1.5 Technologies de batteries utilisées pour la traction des véhicules électriques hybrides

Avec l'évolution des véhicules électriques, plusieurs technologies de batteries ont émergé. Les technologies les plus couramment utilisées dans l'électrification des véhicules hybrides sont : les batteries au plomb, les batteries nickel métal hydrure et les batteries lithium ion [17] [18].

- Les batteries au plomb, qui n'ont jamais quitté la scène depuis plus d'un siècle, et actuellement les seules à être industrialisées à large échelle, industrielles (de traction et stationnaire)
- Les batteries Ni/MH utilisées dans des premières applications dans les domaines de faible énergie.
- Les batteries de type Li ion, qui sont apparues comme des challengers sérieux.

Tableau I.2 : Différents types et caractéristiques des batteries [12].

Type	Energie Massique (Wh/kg)	Tension d'un élément (V)	Durée de Vie	Temps de Charge (h)	Auto-décharge par mois (%)
Plomb	30-50	2	200-300	8-16	5
Ni-Cd	48-80	1,25	1500	1	20
Ni-Mh	60-120	1,25	300-500	2-4	30
Li-ion	110-160	3,7	500-1000	2-4	10
Li-Po	100-130	3,7	300-500	2-4	10

I.3.2 Supercondensateurs

I.3.2.1 Définition

Les supercondensateurs, également appelés ultra condensateurs ou condensateurs à double couche électrique (EDLC), sont des dispositifs de stockage d'énergie qui se situent entre les condensateurs classiques et les batteries électrochimiques en termes de capacité de stockage d'énergie et de rapidité de charge/décharge. Ils offrent une haute densité de puissance, un nombre élevé de cycles de charge/décharge et un temps de réponse rapide, ce qui les rend particulièrement adaptés aux applications nécessitant des pics de puissance [19].



Figure I.6 : Supercondensateur.

I.3.2.2 Principe de fonctionnement

Contrairement aux batteries qui stockent l'énergie via des réactions chimiques, les supercondensateurs utilisent un mécanisme de stockage électrostatique à travers une double couche électrochimique formée à l'interface électrode-électrolyte. Cette double couche est créée par l'accumulation de charges opposées des deux côtés d'un électrolyte conducteur.

Lorsqu'une tension est appliquée, des ions positifs de l'électrolyte migrent vers l'électrode négative, tandis que les ions négatifs se déplacent vers l'électrode positive. Cette séparation de charges permet de stocker l'énergie sous forme électrostatique, sans réaction chimique, ce qui confère aux supercondensateurs une durée de vie plus longue et une efficacité énergétique élevée [20].

I.3.2.3 États de fonctionnement

- 1. État déchargé :** En l'absence de tension appliquée, les charges positives et négatives restent réparties uniformément dans l'électrolyte.
- 2. État en charge :** Les ions se déplacent vers les électrodes opposées, formant une double couche.
- 3. État chargé :** Le supercondensateur atteint sa tension maximale et conserve l'énergie sous forme de champ électrostatique.
- 4. État en décharge :** Les ions retournent à leur état initial, libérant ainsi l'énergie stockée vers la charge externe.

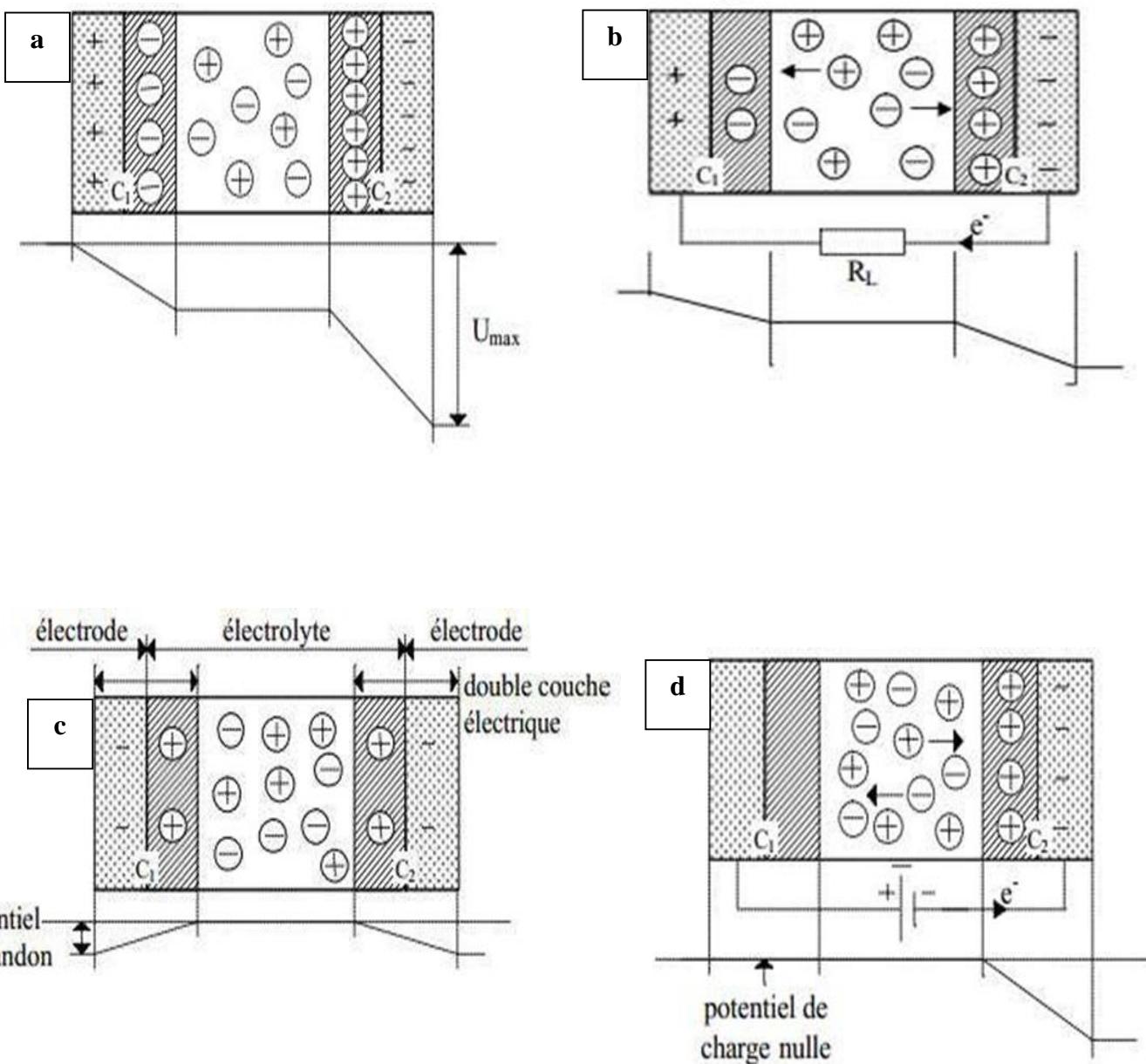


Figure I.7: État d'un super condensateur chargé (a), en décharge (b), déchargé (c) et en charge (d) [15] [16] [18] [21].

I.3.2.4 Différentes familles de supercondensateurs

Les supercondensateurs se classent en plusieurs catégories en fonction du type de matériau utilisé pour les électrodes et de l'électrolyte employé.

Tableau I.3 : Différentes familles de super condensateurs [21] [22].

Electrode	Charbon actif		Matériau Métallique	Polymère conducteur
Electrolyte	Acide sulfurique	Organique	Acide sulfurique	Organique
Moyen de stockage de l'énergie	Condensateur a double couche		Double couche + processus faradiques réversibles	
Energie massique [Wh/kg]	0.2 à 1.1	2 à 4.2	2.7 à 5.5	11
Puissance massique [kW/kg]	1 à 10	0.1 à 2	10 à 100	100
Capacité massique [F/g]	120 à 180	60 à 100	≈ 600	200 à 400
Tension [V]	0.8 à 1.2	2 à 3	0.8 à 1.2	2.5
Nombre de cycle	> 100000	> 100000	> 100000	10000 à 100000

I.3.2.5 Type des supercondensateurs

Le tableau I.4 présente les principaux types de supercondensateur ainsi que leurs spécificités.

Tableau I.4: Différents types de supercondensateurs.

Type de supercondensateur	Principe de stockage	Caractéristiques	Applications
EDLC (double couche)	Stockage d'énergie par adsorption d'ions sur la surface des électrodes.	- Haute densité de puissance. - Faible densité d'énergie. - Longue durée de vie.	-Véhicules hybrides. -Récupération d'énergie.
Pseudocapacitifs	Stockage par adsorption et réactions redox réversibles sur les électrodes.	- Densité d'énergie plus élevée. - Moins de cycles de vie comparée aux EDLCs.	-Véhicules électriques. -Stockage d'énergie.
Hybrides	Combinaison des électrodes EDLC et pseudocapacitifs.	- Haute densité d'énergie et de puissance. -longévité.	-Véhicules électriques. -Système de stockage.
Solide	Utilisation d'un électrolyte solide pour améliorer la sécurité et la durabilité.	- Plus sûrs, pas de fuites. - Stabilité.	-Appareils portables. -Véhicules à haute sécurité.
Aqueux	Utilisation de liquides ioniques pour l'électrolyte afin d'améliorer la conductivité.	- Large fenêtre de potentiel. - Stabilité thermique et chimique.	-Applications à faible coût.
Organique	Utilisation de matériaux nanostructures comme les nanotubes de carbone ou le graphène pour améliorer la capacité.	- Haute densité d'énergie. - performances améliorées.	-Véhicules électrique. -Stockage haute performance.

I.3.2.6 Systèmes d'équilibrage des supercondensateurs

Lorsque plusieurs supercondensateurs sont utilisés en série pour atteindre une tension plus élevée, un équilibrage de charge est nécessaire pour éviter les surtensions sur certains éléments. Deux principales méthodes d'équilibrage existent :

- 1. Équilibrage passif :** Utilisation de résistances connectées en parallèle avec chaque cellule pour dissiper l'excès de tension.
- 2. Équilibrage actif :** Implémentation de convertisseurs électroniques qui redistribuent la charge entre les éléments pour minimiser les pertes d'énergie [24].

I.3.2.7 Applications des supercondensateurs

Les supercondensateurs sont utilisés dans de nombreuses applications nécessitant une puissance instantanée élevée et une longue durée de vie :

- **Automobile :** Fourniture d'énergie pour les systèmes Start-Stop, récupération d'énergie de freinage dans les véhicules électriques et hybrides.
- **Stockage d'énergie stationnaire :** Intégration avec des systèmes solaires et éoliens pour gérer les variations d'énergie.
- **Électronique grand public :** Alimentation de secours pour circuits électroniques et mémoires.
- **Transport ferroviaire et aéronautique :** Amélioration de l'efficacité des systèmes électriques embarqués [25].

I.3.2.8 Avantages des supercondensateurs

- Temps de charge et de décharge extrêmement rapide, permettant une restitution instantanée de l'énergie.
- Durée de vie prolongée avec un nombre de cycles charge-décharge très élevé.
- Capacité à fournir une puissance élevée en un laps de temps court, idéale pour les accélérations et les freinages régénératifs [26].

I.3.2.9 Inconvénients des supercondensateurs

- Capacité de stockage énergétique inférieure à celle des batteries, limitant leur utilisation à des applications spécifiques.

- Perte d'énergie accrue en cas de stockage prolongé sans utilisation.
- Coût encore élevé comparé aux batteries conventionnelles, limitant leur adoption à grande échelle.

I.3.3 Pile à combustible

I.3.3.1 Définition

Une pile à combustible permet de convertir directement de l'**énergie chimique** de combustion en énergie électrique, en chaleur et en eau. Cela passe par une réaction chimique produisant un transfert d'électrons, qu'on appelle oxydo-réduction [27].

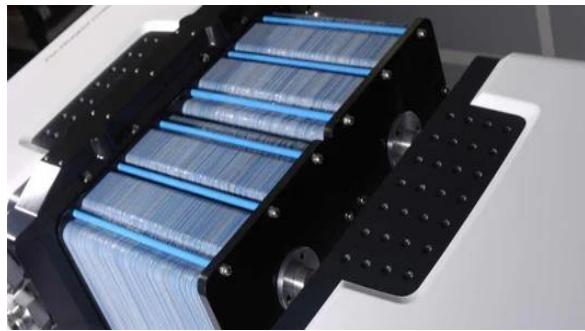


Figure I.8: Pile à combustible.

I.3.3.2 Fonctionnement et réactions électrochimiques

Le principe de fonctionnement d'une pile à combustible est l'inverse de l'électrolyse. Comme un accumulateur, elle est constituée de deux électrodes, l'anode et la cathode, où se produisent respectivement des réactions d'oxydation et de réduction. Ces électrodes sont séparées par un électrolyte, qui empêche les électrons de passer tout en permettant la circulation des ions. Lorsqu'on alimente la pile en hydrogène et en oxygène, une tension électrique se génère entre les deux électrodes, transformant ainsi le dispositif en générateur électrique, qui continue de fonctionner tant qu'il reçoit son apport en carburant [16].

Dans le cœur d'une pile à hydrogène du type PEMFC à membrane solide acide, deux réactions électrochimiques se produisent successivement :

- **À l'anode :** oxydation catalytique, en présence de platine, de l'hydrogène qui se dissocie de ses électrons :



- **la cathode :** réduction catalytique, en présence de platine, de l'oxygène qui capture les ions H^+ qui ont traversé la membrane électrolyte et les électrons arrivant du circuit extérieur.
- La réaction produit de la chaleur et de l'eau : $\frac{1}{2}\text{O}_2 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{Q}$ (chaleur)

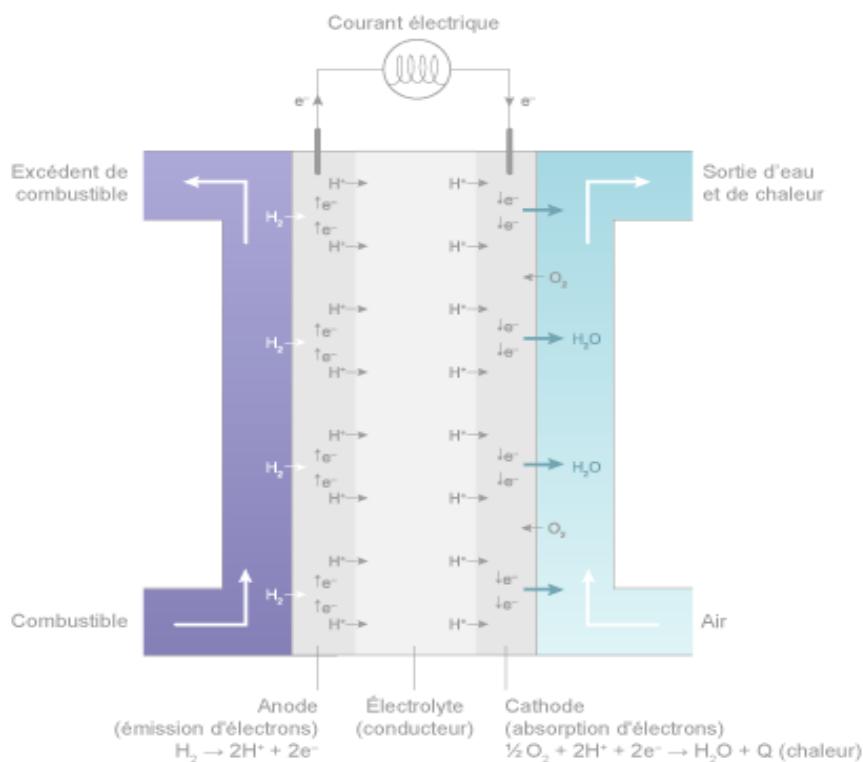


Figure I.9: Schéma de fonctionnement d'une pile PEMFC (acide) [28].

I.3.3.3 Types de la pile à combustible

Le tableau suivant présente une comparaison entre les principaux types de piles à combustible en fonction de leurs caractéristiques techniques et leurs domaines d'application.

Tableau I.5 : Tableau comparatif des différentes piles à combustibles [23].

Type de la pile	Electrolyte	Température de fonctionnement (°C)	Combustible utilisé	Puissance électrique	Rendement électrique (%)	Application
PEMFC	Membrane en polymère solide	60 - 100	Hydrogène	1W-700kW	40 - 55	Spatial, Transport, Stationnaire, Équipements Portables
DMFC	Membrane en polymère solide	60 -100	Méthanol	1W-100 kW	30 - 45	Transport, Équipements Portables
PAFC	Acide phosphorique liquide H_3PO_4	160 - 220	Hydrogène	10kW - 10MW	35 - 50	Stationnaire, Cogénération ,Transport
AFC	Potasse liquide KOH	50 - 250	Hydrogène, Gaz naturel.	1W - 100Kw	45 - 60	Spatial, Défense, Équipements Portables
MCFC	Sels fondus Li_2CO_3/ Na_2CO	600 - 800	Hydrogène, Gaz naturel.	500Kw - 100MW	45 - 55	Stationnaire, Cogénération
SOFC	Céramique	750 - 1050	Hydrogène, Gaz naturel	1MW- 100MW, (1GW cogénération)	45 - 70 (60 - 90 cogénération)	Stationnaire, Cogénération

I.4 Hybridation des sources de stockage d'énergie

I.4.1 Stockage de l'énergie

Le stockage de l'électricité est aujourd'hui reconnu comme l'un des enjeux majeurs pour les transports du futur, qu'ils soient routiers ou guidés. Pour stocker l'énergie électrique, il est nécessaire de la convertir en une autre forme d'énergie, adaptée au stockage, avant de pouvoir la reconvertisser en électricité lors de son utilisation. L'énergie peut être conservée sous différentes formes [29] :

- **Électrochimique** : via des batteries.
- **Électrostatique** : par des supercondensateurs.
- **Électromagnétique** : à l'aide d'inductances supraconductrices.
- **Mécanique** : par des volants d'inertie ou par compression d'air.
- **Gazeuse** : sous forme d'hydrogène (H_2) [30].

Dans le cas du stockage sous forme gazeuse, l'hydrogène doit être converti en électricité grâce à une pile à combustible. De même, pour le stockage mécanique, un convertisseur électromécanique, tel qu'une machine électrique, est nécessaire pour assurer l'interconversion énergie mécanique/énergie électrique [31].

Les principaux critères de performance des dispositifs de stockage d'énergie sont :

- **Densité massique d'énergie** : exprimée en Wh/kg, elle indique la quantité d'énergie stockée par unité de masse. Une densité élevée est particulièrement recherchée pour les applications mobiles comme l'automobile, l'aviation ou l'aérospatial.
- **Puissance massique** : exprimée en W/kg, elle mesure la capacité d'un dispositif à délivrer une puissance instantanée élevée pour une masse donnée.
- **Durée de vie** : généralement exprimée en nombre de cycles de charge/décharge, elle indique la stabilité du système de stockage sur le long terme.
- **Coût** : un système de stockage est intéressant uniquement si son coût total est inférieur aux gains économiques ou énergétiques qu'il permet de réaliser.
- **Recyclabilité** : critère de plus en plus crucial dans un contexte de transition écologique, évaluant la possibilité de récupérer ou de réutiliser les matériaux en fin de vie.
- **Sécurité** : elle évalue les risques liés au fonctionnement et à l'utilisation du dispositif, ce qui est particulièrement critique pour les applications embarquées [32].

I.4.2 Comparaison entre piles à combustible et supercondensateurs pour la mobilité électrique

Les piles à combustible (PAC) et les supercondensateurs représentent deux technologies majeures dans le domaine du stockage et de la conversion de l'énergie pour les applications de mobilité électrique. La PAC se distingue par une énergie massique relativement élevée, ce qui en fait une solution intéressante pour offrir une autonomie plus importante aux véhicules électriques.

Toutefois, son développement est encore freiné par certaines incertitudes concernant la recyclabilité, la durée de vie du système, ainsi que son coût de production. De plus, des défis subsistent en matière de sécurité : l'hydrogène, utilisé comme combustible, est hautement inflammable et présente des risques d'explosion en cas de fuite, notamment lors d'accidents [33].

Le supercondensateur, pour sa part, se caractérise par une puissance massique très élevée et une excellente capacité à supporter un grand nombre de cycles de charge et de décharge sans dégradation notable. Cette technologie est particulièrement adaptée aux applications nécessitant des appels de puissance rapides et fréquents. Cependant, sa faible énergie massique limite considérablement son autonomie, ce qui restreint son usage au stockage temporaire d'énergie plutôt qu'à un rôle principal dans l'alimentation du véhicule [34].

Ainsi, la complémentarité entre PAC et supercondensateurs pourrait offrir des perspectives intéressantes pour répondre aux différentes exigences énergétiques des véhicules électriques, en combinant l'autonomie de la pile à combustible et la réactivité en puissance du supercondensateur [35].

I.4.3 Principe de l'hybridation des sources de stockage d'énergie

L'hybridation énergétique repose sur l'association de deux technologies de stockage différentes, permettant ainsi de combiner leurs avantages respectifs : une énergie spécifique élevée pour l'une (par exemple une pile à combustible) et une puissance spécifique importante et disponible sur des durées relativement courtes pour l'autre (comme un supercondensateur) [36]. Cette approche permet notamment d'optimiser séparément le dimensionnement pour la

puissance moyenne et pour la puissance transitoire, avec pour principal bénéfice une réduction significative du volume et de la masse du système [37].

Dans un système hybride, trois principaux modes de fonctionnement peuvent être distingués [38] :

- **Régime normal** : lorsque la puissance demandée par la charge est inférieure à la puissance maximale fournie par la source principale. Celle-ci assure alors simultanément l'alimentation de la charge et la recharge de l'organe de stockage.
- **Régime de décharge** : lorsque la puissance exigée par la charge dépasse la capacité maximale de la source principale. Dans ce cas, la source principale et l'organe de stockage collaborent pour fournir l'énergie nécessaire à la charge.
- **Régime de récupération** : lorsque la charge restitue de l'énergie (par exemple lors d'un freinage régénératif), celle-ci est dirigée vers l'organe de stockage, voire, dans certains cas, vers la source principale si celle-ci est capable de se recharger.

Ce principe d'hybridation est largement adopté dans le domaine des véhicules électriques et hybrides afin d'améliorer à la fois la performance énergétique, la durabilité des composants, et la réactivité aux variations rapides de puissance.

I.5 Différentes associations des sources de stockage d'énergie

I.5.1 Association batterie/supercondensateur

Le concept de l'hybridation batterie/supercondensateur vise à associer, en complément de la source d'énergie principale (batterie), un élément capable de délivrer rapidement une puissance élevée (supercondensateur). Cette solution permet d'améliorer significativement les performances du système global, notamment en termes de coût, de dimensionnement, et de durée de vie des batteries, par rapport à un système reposant uniquement sur des batteries, comme c'est le cas dans la majorité des véhicules électriques (VE) et véhicules électriques hybrides (VEH) actuellement disponibles sur le marché [39].

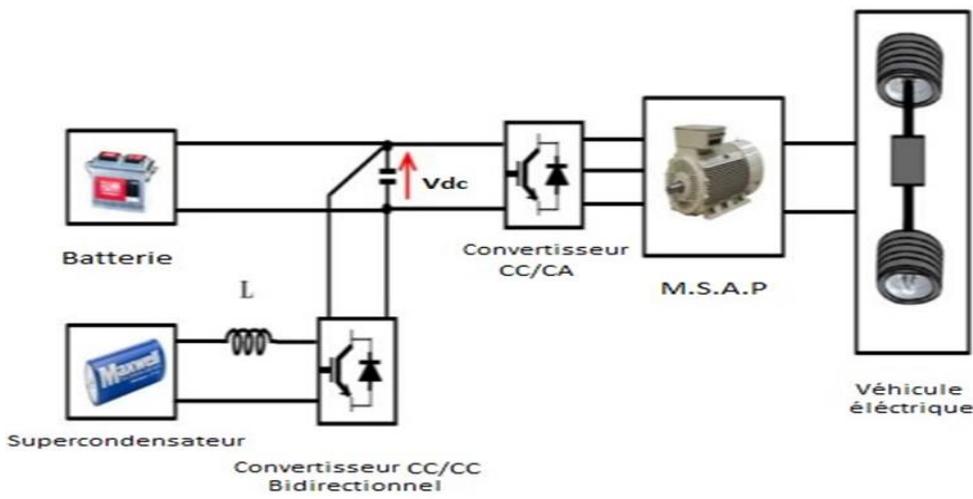


Figure I.10: Association d'une batterie/supercondensateur.

I.5.2 Hybridation supercondensateur/pile à combustible

Dans cette configuration, la puissance demandée par la charge est partagée entre la pile à combustible (PAC) et les supercondensateurs. La PAC alimente un bus continu (DC-Link) via un convertisseur DC-DC élévateur, tandis que le pack de supercondensateurs est connecté au même bus par l'intermédiaire d'un convertisseur bidirectionnel abaisseur-élévateur. La pile à combustible est considérée comme la source principale fournissant l'essentiel de l'énergie, tandis que les supercondensateurs interviennent pour assurer les besoins en puissance transitoire ou pour récupérer l'énergie lors des phases de freinage, en fonction de leur état de charge (SOC) [40].

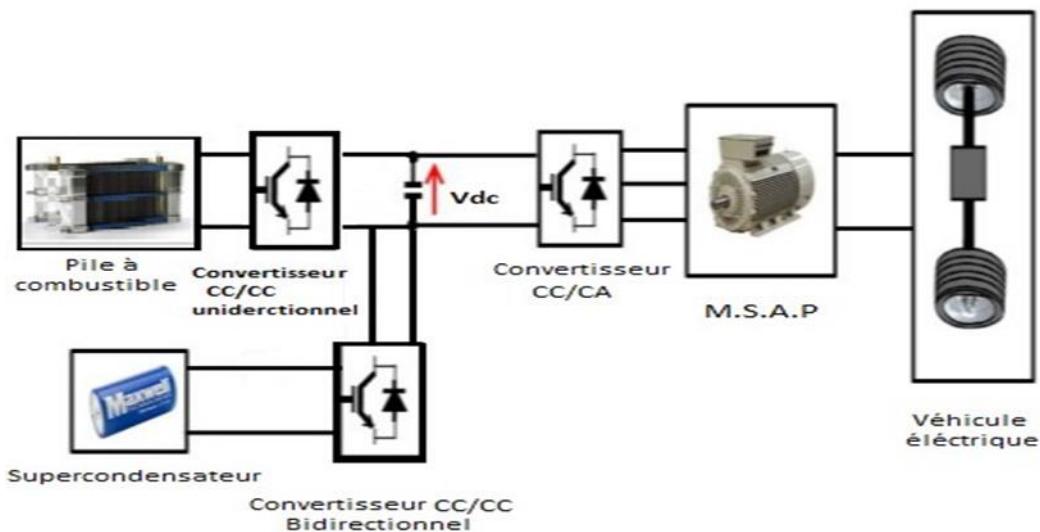


Figure I.11: Hybridation d'un supercondensateur et une PAC.

I.5.3 Hybridation batterie/pile à combustible

L'hybridation batterie/PAC combine les atouts des deux technologies : la PAC fournit la majorité de l'énergie nécessaire à la charge, tandis que la batterie compense les variations rapides ou transitoires de puissance. Ce type d'association est particulièrement intéressant pour des applications de propulsion de véhicules électriques ou encore pour certains dispositifs d'alimentation de secours ou d'aviation légère, selon le type de pile à combustible utilisée. Dans cette architecture, les deux sources sont connectées à un bus continu via des convertisseurs DC/DC spécifiques [41].

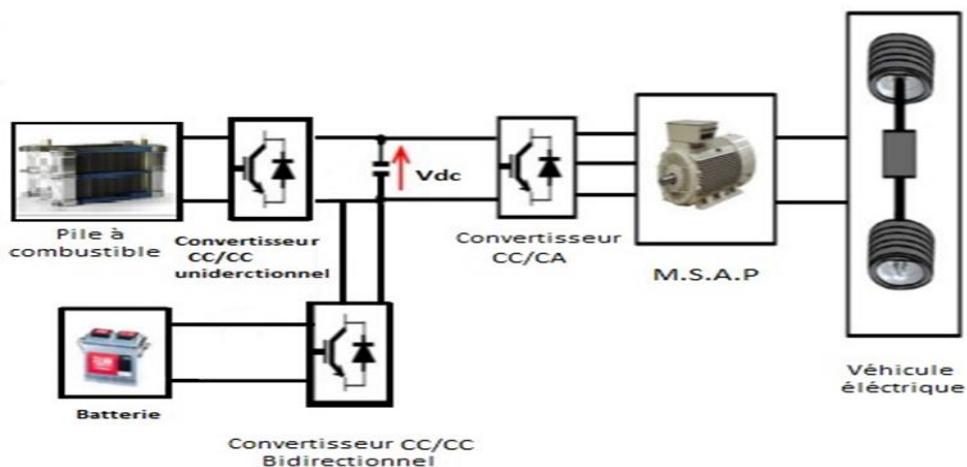


Figure I.12: Hybridation d'un supercondensateur et une PAC.

I.5.4 Hybridation batterie/pile à combustible/supercondensateur

Pour pallier les limites de l'hybridation simple PAC/SC, notamment le temps de démarrage relativement long de la pile à combustible (entre 5 et 10 minutes), une architecture intégrant simultanément la PAC, une batterie et des supercondensateurs est proposée. Dans cette configuration, la batterie fournit l'énergie initiale pour démarrer le véhicule et alimenter les auxiliaires, grâce à son énergie spécifique plus élevée que celle des supercondensateurs. Cette association permet également de prolonger la durée de vie de la batterie en limitant les courants élevés de charge/décharge.

La structure générale repose sur un bus continu alimenté par la PAC via un hacheur élévateur, tandis que la batterie et le supercondensateur sont connectés chacun à travers un convertisseur bidirectionnel (abaisseur-élévateur) en courant continu [42].

Conclusion

A travers ce chapitre, nous avons pu mieux comprendre les différentes catégories de véhicule à motorisation électrique, qu'ils soient totalement électriques ou hybrides. Cela nous a permis de saisir leurs avantages et leurs limites, tout en mettant en évidence leur importance croissante dans la transition vers une mobilité plus propre et plus durable. L'étude de l'hybridation des sources de stockage d'énergie a également montré son rôle essentiel pour optimiser les performances et répondre aux exigences techniques des véhicules de demain.

Chapitre II :

Étude et modélisation

de la pile à combustible

et supercondensateur

II.1 Introduction

Dans le contexte actuel de transition énergétique, les systèmes de stockage et conversion d'énergie électrique connaissent un développement considérable. Les piles à combustible, par leur capacité à convertir l'hydrogène en électricité de manière propre, et les supercondensateurs, par leur aptitude à fournir une puissance élevée instantanément, constituent des technologies complémentaires particulièrement attractives.

L'intégration efficace de ces sources nécessite cependant l'utilisation de convertisseurs électroniques de puissance adaptés. Les convertisseurs boost permettent d'élever la tension de sortie des sources pour l'adapter aux besoins de la charge, tandis que les convertisseurs buck-boost offrent la flexibilité d'élever ou d'abaisser la tension selon les conditions de fonctionnement.

Ce travail présente l'étude et le dimensionnement d'un système hybride pile à combustible-supercondensateur associé à des convertisseurs boost et buck-boost, dans l'objectif d'optimiser les performances énergétiques et d'assurer une gestion efficace des flux de puissance.

II.1 Modélisation des sources d'alimentation

II.1.1 Modèle de la pile à combustible

La modélisation électrique d'une pile à combustible PEMFC permet de représenter son comportement à l'aide d'un circuit équivalent, facilitant ainsi son intégration dans des systèmes de simulation comme MATLAB/Simulink. Cette modélisation repose sur une approche semi-empirique, prenant en compte les différentes pertes électrochimique internes à la pile.

a) Schéma équivalent :

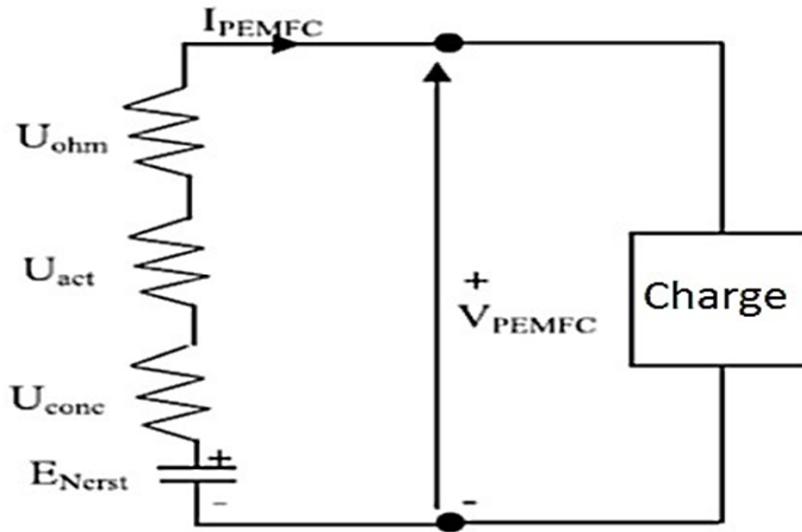


Figure II.1: Schéma équivalent de la pile à combustible.

b) Tension de la pile :

L'équation suivante représente la tension à la sortie du PAC :

$$V_{PEMFC} = E_{Nerst} - U_{act} - U_{ohm} - U_{conc} \quad (\text{II.1})$$

V_{PEMFC} : La tension réelle d'une pile unitaire (volt) ;

E_{Nerst} : Potentiel thermodynamique (idéal) de chaque pile et représente la tension réversible (volt) ;

U_{act} : Pertes d'activation (volt) ;

U_{ohm} : Pertes ohmique (volt) ;

U_{conc} : Pertes de concentration (volt) ;

L'équation du potentiel thermodynamique (idéal) est donnée par l'équation suivante :

$$E_{Nerst} = \alpha_1 + \alpha_2(T_{PEMFC} - 298.15) + \alpha_3 T_{PEMFC} (0.5 \ln P * o_2 + \ln P H_2) \quad (\text{II.2})$$

□ **Pertes d'activation :**

Les pertes d'activation correspondent à la surtension nécessaire pour initier les réactions électrochimiques se produisant à l'anode et à la cathode de la pile à combustible. Elles sont principalement dues au transfert de charge à l'interface électrode–électrolyte, processus nécessitant de l'énergie pour rompre et reformer les liaisons chimiques.

Bien que ces pertes apparaissent aux deux électrodes, la réaction d'oxydation de l'hydrogène à l'anode est généralement beaucoup plus rapide que la réduction de l'oxygène à la cathode, ce qui fait que les pertes d'activation sont essentiellement dominées par les réactions cathodiques.

Ces pertes sont significatives à faible densité de courant, et tendent à diminuer lorsque le potentiel devient plus négatif. Elles dépendent de plusieurs paramètres, notamment la pression et la concentration des gaz réactifs (hydrogène et oxygène).

La tension de perte d'activation peut être modélisée par la relation suivante :

$$u_{\text{act}} = \beta_1 + \beta_2 T_{\text{PEMFC}} + \beta_3 T_{\text{PEMFC}} \ln(j \cdot 5 \cdot 10^{-3}) + \beta_{24} T_{\text{PEMFC}} \ln(C_{O_2}^*) \quad (\text{II.3})$$

Avec:

- j : densité de courant (A/cm^2)
- T_{PEMFC} : température de fonctionnement de la pile (K)
- $C_{O_2}^*$: concentration en oxygène à la cathode (mol/cm^3)

La concentration des gaz à l'interface est obtenue via les expressions suivantes :

$$C_{O_2}^* = \frac{P_{O_2}^*}{5.08 \cdot 10^6 \cdot \exp\left(-\frac{498}{T_{\text{PEMFC}}}\right)} \quad (\text{II.4})$$

$$C_{H_2}^* = \frac{P_{H_2}^*}{1.08 \cdot 10^6 \cdot \exp\left(\frac{77}{T_{\text{PEMFC}}}\right)} \quad (\text{II.5})$$

Les pressions partielles des gaz à l'interface s'expriment par :

$$P_{O_2}^* = P_{\text{cath}} \cdot (1 - X_{H_2 \text{sat}_o}) \quad (\text{II.6})$$

$$P_{H_2}^* = P_{\text{anod}} \cdot \left(1 - \frac{1}{2} X_{H_2 \text{sat}_o}\right) \quad (\text{II.7})$$

Où :

- $C_{O_2}^*$, $C_{H_2}^*$: concentrations respectives de l'oxygène et de l'hydrogène à l'interface électrode-électrolyte (mol/cm^3).
- P_{cath} , P_{anode} : pressions d'alimentation en oxygène et hydrogène (atm).
- $P_{O_2}^*$, $P_{H_2}^*$: pressions partielles respectives à l'interface.
- $X_{H_2\text{sat}_o}$: fraction molaire de saturation d'eau dans le gaz humidifié (valeur typique : 0.5).

□ **Pertes d'activation :**

Les pertes d'activation correspondent à la surtension nécessaire pour initier les réactions électrochimiques se produisant à l'anode et à la cathode de la pile à combustible. Elles sont principalement dues au transfert de charge à l'interface électrode-électrolyte, processus nécessitant de l'énergie pour rompre et reformer les liaisons chimiques.

Bien que ces pertes apparaissent aux deux électrodes, la réaction d'oxydation de l'hydrogène à l'anode est généralement beaucoup plus rapide que la réduction de l'oxygène à la cathode, ce qui fait que les pertes d'activation sont essentiellement dominées par les réactions cathodiques.

Ces pertes sont significatives à faible densité de courant, et tendent à diminuer lorsque le potentiel devient plus négatif. Elles dépendent de plusieurs paramètres, notamment la pression et la concentration des gaz réactifs (hydrogène et oxygène).

La tension de perte d'activation peut être modélisée par la relation suivante :

$$u_{\text{act}} = \beta_1 + \beta_2 T_{\text{PEMFC}} + \beta_3 T_{\text{PEMFC}} \ln(j \cdot 5 \cdot 10^{-3}) + \beta_{24} T_{\text{PEMFC}} \ln(C_{O_2}^*) \quad (\text{II.8})$$

avec :

j : densité de courant (A/cm^2)

T_{PEMFC} : température de fonctionnement de la pile (K)

$C_{O_2}^*$: concentration en oxygène à la cathode (mol/cm^3)

La concentration des gaz à l'interface est obtenue via les expressions suivantes :

$$C_{O_2}^* = \frac{P_{O_2}^*}{5.08 \cdot 10^6 \cdot \exp\left(-\frac{498}{T_{\text{PEMFC}}}\right)} \quad (\text{II.9})$$

$$C_{H_2}^* = \frac{P_{H_2}^*}{1.08 \cdot 10^6 \cdot \exp\left(-\frac{77}{T_{\text{PEMFC}}}\right)} \quad (\text{II.10})$$

Les pressions partielles des gaz à l'interface s'expriment par :

$$P_{O_2}^* = P_{\text{cath}} \cdot (1 - X_{H_2\text{sat}_o}) \quad (\text{II.11})$$

$$P_{H_2}^* = P_{\text{anod}} \cdot \left(1 - \frac{1}{2}X_{H_2\text{sat}_o}\right) \quad (\text{II.12})$$

Où :

- $C_{O_2}^*$, $C_{H_2}^*$: concentrations respectives de l'oxygène et de l'hydrogène à l'interface électrode-électrolyte (mol/cm^3).
 - P_{cath} , P_{anod} : pressions d'alimentation en oxygène et hydrogène (atm).
 - $P_{O_2}^*$, $P_{H_2}^*$: pressions partielles respectives à l'interface.
 - $X_{H_2\text{sat}_o}$: fraction molaire de saturation d'eau dans le gaz humidifié (valeur typique : 0.5).
- Pertes chimiques :

Les chutes de tension ohmiques sont dues à la résistance qu'opposent :

- Les électrodes et plaques bipolaires à la circulation des électrons.
- La membrane polymère au passage des protons [43].

La tension ohmique peut être exprimée de deux manières :

$$U_{\text{ohm}} = j \cdot \frac{e_m}{\sigma \cdot S_{\text{cell}}} \quad (\text{II.13})$$

Ou sous forme globale :

$$U_{\text{ohm}} = I_{\text{PEMFC}} \cdot (R_m + R_c) \quad (\text{II.14})$$

Où :

j : densité de courant (A/cm^2),

S_{cell} : surface active de la cellule (cm^2),

e_m : épaisseur de la membrane (μm),

σ : conductivité ionique de la membrane (S/cm),

I_{PEMFC} : courant total de la pile (A),

R_c : résistance de contact des électrodes (Ω),

R_m : résistance équivalente de la membrane (Ω), donnée par :

$$R_m = \frac{r_m \cdot I_{\text{PEMFC}}}{S_{\text{cell}}} \quad (\text{II.15})$$

La résistance spécifique r_m dépend de la température, de la densité de courant, et de l'humidité de la membrane λ . Elle s'exprime comme suit :

$$r_m = \frac{181.6 \left[1 + 0.03 \left(\frac{I_{\text{PEMFC}}}{S_{\text{cell}}} \right) + 0.062 \left(\frac{T_{\text{PEMFC}} - 303}{303} \right)^2 \left(\frac{I_{\text{PEMFC}}}{S_{\text{cell}}} \right)^{2.5} \right]}{\left[\lambda - 0.634 - 3 \left(\frac{I_{\text{PEMFC}}}{S_{\text{cell}}} \right) \right]} \cdot \exp \left[4.18 \cdot \left(\frac{T_{\text{PEMFC}} - 303}{T_{\text{PEMFC}}} \right) \right] \quad (\text{II.16})$$

En injectant cette expression dans la formule globale, on obtient :

$$U_{\text{ohm}} = \frac{I_{\text{PEMFC}}^2}{S_{\text{cell}}} \cdot r_m + I_{\text{PEMFC}} \cdot R_c \quad (\text{II.17})$$

Paramètres :

- j : densité de courant (A/cm^2)
- S_{cell} : surface active de la cellule (cm^2)
- e_m : épaisseur de la membrane (μm)
- σ : conductivité de la membrane (S/cm)
- λ : teneur en eau de la membrane ($0 \leq \lambda \leq 22$)
- T_{PEMFC} : température de fonctionnement (K)

Pertes de concentration :

Les pertes de concentration sont liées à l'appauvrissement en gaz réactifs (H_2 , O_2) dans les électrodes, ce qui réduit la pression partielle des réactifs et donc la tension de la cellule.

Cette perte devient significative à forte densité de courant, lorsque la consommation des gaz est supérieure au taux de renouvellement dans les canaux de gaz.

La perte de tension est modélisée par :

$$U_{\text{conc}} = -B \cdot \ln \left(1 - \frac{j}{j_{\max}} \right) \quad (\text{II.18})$$

où :

- $B = 0.016 \text{ V}$: constante de transfert de masse (valeur typique),
- j : densité de courant (A/cm^2),
- j_{\max} : densité de courant maximale ou courant limite (A/cm^2), définie comme le point où tout le combustible est consommé.

II.2.2 Caractéristiques de la pile à combustible

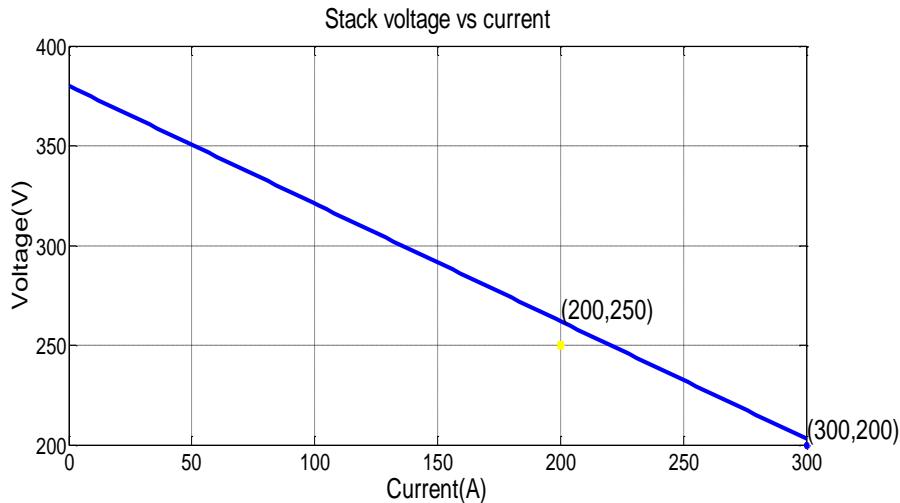


Figure II.2: Tension/courant de la pile.

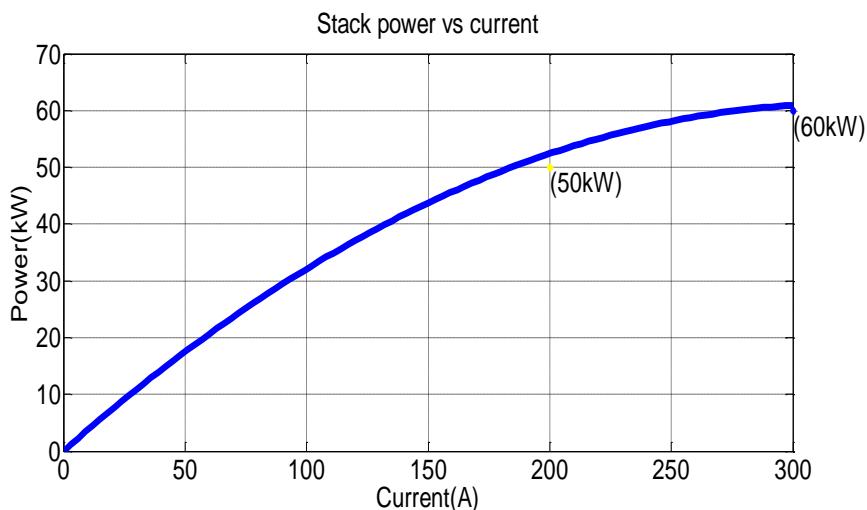


Figure II.3: Puissance/courant de la pile.

II.2.3 Dimensionnement de la pile à combustible

Nous avons choisi une tension du bus DC égale 500V. Pour déterminer le nombre de cellules de la PAC à mettre en série on constate qu'une élévation d'un facteur 2 via le convertisseur boost donne un bon rendement. Le stack doit alors fournir une tension de : $500/2 = 250V$ au point de puissance nominale. Afin de maintenir un bon rendement de la PAC il ne faut pas descendre en dessous de 0.7 V par cellule et 0.6A/cm².

On trouve alors le nombre de cellules :

$$250/0.7 = 357.14 \approx 357 \text{ cellules}$$

La puissance demandée

$$P_d = 50 \text{ kw}$$

$$50000 \text{ W} / 250 = 200 \text{ A}$$

Et on déduit la surface active :

$$200/0.6 = 7.6 \text{ cm}^2$$

Tableau II.1: Paramètres de la pile à combustible (PEMFC).

Paramètres	Valeurs	Unités
Tension nominale	250	V
Courant max	200	A
Puissance nominale	50	kW
Puissance maximale	60	kW
Nombre de cellules	357	Cell
Rendement nominal	55	%
Température de fonctionnement	65	°C
Débit d'air nominal	2100	I _{pm}
Pression d'alimentation en carburant	1.5	Bar
Pression d'alimentation en air	1	Bar

II.3 Dimensionnement des super condensateurs

Les super condensateurs servent de source d'énergie secondaire, intervenant principalement lors des phases d'accélération et de freinage du véhicule. On utilise un super Condensateur de 16V d'une capacité de 58F.

$$\text{Masse} = 0.63 \text{ Kg}$$

Chapitre II: Etude et modélisation de la pile à combustible et supercondensateur

La puissance nominale et la puissance Maximale des super condensateurs sont calculées comme suivant [43]:

La puissance nominale :

$$P_n = \frac{0.12V^2}{ESR_{DC} \times \text{mass}} = \frac{0.12 \times (16)^2}{0.022 \times 0.63} = 2.2kW$$

La puissance Maximale :

$$P_{max} = \frac{V^2}{4 \times ESR_{DC} \times \text{mass}} = \frac{17^2}{0.22 \times 4 \times 0.63} = 5.2kW$$



DATASHEET | 16V SMALL CELL MODULE

FEATURES AND BENEFITS	TYPICAL APPLICATIONS
<ul style="list-style-type: none"> > 16 V DC working voltage > Individually balanced cells > Compact, lightweight system > Screw terminals 	<ul style="list-style-type: none"> > Automotive subsystems > Consumer electronics > Portable power tools > Renewable energy systems > Short term UPS & telecom > Wind pitch control
	
PRODUCT SPECIFICATIONS	
ELECTRICAL	BMOD0058 E016 B02
Rated Capacitance ¹	58 F
Minimum Capacitance, initial ¹	58 F
Maximum ESR _{DC} , initial ¹	22 mΩ
Rated Voltage	16V
Absolute Maximum Voltage ⁴	17V
Maximum Continuous Current ($\Delta T = 15^\circ\text{C}$) ²	12.0 A _{RMS}
Maximum Continuous Current ($\Delta T = 40^\circ\text{C}$) ³	19 A _{RMS}
Maximum Peak Current, 1 second (non repetitive) ³	200 A
Leakage Current, maximum (B02 Suffix - Passive Balancing) ⁴	25 mA
Maximum Series Voltage	750V

Figure II.4: Caractéristiques du supercondensateur utilisé.

II.3.1 Modèle de supercondensateur

Le dimensionnement d'un stack de super condensateurs consiste à déterminer les nombres NSCS et NSCP des éléments qu'il faut placer en série et/ou en parallèle en fonction de l'énergie maximale transférée et de la puissance maximale qui va être extraite du stack. Le modèle équivalent d'un pack de super condensateurs est formé d'une capacité équivalente CSC en série avec une résistance équivalente RSC [21] [22].

a) **Modèle de supercondensateur :**

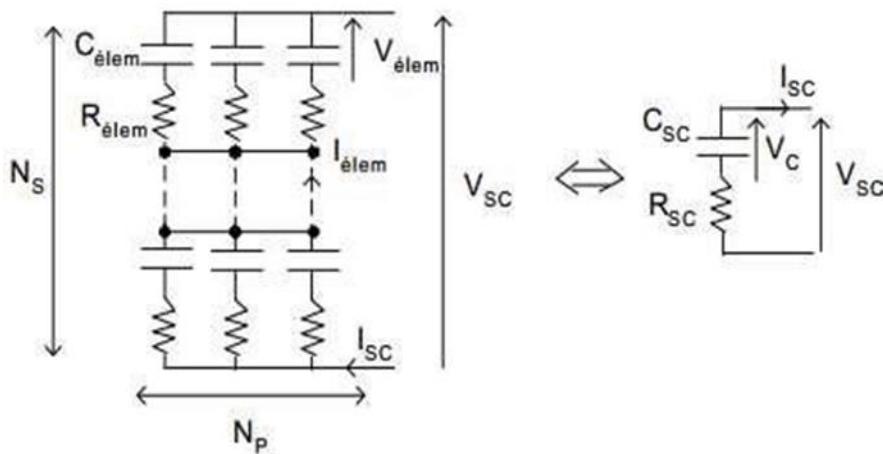


Figure II.5: Schéma équivalent d'un supercondensateur.

b) **Caractéristique de supercondensateur :**

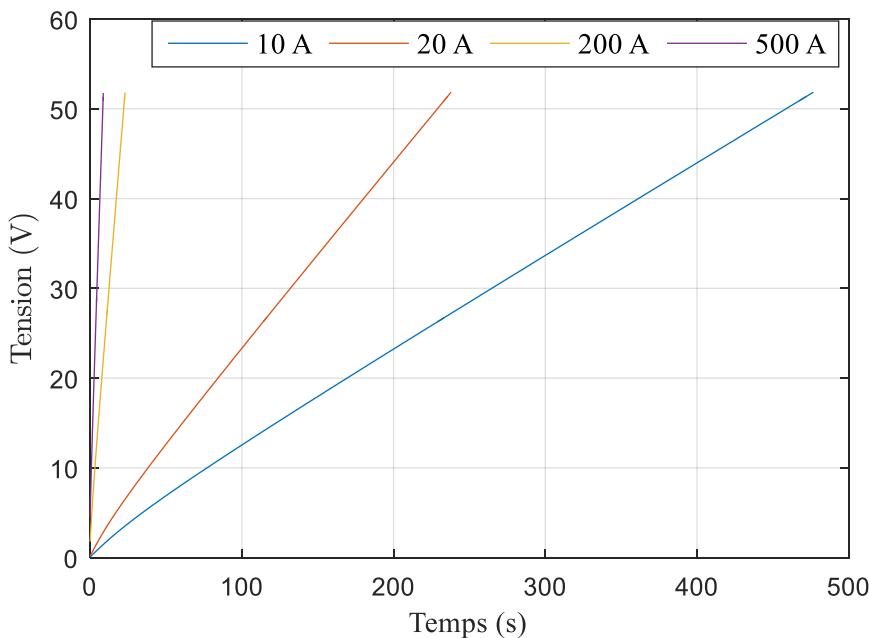


Figure II.6 : Courbes de charge du supercondensateur sous différents courants.

II.4 Modélisation des convertisseurs DC/DC

Les sources d'énergie sont connectées au système de propulsion via des convertisseurs DC/DC. La batterie Li-ion est reliée à la tension du bus continu via un convertisseur DC/DC Buck-Boost réversible en courant. Ce choix est motivé par la nécessité pour la batterie d'absorber l'énergie récupérée en régime de freinage, ainsi que l'excès de puissance fournie par la pile à combustible. D'autre part, la pile à combustible est connectée au bus DC via un convertisseur DC/DC Boost.

II.4.1 Modèle du convertisseur DC/DC Boost

Le convertisseur Boost est utilisé pour éléver la tension issue de la pile à combustible afin d'alimenter le bus DC du système de traction électrique. Le schéma électrique du convertisseur Boost est représenté à la Figure II.7.

Les équations dynamiques de ce convertisseur sont établies en régime de conduction continue (CCM). Elles décrivent:

- Le comportement dynamique du courant dans l'inductance,
- La tension aux bornes du condensateur de sortie.

Ces équations sont exprimées comme suit :

$$\begin{cases} \frac{dI_{\text{pac}}}{dt} = \frac{1}{L_1} (u_1 V_{\text{pac}} - V_{\text{DC}}) \\ \frac{dV_{\text{DC}}}{dt} = \frac{1}{C_{\text{DC}}} (u_1 I_{\text{pac}} - I_{\text{DC}}) \end{cases} \quad (\text{II.19})$$

Où :

I_{pac} : courant traversant l'inductance (A),

V_{pac} : tension de la pile à combustible (V),

I_{DC} : courant du bus DC en sortie du convertisseur (A),

V_{DC} : tension du bus continu (V),

L_1 : inductance de lissage (H),

C_{DC} : capacité du filtre de sortie (F),

$u_1 \in [0,1]$: commande de l'interrupteur S_1 , avec :

$u_1 = 1$ lorsque l'interrupteur est fermé,

$u_1 = 0$ lorsqu'il est ouvert.

II.4.1.1 Modèle à valeurs moyennes

Pour l'analyse et la commande du système dans un environnement continu (comme Simulink), il est courant de remplacer le signal u_1 par sa valeur moyenne sur une période de découpage. Cette valeur moyenne est appelée le rapport cyclique, noté α_{bat} , soit :

$$u_1 \approx \alpha_{\text{bat}}, \quad \text{avec } \alpha_{\text{bat}} \in [0,1]$$

En remplaçant dans les équations (II.20), on obtient le modèle à valeurs moyennes du convertisseur Boost :

$$\begin{cases} \frac{dI_{\text{pac}}}{dt} = \frac{1}{L_1} (\alpha_{\text{bat}} V_{\text{pac}} - V_{\text{DC}}) \\ \frac{dV_{\text{DC}}}{dt} = \frac{1}{C_{\text{DC}}} (\alpha_{\text{bat}} I_{\text{pac}} - I_{\text{DC}}) \end{cases} \quad (\text{II.20})$$

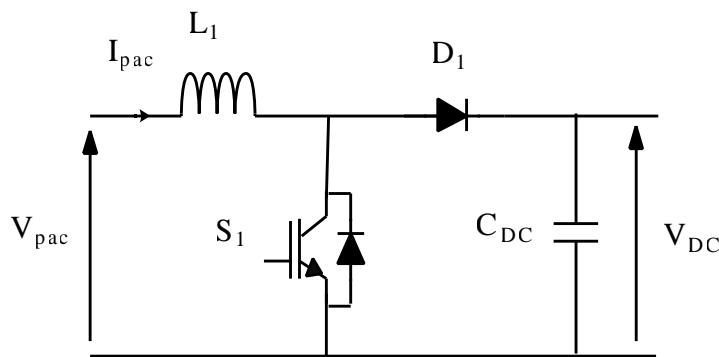


Figure II.7: Circuit électrique du convertisseur DC/DC Boost.

II.4.2 Dimensionnement du convertisseur DC/DC Boost

Le fonctionnement de convertisseur est conditionné par les grandeurs suivantes :

- L1 : L'inductance de lissage
- C_{DC} : Le condensateur de filtrage
- f : La fréquence de commutation

L'inductance de lissage L1 est utilisée pour limiter l'ondulation du courant pac ΔI à l'entrée du convertisseur. Le condensateur de filtrage limite les ondulations de tension du bus continu ΔV_{DC} . L'inductance L1 du convertisseur Boost, associée à la pile combustible, est dimensionnée par l'équation :

$$L_1 = \frac{v_{dc}}{4 \cdot f \cdot \Delta I_{pac}} \quad (\text{II.21})$$

Où pac ΔI est l'ondulation du courant d'entrée.

Le condensateur de capacité C_{DC} est dimensionné par la relation (Annexe A):

$$C_{DC} = \frac{I_{pac}}{4 \cdot f \cdot \Delta v_{dc}} \quad (\text{II.22})$$

Où ΔV_{DC} est l'ondulation de la tension de bus.

Tableau II.2: Résultats du calcul des paramètres du convertisseur.

Paramètres	V _{DC}	f	ΔI_{sc}	L2	C _{DC}
Valeurs	500V	10KHz	20A	2.77mH	833μF

II.4.3 Dimensionnement du convertisseur DC/DC Buck-Boost

Le dimensionnement du convertisseur DC/DC Buck-Boost se fait de manière similaire à celui du convertisseur Boost utilisé pour la pile à combustible.

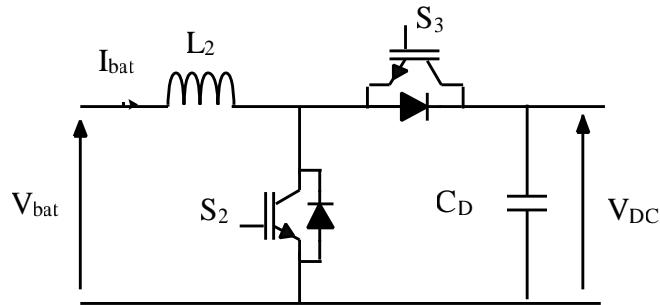


Figure II.8: Circuit électrique du convertisseur DC/DC Buck_Boost.

Calcul de l'inductance de lissage L2 :

$$L_2 = \frac{V_{dc}}{4 \cdot f \cdot \Delta I_{sc}} \quad (\text{II.23})$$

Tableau II.3: Paramètres du convertisseur DC/DC Buck-Boost.

Paramètres	V_{DC}	f	ΔI_{sc}	L_2	C_{Dc}
Valeurs	500V	10KHz	20A	2.77mH	833μF

Conclusion

Dans cette partie, nous avons modélisé les principales sources d'alimentation du système hybride, à savoir la pile à combustible et le supercondensateur, en détaillant leurs caractéristiques électriques ainsi que leur dimensionnement. Nous avons également étudié les convertisseurs DC/DC nécessaires à l'adaptation des niveaux de tension, notamment les topologies Boost et Buck-Boost. L'ensemble de cette modélisation constitue une base solide pour la simulation du système global et pour la mise en œuvre d'une gestion de puissance efficace.

Chapitre III : Gestion de puissance du système hybride

III.1 Introduction

Dans cette partie du travail, nous nous sommes concentrés sur la gestion de la puissance dans un système hybride composé d'une pile à combustible (PAC) et d'un supercondensateur. L'objectif principal est de répartir intelligemment la puissance entre ces deux sources afin d'optimiser les performances globales du système, tout en préservant la durée de vie de la PAC. Nous avons développé une stratégie de gestion d'énergie basée sur un algorithme simple, que nous avons simulée sous MATLAB . Ce chapitre présente la structure du système, la logique de gestion appliquée ainsi que les résultats obtenus.

III.2 Architecture du système étudié

Le système que nous avons modélisé est composé de deux sources principales d'énergie :

- **La pile à combustible (PAC)** qui représente la source principale, capable de fournir une puissance continue mais peu adaptée aux variations rapides.
- **Le supercondensateur (SC)** qui agit comme une réserve d'énergie capable de réagir très rapidement pour absorber ou fournir de la puissance transitoire.

Les deux sources sont interconnectées à travers des convertisseurs DC/DC. La charge est alimentée par une tension continue stabilisée.

Ce couplage permet de tirer parti des avantages de chaque source : la PAC pour son autonomie et le SC pour sa rapidité.

III.3. Objectifs et stratégie de gestion de puissance

Le but de la stratégie que j'ai conçue est de :

- Soulager la PAC en évitant qu'elle subisse des appels de courant soudains.
- Utiliser le supercondensateur pour les pics de puissance ou les chutes rapides de charge.
- Maintenir une tension continue stable au niveau du bus DC.
- Réduire la consommation inutile d'énergie et les pertes.

III.3.1. Logique de répartition de la puissance

Nous avons adopté une stratégie simple mais efficace, fondée sur un algorithme conditionnel :

- Lorsque la charge demande une puissance inférieure ou égale à une valeur seuil fixée, la PAC alimente seule le système.
- Lorsque la puissance demandée par la charge est inférieure à la puissance fournie par la PAC, celle-ci alimente directement la charge. Le surplus de puissance est alors utilisé pour recharger le supercondensateur, après vérification de son état de charge afin d'assurer une gestion optimale et éviter toute surcharge.
- En cas de demande supérieure au seuil, la PAC fournit sa puissance nominale tandis que le supercondensateur complète le reste.
- Dans le ce cas ou la pile à combustible ne fournit pas de puissance, le système est à l'arrêt. La charge est déconnectée pour faute d'approvisionnement.

Tableau III.1: Tableau représentant les différents modes.

Mode	P_{ch}
Mode 1	$P_{ch}=P_{pac}$
Mode 2	$P_{ch}=P_{pac}+\text{chargement du supercondensateur}$
Mode 3	$P_{ch}= P_{pac}+P_{sc}$
Mode 4	$P_{pac}=0$

III.3.2 Organigramme de gestion proposé pour la gestion de puissance hybride PAC/SC

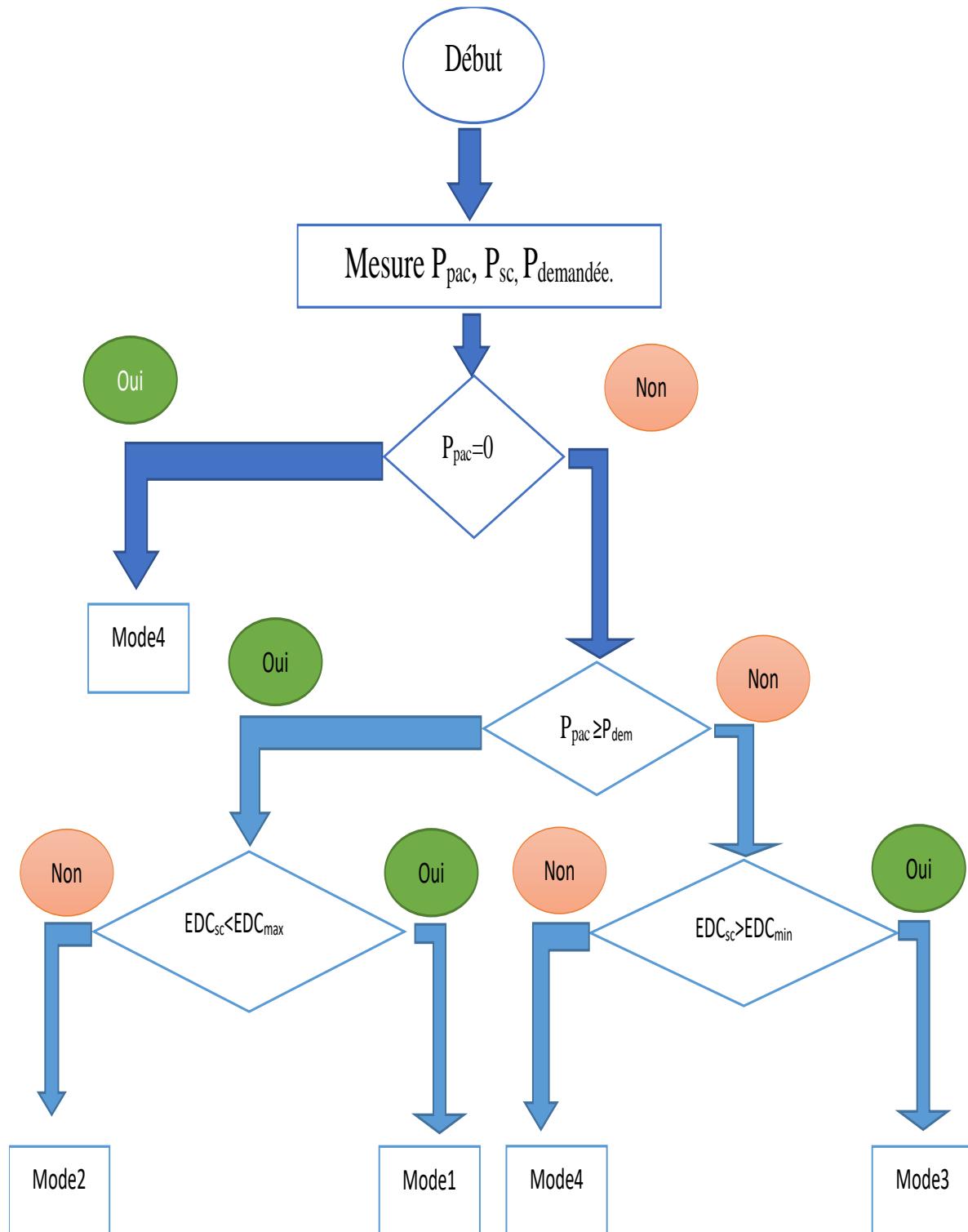


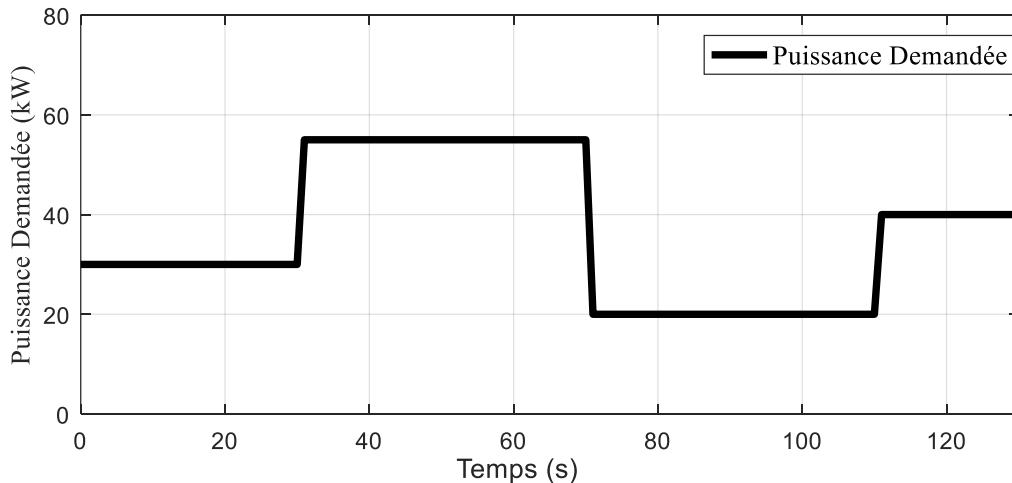
Figure III.1: Organigramme de gestion de puissance du système hybride.

III.4 Modélisation sous MATLAB

Nous avons développé une simulation sous MATLAB où les composants du système ont été modélisés de manière simplifiée, tout en assurant une représentation cohérente de leurs dynamiques.

III.4.1 Résultats de la simulation

Suite à la simulation de l'algorithme de gestion sous Matlab/Simulink, on observe les courbes de puissance présentées ci-dessous.



FigureIII.2: Puissance demandée par le véhicule.

Commentaire :

La courbe représente la variation de la puissance demandée sur 120 secondes, divisée en plusieurs étapes :

- **0 à 30 s** : puissance stable à 30 kW.
- **30 à 40 s** : montée rapide jusqu'à 55 kW.
- **40 à 70 s** : maintien à la puissance maximale de 55 kW.
- **70 à 80 s** : chute brutale à 20 kW.
- **80 à 110 s** : stabilisation à 20 kW.
- **110 à 120 s** : remontée progressive à 40 kW.

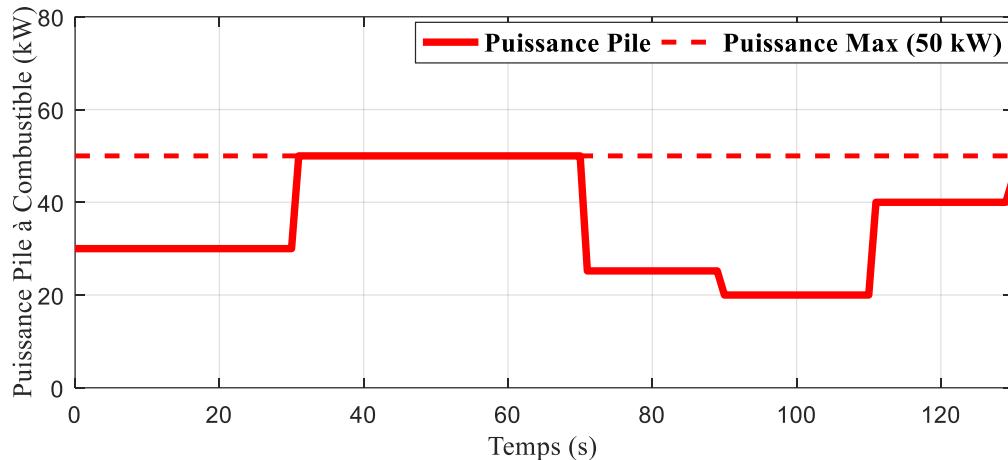


Figure III.3: Puissance de la PAC.

Commentaire :

Cette courbe illustre le fonctionnement d'une pile à combustible de 50 kW selon un cycle de 130 secondes comportant plusieurs paliers de puissance. Le système démarre à 30 kW, atteint ensuite sa puissance nominale maximale de 50 kW pendant 30 secondes, redescend à 25 kW pour une phase de fonctionnement réduit, puis remonte à 40 kW en fin de cycle.

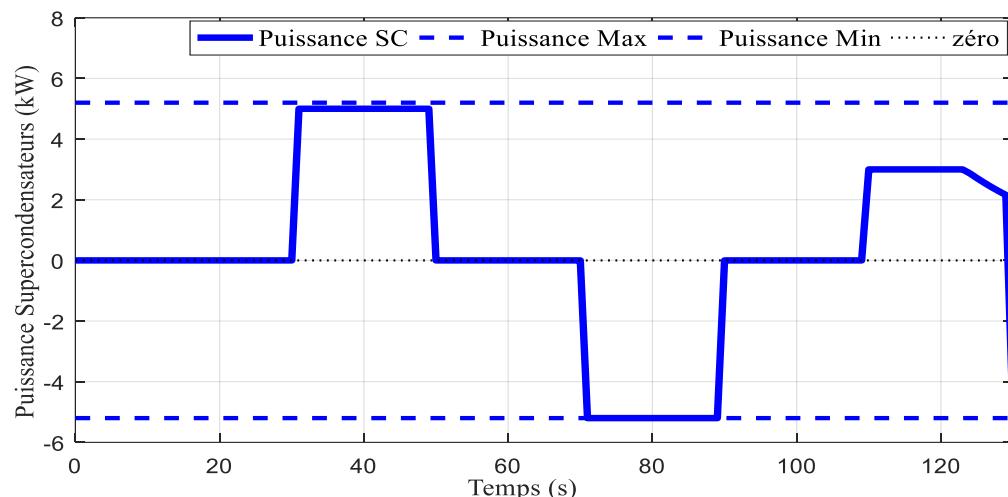


Figure III.4: Puissance du super condensateur.

Commentaire :

Cette courbe reflète le cycle de charge/décharge d'un supercondensateur, limité par ses capacités nominales.

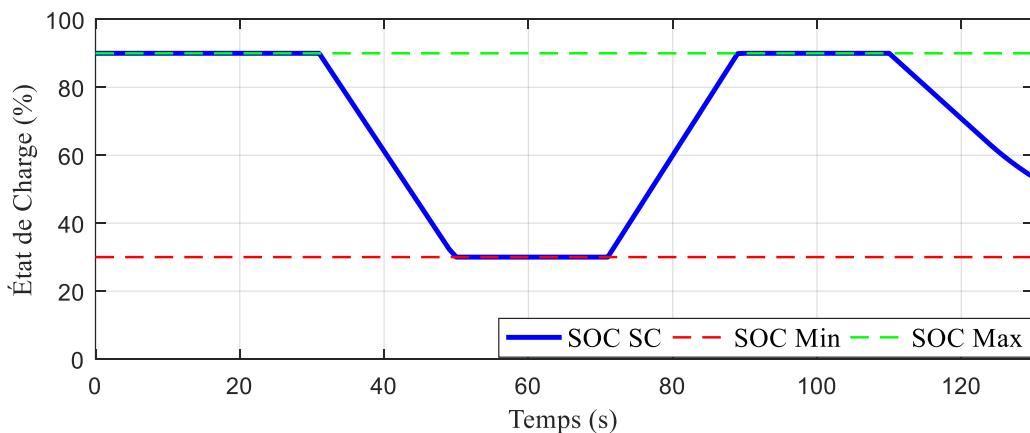


Figure III.5: Etat de charge du super condensateur.

Commentaire

La courbe représente l'état de charge des supercondensateurs tout au long du cycle de fonctionnement. On remarque que leur niveau reste élevé tant qu'ils ne sont pas sollicités. Lors d'une forte demande en énergie, le SOC chute rapidement jusqu'à la limite minimale, ce qui indique une phase de décharge active. Ensuite, dès que la charge diminue, les supercondensateurs se rechargent progressivement jusqu'à atteindre de nouveau leur capacité maximale. Ce comportement confirme leur rôle dans la gestion transitoire de l'énergie, en assurant un soutien rapide lors des pics de puissance.

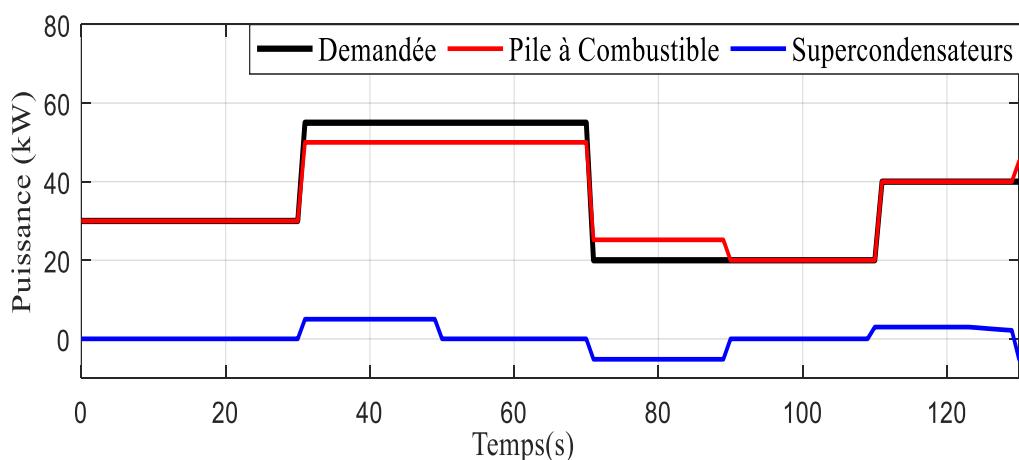


Figure III.6: Les différentes puissances.

Commentaire

La courbe met en évidence la manière dont la puissance est répartie entre la pile à combustible et les supercondensateurs pour satisfaire la demande du système. On constate que la pile assure principalement l'alimentation en énergie de façon régulière, tandis que les supercondensateurs prennent le relais lors des hausses soudaines de la demande. Ce fonctionnement permet d'améliorer la réactivité et l'équilibre global du système hybride.

III.4.2. Répartition dynamique de la puissance

- La PAC délivre une puissance stable, correspondant à sa valeur de référence.
- Le supercondensateur prend le relais dès que la demande dépasse cette valeur, et se recharge lorsque la charge diminue.

III.4.3 Comportement du SOC

- Le SOC du supercondensateur varie de façon cohérente avec les périodes de décharge (demande forte) et de recharge (demande faible).

III.4.4 Économie d'énergie et réduction du stress

- La PAC est protégée contre les variations rapides, ce qui est bénéfique pour sa longévité.
- Le supercondensateur améliore la réactivité du système sans gaspiller l'énergie.

III.5 Analyse et limites

La stratégie que j'ai mise en œuvre est simple, mais elle fonctionne bien pour les cas testés. Cependant, elle présente des limites :

- Elle ne prend pas encore en compte les pertes thermiques ni les rendements variables.
- Une commande plus avancée (comme floue, adaptative, prédictive) pourrait améliorer encore les performances.

Conclusion

À travers cette simulation, nous avons pu démontrer qu'une gestion de puissance bien conçue dans un système hybride combinant une pile à combustible et un supercondensateur permet d'assurer la stabilité de la tension de sortie tout en préservant la PAC des variations brusques de charge. La stratégie que nous avons développée a permis de répartir efficacement

Chapitre III: Gestion de puissance du système hybride

la puissance entre les deux sources, en fonction de la demande et de l'état de charge du supercondensateur. Grâce à la simulation sous Matlab que nous avons implémenté, nous avons simulé plusieurs scénarios réalistes et analysé en détail le comportement du système. Ces résultats constituent une base solide pour des développements futurs dans des applications pratiques, notamment dans les domaines des transports électriques ou des systèmes énergétiques autonomes.

Conclusion générale

Conclusion générale

Ce mémoire a été consacré à l'étude, la modélisation et la simulation d'un système de propulsion hybride basé sur l'association d'une pile à combustible de type PEM et de supercondensateurs, dans une optique d'intégration dans les véhicules électriques.

Face aux limites des solutions de stockage d'énergie traditionnelles – notamment les batteries, souvent limitées en termes de durée de vie et de réponse dynamique – l'idée d'exploiter la complémentarité entre différentes sources s'est imposée comme une piste pertinente. L'architecture hybride développée vise ainsi à combiner les avantages de chaque technologie : fournir une énergie propre et stable via la pile à combustible, et assurer une réponse rapide aux demandes transitoires grâce aux supercondensateurs.

La première partie de ce travail a permis de mieux comprendre l'évolution des véhicules électrifiés ainsi que les différentes configurations de motorisation existantes. L'analyse des technologies de stockage a ensuite mis en lumière les caractéristiques et les limites de chaque composant, justifiant l'intérêt d'une hybridation.

La modélisation mathématique et électrique de la pile à combustible, du supercondensateur et des convertisseurs DC/DC associés a été réalisée sous l'environnement Matlab/Simulink. Une stratégie de gestion de puissance a été développée, avec pour objectif de répartir intelligemment l'énergie entre les deux sources selon la demande instantanée.

À travers les simulations menées, il a été démontré que :

- Le supercondensateur prend en charge efficacement les pics de puissance,
- La pile à combustible est moins sollicitée lors des variations brusques, ce qui améliore sa longévité,
- La tension de sortie reste stable, assurant ainsi un bon comportement global du système et la stratégie de gestion mise en œuvre optimise les performances du système en termes d'efficacité et de réactivité.

En définitive, ce mémoire nous a permis de conclure que l'hybridation pile à combustible / supercondensateur constitue une solution pertinente pour les systèmes de propulsion embarqués, en particulier dans le cadre de la mobilité propre. Cette architecture

Conclusion générale

répond aux exigences de stabilité, de puissance, et de durabilité que requièrent les applications de transport modernes.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] Luderer, G., Madeddu, S., Merfort, L., Ueckerdt, F., Pehl, M., Pietzcker, R., ... & Kriegler, E. (2022). Impact of declining renewable energy costs on electrification in low-emission scenarios. *Nature Energy*, 7(1), 32-42.
- [2] Chang, X., Ma, T., & Wu, R. (2019). Impact of urban development on residents' public transportation travel energy consumption in China: An analysis of hydrogen fuel cell vehicles alternatives. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(30), 16015-16027.
- [3] https://www.academia.edu/19729002/Fuel_Cell_Powered_Vehicles_Using_Supercapacitors_Device_Characteristics_Control_Strategies_and_Simulation_Results
- [4] <https://www.tesla-mag.com/histoire-de-la-voiture-electrique-de-linvention-a-nos-jours/>
- [5] <https://www.lavoiturehybride.com/info/histoire-de-la-voiture-hybride/>
- [6] <https://voiture.kidioui.fr/lexique-automobile/tout-electrique.html>
- [7] <https://sites.google.com/site/waag78/la-voiture-dans-sa-complexite/fonctionnement-de-la-voiture-electrique>,
- [8] <https://www.ecoconso.be/fr/content/voiture-electrique-ses-avantages-et-inconvénients>,
- [9] <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2022>
- [10] Ehsani, M., Gao, Y., Gay, S. E., & Emadi, A. (2005). *Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles: Fundamentals, Theory, and Design*. CRC Press
- [11] voiture-tunning
- [12] innovauto.org
- [13] Cuif, L., Gandon, E., Kunzinger, E., Mercier, A., Nabeebaccus, N., & Soucova, K. (2016). *Matériaux écoresponsables et durables pour le développement de véhicules électriques* (Projet 3A).
- [14] Multon, B., & Peter, J.-M. (1996). *Le stockage de l'énergie électrique : moyens et applications*. Synthèse de la journée d'étude SEE, Clubs 13 et 11, 1er février 1996, CNAM Paris, École nationale supérieure de Cachan, antenne de Bretagne.
- [15] Diop, D. (2004). *Contribution à la gestion de l'énergie d'un véhicule hybride série* (Thèse de doctorat, Université de Franche-Comté).

Références bibliographiques

- [16] Lachaize, J. (2004). *Étude des stratégies et des structures de commande pour le pilotage des systèmes énergétiques à pile à combustible (PAC) destinés à la traction* (Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, 20 septembre 2004).
- [17] Mkahl, R. (2015). *Contribution à la modélisation, au dimensionnement et à la gestion des flux énergétiques d'un système de recharge de véhicule électrique : étude de l'interconnexion avec le réseau électrique* (Thèse de doctorat, Université de Technologie de Belfort – Montbéliard).
- [18] Marc, N. (2013). *Méthodologie de dimensionnement d'un véhicule hybride électrique sous contrainte de minimisation des émissions de CO₂* (Thèse de doctorat, Université d'Orléans).
- [19] Conway, B. E. (1999). *Electrochemical Supercapacitors: Scientific Fundamentals and Technological Applications*. Springer US
- [20] Supercondensateurs, une alternative aux batteries
- [21] Benaouadj, M. (2016). *Gestion de l'énergie d'un système hybride autonome pour application « Smart Grid »* (Thèse de doctorat, Université Mohamed Khider – Biskra, 4 juin 2016).
- [22] Lachaize, J. (2004). *Étude des stratégies et des structures de commande pour le pilotage des systèmes énergétiques à pile à combustible (PAC) destinés à la traction* (Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, 20 septembre 2004).
- [23] Alkama, R. (2020). *Cours de stockage de l'énergie et pile à combustible*. Université de Béjaïa. (Année universitaire 2019/2020).
- [24] Boukhelifa, A. (2012). *Étude et modélisation des supercondensateurs* (Mémoire de master, Université de Béjaïa).
- [25] Gualous, H. (2006). *Applications des supercondensateurs*. Techniques de l'Ingénieur.
- [26] Dupont, J. (2023). *Avantages et inconvénients des supercondensateurs*. Acapros.fr.
- [27] Coutanceau, C., et al. (2014). *Les piles à combustible : principes et applications*. CNRS Éditions.

Références bibliographiques

- [28] <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/pile-combustible>
- [29] : connaissancedesenergies.org
- [30] https://www.revolution-energetique.com/fiches-pedagogiques/quels-sont-les-differents-systemes-de-stockage-denergie/?utm_
- [31] Cours Master 2 ERM. (n.d.). *Pile à combustible et production de l'hydrogène*. Université de Batna.
- [32] Tarascon, J.-M., & Armand, M. (2001). Issues and challenges facing rechargeable lithium batteries. *Nature*, 414(6861), 359–367.
- [33] Barbir, F. (2007). *Les piles à combustible à membrane échangeuse de protons (PEMFC)*. Techniques de l'Ingénieur, traité Énergie.
- [34] Conway, B. E. (2001). *Les supercondensateurs électrochimiques : fondements scientifiques et applications technologiques*. Masson Éditeurs.
- [35] Institut Français du Pétrole (IFP Énergies nouvelles). (2019). *Systèmes hybrides et stockage d'énergie pour la mobilité électrique* (Rapport technique).
- [36] Andújar, J. M., & Segura, F. (2009). Fuel cells: History and updating. A walk along two centuries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(9), 2309–2322.
- [37] Burke, A. (2000). Ultracapacitors: why, how, and where is the technology. *Journal of Power Sources*, 91(1), 37–50.
- [38] Gualous, H., & Gallay, R. (2013). Supercapacitor energy storage and management for electric vehicle applications: A review. *Energy Conversion and Management*, 65, 1–13.
- [39] https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01065230/file/Resume_SGE2014_ESTACA_Mesbahi.pdf

Références bibliographiques

- [40] Maker, H. (2008). *Optimisation et gestion d'énergie pour un système hybride : association pile à combustible et supercondensateur* (Thèse de doctorat, Université de Technologie de Belfort-Montbéliard).
- [41] <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01497404/document#page=17&zoom=100,0>
- [42] Prasad, A. K., & Sundararajan, S. S. (2017). Performance of hybrid electric vehicle using fuel cell and supercapacitor. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(40), 25586–25597.
- [43] Evans, D., Zheng, J., & Roberson, S. (2000). Improved capacitor using amorphous RuO₂.
- [44] Maker, H. (2008). *Optimisation et gestion d'énergie pour un système hybride : association pile à combustible et supercondensateurs* (Thèse de doctorat, Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, 4 novembre 2008).

Résumé :

Ce mémoire présente l'étude et la modélisation d'un système hybride associant une **pile à combustible (PAC)** et des **supercondensateurs (SC)** pour la propulsion des véhicules électriques hybrides. Après un état de l'art sur les technologies de stockage d'énergie, la modélisation et le dimensionnement des sources et convertisseurs DC/DC sont développés. Une stratégie de gestion de puissance est ensuite proposée afin d'optimiser la répartition énergétique entre la PAC et les SC, d'améliorer le rendement global et de prolonger la durée de vie des composants. Les simulations réalisées sous MATLAB/Simulink confirment la pertinence du modèle et l'efficacité de la stratégie proposée. Ce travail démontre le potentiel des systèmes hybrides PAC/SC pour une mobilité durable et une électrification efficace des transports.

Abstract :

This thesis investigates the modeling and energy management of a **hybrid system combining a fuel cell (FC) and supercapacitors (SC)** for hybrid electric vehicle applications. After reviewing energy storage technologies, the modeling and sizing of the sources and DC/DC converters are developed. A power management strategy is proposed to optimize energy sharing between the FC and SC, improving efficiency and component lifespan. MATLAB/Simulink simulations validate the proposed model and demonstrate the effectiveness of the control approach. The study highlights the potential of FC/SC hybrid systems as a promising solution for sustainable and efficient electric mobility.