

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
UNIVERSITÉ MOULOUD MAMMERRI DE TIZI-OUZOU
FACULTÉ DU GÉNIE ÉLECTRIQUE ET D'INFORMATIQUE
DÉPARTEMENT D'ÉLECTROTECHNIQUE



THÈSE DE DOCTORAT LMD

Filière : Électrotechnique

Spécialité : Entraînements Électriques

Présentée par :

MOUALEK Riad

Sujet :

**Gestion d'Énergie d'une Source d'Alimentation Hybride
PEMFC - BATTERIES - SUPERCONDENSATEURS Appliquée aux Véhicules Électriques**

Devant le jury d'examen composé de :

M. HADDAD Salah	Professeur	UMMTO	Président
M. BENAMROUCHE Nacereddine	Professeur	UMMTO	Rapporteur
M. ZAOUIA Mustapha	Professeur	UMMTO	Examineur
M. BENTARZI Hamid	Professeur	UMBB	Examineur
M. HAMEL Meziane	MCA	UMBB	Examineur

Année universitaire : 2023 / 2024

Remerciements

Remerciements

Le travail présenté dans ce manuscrit est effectué au département d'électrotechnique de l'université Mouloud MAMMARI de Tizi-Ouzou.

Je tiens à remercier M. HADDAD Salah, Professeur au département d'électrotechnique à l'université de Mouloud MAMMARI de Tizi Ouzou, pour m'avoir fait l'honneur de présider mon jury de soutenance.

Je remercie également Monsieur BENAMROUCHE Nacereddine, Professeur à l'université de Tizi-Ouzou, pour m'avoir proposé ce thème. Je le remercie aussi pour ses qualités humaines, l'encadrement dynamique son aide et sa disponibilité tout au long de cette thèse. Qu'il trouve ici l'expression de ma profonde reconnaissance.

Je tiens également à exprimer toute ma gratitude ainsi que mes sincères remerciements à Monsieur HAMEL Meziane Maître de Conférences à l'université de Boumerdes pour son assistance sans failles et continuelle et sans quoi une grande partie de ce travail n'aurait jamais vu le jour. Je le remercie également pour ses contributions, ses conseils qui m'ont guidé et servi dans mes productions scientifiques.

J'exprime du fond du cœur mes remerciements les plus sincères à Monsieur ZAOUIA Mustapha, Professeur à l'université de Tizi-Ouzou pour ces grandes qualités humaines et professionnelles, qui m'a longuement formé, encouragé et épaulé durant toute la période de formation et de recherche.

Je tiens aussi à exprimer mes sincères remerciements à tous les membres du jury qui m'ont fait l'honneur d'accepter d'être examinateurs de ma thèse et pour l'intérêt qu'ils ont porté à mon travail de recherche.

J'exprime également mes sincères remerciements à M. Amar BOUSBAINÉ, Directeur du « College of Science and Engineering, University of Derby, en Angleterre de m'avoir accueilli en stage dans son laboratoire et pour les différentes discussions scientifiques que nous avons eues et à travers lesquelles j'ai pu profiter de ses larges connaissances.

Je tiens aussi à adresser mes sincères remerciements et ma profonde gratitude à ma sœur aînée Farida et son mari Nordine et leurs enfants qui m'ont accueilli chez eux durant la longue période du COVID, qui suivit mon stage en Angleterre. Je les remercie également pour m'avoir fourni plusieurs fois en différents composants électroniques nécessaires à mes expérimentations.

Enfin, un grand merci à ma très chère épouse Zina et à mes petits amours Céline et Alicia, pour leurs patiences et leurs soutiens indéfectibles durant toute ces années de travail. Je leur adresse à toutes les trois mon infinie gratitude pour leurs innombrables contributions et aides qui m'ont été très utiles durant les rédactions et préparations des événements scientifiques auxquels j'ai eu la chance de participer. Votre joie de vivre et votre curiosité m'ont constamment inspiré et motivé à donner le meilleur de moi-même. Vous êtes ma plus grande source de fierté et de bonheur.

Sommaire

Sommaire

Sommaire	i
Liste des figures	6
Liste des tableaux.....	viii
Introduction générale	1
Chapitre I: État de l'art	
I.1. État de l'art véhicules électriques	7
I.1.1. Histoire de la voiture électrique : impressionnante évolution	7
I.1.2. Différentes configurations des véhicules électriques	10
I.1.2.1. Configuration EV	10
I.1.2.2. Configuration HEV	12
I.1.3. Taux d'hybridation des véhicules	13
I.1.4. Infrastructure pour les véhicules électriques.....	14
I.1.5. Normalisation des batteries et de la recharge.....	15
I.2. État de l'art pile à combustible (PAC).....	16
I.2.1. Principe de fonctionnement	16
I.2.2. Les différents types de la PAC	17
I.2.2.1. Alkaline fuel cell (AFC)	18
33333333I.2.2.2.1. Pile à électrolyte mobile.....	19
I.2.2.2.2. Static electrolyte alkaline fuel cell (SAFC)	20
I.2.2.2.3. PAC à combustible dissout.....	21
I.2.2.2. Direct méthanol fuel cell.....	21
I.2.2.3. Les pafc (phosphoric acide électrolyte fuel cell)	22
I.2.2.4. Les mcfc (molten carbonate électrolyte fuel cell).....	23
I.2.2.5. Les sofc (solid oxyde électrolyte fuel cell)	24
I.2.2.6. Les pemfc : proton exchange membrane fuel cell	24
I.2.3. La gestion de l'eau dans une pemfc	26
I.2.4. Le facteur humidité pour une pemfc.....	27
I.2.5. Refroidissement et alimentation en air des pemfc.....	27
I.2.5.1. Refroidissement par air à travers l'alimentation cathodique.....	27
I.2.5.2. Refroidissement par circuit d'air indépendant	27

I.2.5.3. Refroidissement par eau.....	29
I.3. État de l'art batterie et éléments de stockage.....	31
I.3.1. Principe de fonctionnement.....	31
I.3.2. Classification des piles et batteries	31
I.3.2.1. Batteries ou piles primaires.....	31
I.3.2.2. Batteries secondaires et piles rechargeables.....	32
I.3.2.3. Les batteries de réserve.....	33
I.3.3. La décharge	34
I.3.4. La recharge.....	35
I.3.5. Les contraintes liées à la charge et la décharge.....	36
I.3.6. Le SOC et le DOD.....	37
I.3.7. Niveaux de tension	37
I.3.8. La durée de vie de la batterie	37
I.3.9. La standardisation des batteries	38
I.4. État de l'art supercondensateurs	39
I.4.1. Introduction	39
I.4.2. Principe de fonctionnement.....	40
I.4.3. Les supercapatteries	42
I.4.4. Commercialisation des supercondensateurs	43
I.4.5. Les supercondensateurs : déficit et perspectives d'avenir	43
I.5. Conclusion.....	44

Chapitre II: Modélisation des sources hybrides

II.1. Modélisation de la pile à combustible	45
II.1.1. Équation de Nernst	47
II.1.2. La non réversibilité de la PEMFC	48
II.1.2.1. Fuite de carburant.....	48
II.1.2.2. Pertes ohmique.....	48
II.1.2.3. Pertes par concentration	49
II.1.2.4. Pertes par activation.....	49
II.1.3. Réponse en boucle fermée.....	52
II.2. Modélisation de la batterie	53
II.2.1. Les besoins énergétiques.....	53
II.2.2. Capacité théorique de la batterie.....	53

II.2.3. Tension théorique.....	53
II.2.4. L'énergie théorique de la batterie.....	55
II.2.5. Énergie spécifique et densité d'énergie des batteries réelles.....	55
II.2.6. Modèle mathématique.....	56
II.2.7. Équations mathématiques.....	57
II.3. Modélisation du supercondensateur.....	60
II.3.1. Modèle simplifié.....	61
II.3.2. Modèle électro-mathématique.....	62
II.4. Modélisation du groupe convertisseurs.....	64
II.4.1. Introduction.....	64
II.4.2. Modélisation du convertisseur buck.....	65
II.4.2.1. Ondulation de la tension de sortie.....	68
II.4.2.2. Calcul du filtre de sortie.....	69
II.4.2.3. Modélisation du convertisseur boost.....	70
II.4.2.4. L'ondulation de la tension de sortie.....	71
II.4.2.5. L'ondulation du courant de source.....	72
II.5. Conclusion.....	72
Chapitre III: Gestion de l'énergie dans les systèmes multi-sources	
III.1. Introduction.....	75
III.2. Les besoins énergétiques.....	75
III.3. Système de stockage d'énergie.....	79
III.4. Approche globale.....	80
III.4.1. La protection.....	80
III.4.2. Estimation de l'état de charge.....	81
III.4.3. Équilibre et redistribution.....	82
III.5. Architecture du groupe motopropulseur.....	83
III.6. Évolution et classification de la gestion d'énergie.....	84
III.6.1. Objectif de la gestion d'énergie.....	84
III.6.2. Principe de fonctionnement des systèmes de gestion de l'énergie (EMS).....	84
III.6.3. Évolution du concept de gestion d'énergie.....	84
III.7. Quelques méthodes de gestions d'énergie connues et expérimentées.....	87
III.7.1. Méthodes heuristiques.....	87
III.7.2. Méthodes déterministes.....	87

III.7.3. Méthodes floues	87
III.7.4. Méthode basée sur l'optimisation globale	87
III.7.5. Programmation dynamique (DP)	88
III.7.6. Optimisation par essaim de particules (PSO)	88
III.7.7. Méthode de gestion d'énergie prédictives	88
III.7.8. Optimisation en temps réel	89
III.8. Développement d'une stratégie de gestion d'énergie	89
III.8.1. Simulation en boucle fermée	89
III.8.2. Simulation en boucle matérielle (<i>HIL- Hardware-in-the-loop</i>)	89
III.8.3. Test sur banc d'essai (dynamomètre)	90
III.9. Conclusion	91

Chapitre V: Contrôle en temps réel d'une source hybride d'énergie: Application à une architecture

PEMFC - Batteries - Supercondensateurs

IV.1. Introduction	92
IV.2. Structure et stratégie proposées	92
IV.3. Réalisation de l'émulateur	94
IV.3.1. Fonctionnement de l'émulateur	96
IV.4. Le bus continue.....	98
IV.5. Résultats de simulation	101
IV.6. Test sur banc d'essai.....	102
IV.7. Conclusion.....	110
Conclusion générale.....	108
ANNEXES :	109
Bibliographie	118

Liste des figures

Liste des figures

Chapitre I

Figure I.1. Photographie de 1884 qui présenterait la voiture électrique.....	7
Figure I.2. Photographie de 1899 qui présente « La jamais contente » au podium pour avoir dépassé le cap de 100 Km/h.	8
Figure I.3. Brochure Ford du Modèle T. (National Automotive History Collection).....	9
Figure I.4. Constitution d'un véhicule électrique.	11
Figure I.5. Différentes configurations de propulsions.....	11
Figure I.6. Système de transmission à variation continue (CVT)	13
Figure I.7. Trafic routier/unité de PIB en 2014 pour différents pays de l'OCDE.	14
Figure I.8 : (a)Électrolyse de l'eau. (b) Électrolyse inverse.	16
Figure I.9. Structure d'un élément de PAC (MEA).....	17
Figure I.10. Réaction oxydo-réduction dans une unité AFC	18
Figure I.11. PAC de type AFC utilisée dans le programme Apollo.	19
Figure I.12. Diagramme d'une pile Alcaline à Électrolyte mobile.....	20
Figure I.13. Schéma structurel d'une SAFC avec dépollueur CO_2	20
Figure I.14. Exemple type d'une PAC à combustible dissout.....	21
Figure I.15. Densité Tension/Courant à température ambiante d'une DMFC.....	22
Figure I.16. Graphe Tension/Courant d'une PAC à Basses Température et Pression.....	23
Figure I.17. Évolution des performances des MCFC	24
Figure I.18. Plaques bipolaires formant une cellule PAC.	25
Figure I.19. Mouvement des particules d'eau durant un cycle de réaction.....	26
Figure I.21: Pile "Ballard Nexa". (Reproduced by kind permission of Ballard Power Systems.)	29
Figure I.22 : Collecteurs internes des conduits de refroidissement.	30
Figure I.23 : Différents schémas de canalisation des conduits de refroidissement.	30
Figure I.24. Architecture interne des Batteries primaire.	32
Figure I. 25. Protection pour la charge des Batteries.....	33
Figure I.26. Processus de décharge dans une Batterie.	34
Figure I.27. Processus de charge dans une Batterie.	35
Figure I.28. Courbe de Ragone pour différents types de batteries.	36
Figure I.29. Durée de vie de la Batterie en fonction du courant de décharge	38
et de la température ($T_1 < T_4$). (Echelle log-log)	38

Figure I.30. Phénomène de l'autodécharge en fonction des conditions de stockage.	38
Figure I.31. Courbe de Ragone pour les Supercondensateurs.	39
Figure I.32. Schéma de principe d'un Supercondensateur.	40
Figure I.33. Structure à double couche d'un supercondensateur.	41
Figure I.34. Distribution de la tension à travers les différentes couches d'un Supercondensateur.....	42

Chapitre II

Figure II.1 : Schéma Équivalent d'une Pile à Combustible.....	46
Figure II.2 : Polarisation de la Pile à Combustible (Courbe de Tafel).....	46
Figure II.2. Courbe de Tafel pour deux vitesses différentes de réaction chimiques.	50
Figure II.3. Besoins Énergétique des États Unis s'échelonnant sur un siècle.....	53
Figure II.4. Constitution de la Batterie	55
Figure II.5. Comparaison des capacités de stockage entre Batteries primaires et rechargeables.	56
Figure II.6 : Capacité de la cellule de batterie en fonction du courant	57
Figure II.7. Schéma électrique équivalent de la batterie.	58
Figure II.8. Résultats obtenus en utilisant le modèle mathématique pour une cellule NiMh.....	59
Figure II.9. Résultats obtenus sur bancs d'essais pour une cellule NiMh.....	60
Figure II.10. Circuit électrique équivalent du supercondensateur.	61
Figure II.11. Diagramme de la composition principale d'un EDLC.....	62
Figure II.12. Schéma équivalent d'un EDLC.....	63
Figure II.13. Schéma Électrique du convertisseur Buck.	66
Figure II.14. Allure du courant à travers l'inductance L.	68
Figure II.15. Ondulation de la tension et du courant aux bornes du condensateur de sortie.....	69
Figure II.16. Convertisseur Boost.....	70
Figure II.17. Convertisseur Boost – Circuit Général.	71

Chapitre III

Figure III.1. Processus de conception d'un système d'énergie efficace.	77
Figure III.2. Différentes configurations utilisées pour le stockage d'énergie à bord d'un VE.....	79
Figure III.3. Topologie d'équilibrage de charge des dispositifs de stockage.	83
Figure III.4. Évolution des systèmes de gestion d'énergie.	85
Figure III.5. Évolution dans le temps des objectifs de gestion d'énergie.	86
Figure III.7. synoptique de la stratégie de gestion prédictive.....	88

Chapitre IV

Figure IV.1. Structure du système proposé.....	92
Figure IV.2. Modèle Simulink utilisé de la pile à combustible.....	93
Figure IV.3. Réponse Tension/Courant de la pile.....	93
Figure IV.4. Puissance disponible et produite par la pile.....	94
Figure IV.5. Schéma synoptique de l'émulateur de la PAC PEMFC.....	95
Figure IV.6. Schéma du circuit de principe de l'émulateur de la PAC PEMFC.....	95
Figure IV.7. Source d'alimentation « EA-PS 9080-50T » utilisée pour l'émulateur de la PAC.....	96
Figure IV.8. Circuit électronique de l'émulateur de la PAC.....	97
Figure IV.9. Circuit PCB de l'émulateur de la PAC.....	97
Figure IV.10. Résultats expérimentaux de l'émulateur de la PAC réalisé.....	98
Figure IV.11. Schéma électronique du convertisseur Boost.....	99
Figure IV.12. Circuit électronique PCB du convertisseur Boost.....	99
Figure IV.13. Schéma électrique du convertisseur Buck/Boost.....	100
Figure IV.14. Schéma électrique du convertisseur Buck/Boost.....	100
Figure IV.15. Circuit de simulation de la logique de contrôle en temps réel sous Matlab Simulink. ...	101
Figure IV.16. Résultats de simulation de la logique de commande en temps réel utilisée.....	102
Figure IV.17. Circuit de commande Simulink/dSPACE 1103.....	103
Figure IV.18. Organigramme de contrôle de la tension de Bus.....	104
Figure IV.20. Résultats expérimentaux du banc d'essai de la logique de contrôle.....	108
Figure IV.21. Résultats expérimentaux du banc d'essai de la logique de contrôle.....	109
Figure IV.22. Banc d'essai du système de gestion d'énergie.....	110

Nomenclature

Liste des abréviations

ADP: Approximate Dynamic Programming.
AFC: Alkaline Fuel Cell.
ANSI: American National Standards Institute.
Apollo : Lanceur Spatial Américain utilisé dans Différents Programmes.
B: Battery.
BEV: Battery Electric Vehicle.
C: Clutch (Embrayage).
CAN: Controller Area Network.
CCNUCC: Conférence Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques.
CCS: Combined Charging Standard.
COP21: Conference Of the Parties.
D: Differential (Différentiel).
DMFC: Direct Methanol Fuel Cell.
dSPACE 1103 : Interface numérique Matlab / Système physique.
E: ICE (Internal Combustion Engine).
ECMS: Energy Control Management Systems.
EDLC: Electrical Dual Layer Capacitor.
EIS: Electrochemical Impedance Spectroscopy.
EMS: Energy Management System.
ES: Energy Systems.
ESS: Energy Storage System.
EV-AWD: EV – All Wheel Drive.
F: Fuel Tank.
FG: Pignon Fixe.
G: Generator.
GB : Gearbox (Boite de Vitesse).
GEMINI: Programme Spatial Américain.
GES : Gaz à Effets de Serre.
GIC : Global Impact Carbone
GPL: Gas Propane Liquéfié.
HEV/ VHE: Hybrid Electric Vehicle ou Véhicule Hybride Électrique.
HEV-CVT: HEV - Continuous Variation Transmission.
HIL: Hardware In the Loop.
IEC: International Electrotechnical Commission.
LATAGE: Laboratoire des Techniques Avancées de Génie Électrique.
M: Electric Motor (Moteur Électrique).
MCFC: Molton Carbonate Fuel Cell.
MEA: Membrane Electrode Assembly.
MPC: Model Predictive Control.
NASA: National Aeronautics and Space Administration.

NTC : Negative Temperature Coefficient.
OCDE: Organisation pour la Coopération et le Développement économique.
OPEP : Organisation des Pays Exportateurs de Pétrole.
P: Power Converter.
PAC: Pile À Combustible.
PAFC: Phosphoric Acid Fuel Cell.
PC: Pseudo Condensateur.
PEM / PEMFC: Proton Exchange Membrane Fuel Cell.
PIB: Produit Intérieur Brut.
PMP: Pointwise Mathematical Programming.
Pt: Platinum.
PTC : Positive Temperature Coefficient.
RB: Load Balast (Reduction).
RC: Regulation Control.
SCAP : Sipercapabattery.
SIL: Software In the Loop.
SOFC: Solid Oxyde Fuel Cell.
SOH: State of Health.
T: Transmission including Brakes, Clutches and Gears.
TCO : Thermostat (Temperature Cut Off).
UE : L'Union Européenne.
USA : United States of America.
VE / EV: Véhicule Électrique ou Electric Vehicle.
ZEV : Zero Emission Vehicle.

Liste des Symboles

α : Coefficient de transfert de charge.
 α_{cdl} : Facteur d'accélération.
 ΔE_{Batt} : Énergie fournie par la Batterie.
 $\Delta \bar{g}_f$: Variation de l'énergie de Gibbs.
 $\Delta I_s, \Delta I_e$: Variation (Ondulation) du courant de sortie et d'entrée du convertisseur.
 ΔT : Écart de température.
 ΔV : Variation de la tension.
 ΔU_{cdl} : Variation de la tension aux borne de l'EDLC.
 ϵ_0, ϵ_r : Constantes diélectriques respectivement du vide et du milieu.
 λ : Stoechiométrie de l'air.
 γ : Coefficient de température de l'agrégat.
 ϕ : Humidité relative de l'air.
 ψ : Coefficient de transfert de charge.
 δ_m : Conductivité de la membrane.
 a : Activité chimique, Coefficient sous forme de logarithme en base 10 de l'équation de Tafel.
 a_x : Activité chimique de l'élément x.
 A_{fc} : Surface active de la PAC.
 b_1, b_2 : Respectivement Facteur de masse électronique et ionique de l'agrégat EDLC.
 C : Capacité de sortie du convertisseur.
 C_B : Capacité de la Batterie.
 C_{dl_e} : Capacité de l'EDL par électrode.
 C_{dl} : Capacité totale de l'EDLC.
 C_{dl}^0 : Capacité théorique ou mesurée à la fabrication de l'EDLC.
 C_{cycle_vie} : Vieillessement décroissant avec le temps.
 C_{min} : Valeur minimale de la capacité du filtre de sortie.
 C_n : Capacité de la Batterie.
 C_p : Capacité Thermique Spécifique.
 D : Rapport cyclique appliqué au convertisseur.
 d : Distance inter charges.
 DOD : Depth Of Discharge (Profondeur de décharge de la Batterie ou de l'élément de stockage).
 dQ, dq : Variation de la charge.
 dt : Variation du temps.
 dV : Variation de la tension.
 e : épaisseur de l'électrolyte.
 E_0 : Tension à vide aux conditions standards de température et de pression.
 E_{cell} / OCV : Tension à vide d'une cellule de PAC / Open Circuit Voltage.
 E_d : Densité d'énergie.
 E_{Drop} : Chute de tension totale.

e_m : épaisseur de la membrane.
 E_{Nernst} : Tension de Nernst équivalente à la somme des tension OCV de la PAC.
 E_{spec} : Énergie spécifique de la Batterie ou de l'élément de stockage.
 f : Fréquence de hachage du convertisseur.
 F : Constante de Faraday et vaut 96485 C.
 H : Facteur d'hybridation.
 H_s : Taux d'humidité de service.
 I : Courant.
 i_0 : Densité de courant d'échange.
 I_{Batt} : Courant débité par la Batterie.
 i_c : Courant du condensateur.
 I_D : Courant de sortie de la diode.
 I_e : Courant d'entrée du convertisseur.
 I_{EDLC} : Courant de charge ou de décharge de l'EDLC.
 I_L, di_L : Respectivement courant traversant l'inductance L et sa Variation.
 I_{D_min} : Courant maximal admissible par diode.
 I_{min}, I_{max} : Respectivement courant minimal et maximal dans le circuit.
 I_{op} : Courant de fonctionnement de l'appareil considéré.
 I_Q : Courant de sortie du transistor.
 i_{st} : Courant de pile (Current stack).
 I_s : Courant de sortie du convertisseur.
 J : Densité de courant.
 κ_t : Énergie d'activation ionique de l'agrégat.
 K_c : Coefficient linéaire de la capacité EDLC dépendant de ΔU_{cdl} .
 L : Inductance du convertisseur.
 L_{min} : Valeur minimale de l'inductance de lissage.
 m : Masse du Gaz convertie en Kg.
 M_m : Masse molaire.
 M_t : Masse totale du composant.
 N_B : Nombre de bras en parallèle constituant la Batterie.
 N_{cell} : Nombre d'élément de pile en série.
 N_{cycle} : Nombre de cycles de charge et décharge de l'accumulateur considéré.
 n_{e-} : Nombre d'électrons transférés.
 N_h : Temps en heures pour lequel la capacité C_n est considérée.
 P : Pression partielle de l'élément.
 P_0 : Pression standard à 100KPa.
 P_{Bat} : Puissance développée par les Batteries.
 P_{comb} : Puissance développée par le moteur à combustion.
 P_e : Puissance de la PAC.
 P_{MAX} : Puissance maximale.
 P_{th} : Puissance Thermique.

P_{spec} : Puissance spécifique de la Batterie ou de l'élément de stockage.
 P_x : Pression partielle du gaz x.
 Q : Charge finale.
 Q_0 : Charge initiale totale.
 Q_e : La charge total par électrode.
 Q_{EDLC} : Charge totale de EDLC.
 Q_T, Q_D : Respectivement transistor et diode. Interrupteurs statiques utilisés dans les convertisseurs.
 R : Constante universelle du gaz et vaut $8,314 \text{ J.K}^{-1}.\text{mol}^{-1}$.
 R_{Batt} : Résistance équivalente entre les bornes de la Batterie.
 R_c : Résistance de charge appliquée au convertisseur.
 R_{ct} : Résistance symbolisant le phénomène d'autodécharge.
 R_{EDLC} : Résistance équivalente totale entre les bornes de l'EDLC.
 R_{esr} : Résistance équivalente série de l'EDLC.
 R_{esr_0} : Résistance théorique série du composant.
 R_{esr_Batt} : Résistance équivalente série de la Batterie.
 R_{ohm} : Résistance ohmique surfacique équivalente de la PAC.
 S : Surface de l'électrode.
 SOC : State Of Charge (Etat de Charge de la Batterie ou de l'élément de stockage).
 t : Temps.
 T : Température ambiante.
 t_r : Temps de réaction.
 T_{ref} : Température de référence.
 T_s : Période du signal, équivalente à la fréquence de hachage.
 U_0 : Tension initiale.
 U_s : Tension de sortie du convertisseur.
 V_e : Tension d'entrée du convertisseur.
 V : Potentiel ou tension considérée.
 V_0 : Tension initiale.
 V_{Anode} : Potentiel à l'anode (Potentiel d'oxydation).
 $V_{act,cell}$: Chute de tension due à l'activation.
 V_{Batt} : Tension aux bornes de la Batterie.
 $V_{Cathode}$: Potentiel à la cathode (Potentiel de réduction).
 V_{cell} : Tension d'une cellule de PAC.
 $V_{con,cell}$: Chute de tension due à la concentration / la raréfaction des gaz au moment de la réaction.
 V_{EDLC} : Tension aux bornes de la cellule EDLC.
 V_D : Tension aux bornes de la diode.
 V_{fc} : Tension de la PAC.
 V_L : Tension aux bornes de l'inductance.
 $V_{ohm,cell}$: Chute de tension ohmique due aux matériaux de fabrication de la PAC.

V_Q : Tension aux bornes du transistor.

V_{sc} : Potentiel dû à l'accumulation des charges sur les double couches EDLC.

V_s, V_c : Respectivement Tension de service et de charge de l'EDLC.

v_t : Taux de balayage de la tension exprimé en $V \cdot s^{-1}$.

V_{s_min}, V_{s_max} : Respectivement tension de sortie, minimale et maximale du convertisseur.

$\langle X \rangle$: Valeur moyenne de la grandeur X.

Liste des tableaux

Liste des tableaux

Tableau I.1. Différents types de PAC	17
Tableau I. 2. Densité énergétique du méthanol en comparaison avec l'Hydrogène	21
Tableau I.3. Évolution de la technologie des composants de la MCFC	23
Tableau I.4. Humidité relative de l'air sortant en fonction de la température et de la Stoechiométrie de l'air.....	28
Tableau II.1. Grandeurs caractéristiques standards d'une PAC.	48
Tableau II.2. i_0 pour différents métaux utilisés comme électrodes.....	51
Tableau II.3. Tension de Pile à basses densités de courant.	52
Tableau II.4. Caractéristiques pour différents Potentiels d'électrodes.....	54
Tableau III.1. Caractéristiques des trois principaux types de véhicules électriques existants.	78

Résumé de la thèse

Cette thèse, intitulée "Gestion d'énergie d'une source hybride PEMFC - batteries - supercondensateurs appliquée aux véhicules électriques", explore les défis liés à l'optimisation de l'énergie dans les systèmes de transport électrique. Dans un contexte où la transition vers des solutions de mobilité durable est cruciale, notre recherche vise à améliorer l'efficacité et l'autonomie des véhicules électriques en intégrant plusieurs sources d'énergie.

Dans le premier chapitre, nous avons réalisé un état de l'art approfondi sur les technologies des véhicules électriques, en mettant l'accent sur les piles à hydrogène (PEMFC), les batteries et les supercondensateurs. Nous avons analysé les avancées technologiques et les limitations de chaque type de source d'énergie, en soulignant l'importance des systèmes hybrides pour répondre aux besoins énergétiques des véhicules modernes. Ce chapitre met en lumière les défis liés à la gestion de l'énergie, à la durée de vie des composants et à la recherche d'un équilibre entre performance et durabilité.

Le deuxième chapitre est consacré à la modélisation des différentes sources d'énergie et des convertisseurs DC-DC. Nous avons développé des modèles mathématiques permettant de simuler le comportement dynamique des systèmes hybrides. Les convertisseurs BUCK et BOOST sont présentés comme des éléments clés pour gérer la tension et optimiser le flux d'énergie. Un convertisseur BUCK est réalisé afin d'émuler la dynamique de la pile à hydrogène et réaliser ainsi la source d'énergie primaire et principale de notre système, tandis que le convertisseur BOOST élève la tension à la sortie de l'émulateur de la PEMFC, garantissant une tension stable sur le bus d'alimentation. Ces modèles ont été validés par des simulations numériques qui ont montré leur capacité à représenter fidèlement le fonctionnement du système.

Dans le troisième chapitre, nous avons étudié les méthodes de gestion d'énergie les plus courantes dans la littérature. Ce chapitre se concentre sur les stratégies de contrôle qui optimisent l'utilisation des différentes sources d'énergie. Nous avons examiné des approches telles que la gestion prédictive, le contrôle par rétroaction et les algorithmes d'optimisation. Ces méthodes permettent de répondre aux variations de la demande énergétique du véhicule tout en préservant la santé des batteries et des supercondensateurs. Une attention particulière a été portée à la gestion en temps réelle et à la manière dont cette stratégie peut être adaptée à des conditions de conduite réelles, maximisant ainsi l'efficacité globale du système.

Le quatrième chapitre présente les résultats expérimentaux de notre recherche. Nous avons présenté et implémenté, en utilisant MATLAB Simulink via l'interface dSPACE 1103 une méthode de gestion en temps réel couplé à la méthode déterministe. Nous avons à cet effet prédéterminé les différents niveaux de tension de chaque source utilisée en les contrôlant en temps réel à l'aide d'un algorithme réalisé sous l'interface Simulink. Pour réaliser la PEMFC nous avons utilisé une source d'alimentation continue associée à un convertisseur BUCK, assurant ainsi une tension de sortie adéquate et conforme à la dynamique d'une PEMFC. La tension de la pile à combustible ainsi réalisée, est appliquée au Bus d'alimentation via un deuxième convertisseur de type Boost élevant la tension de sortie de l'émulateur de la PEMFC à un niveau adéquat. Les batteries sont directement connectées au bus d'alimentation, ce qui permet un accès rapide à l'énergie stockée. Par ailleurs, un convertisseur de type buck-boost a été conçu et réalisé pour gérer

le flux d'énergie entre les batteries et les supercondensateurs. Ce système hybride a permis d'optimiser la distribution de l'énergie, garantissant que les besoins de puissance instantanés du véhicule sont satisfaits efficacement. Les résultats expérimentaux démontrent une amélioration significative de l'autonomie et de l'efficacité énergétique, validant ainsi notre approche de gestion d'énergie.

En conclusion, nous espérons que cette thèse apporte une contribution significative à la recherche sur les véhicules électriques, en proposant une approche intégrée pour la gestion d'énergie dans des systèmes hybrides. Les résultats obtenus ouvrent la voie à des applications pratiques dans le domaine des technologies de transport durable, tout en offrant des perspectives pour de futures recherches sur l'optimisation de l'énergie dans des systèmes de transport et de stockage.

Abstract

This thesis, entitled "Energy Management of a Hybrid Source PEMFC - Batteries - Supercapacitors Applied to Electric Vehicles,"** explores the challenges related to energy optimization in electric transport systems. In a context where the transition to sustainable mobility solutions is crucial, our research aims to improve the efficiency and autonomy of electric vehicles by integrating multiple energy sources.

In the first chapter, we conducted a thorough state of the art on electric vehicle technologies, focusing on hydrogen fuel cells (PEMFC), batteries, and supercapacitors. We analyzed the technological advancements and limitations of each type of energy source, highlighting the importance of hybrid systems in meeting the energy needs of modern vehicles. This chapter sheds light on the challenges related to energy management, component lifespan, and the pursuit of a balance between performance and sustainability.

The second chapter is dedicated to modeling the different energy sources and DC-DC converters. We developed mathematical models to simulate the dynamic behavior of hybrid systems. The BUCK and BOOST converters are presented as key elements for managing voltage and optimizing energy flow. A BUCK converter is implemented to emulate the dynamics of the hydrogen fuel cell, thereby serving as the primary energy source of our system, while the BOOST converter raises the voltage at the output of the PEMFC emulator, ensuring a stable voltage on the power bus. These models have been validated through numerical simulations that demonstrated their capacity to accurately represent the system's operation.

In the third chapter, we studied the most common energy management methods found in the literature. This chapter focuses on control strategies that optimize the use of various energy sources. We examined approaches such as predictive management, feedback control, and optimization algorithms. These methods allow for responses to variations in the vehicle's energy demand while preserving the health of the batteries and supercapacitors. Particular attention was given to real-time management and how this strategy can be adapted to actual driving conditions, thereby maximizing the overall efficiency of the system.

The fourth chapter presents the experimental results of our research. We introduced and implemented a real-time management method coupled with a deterministic method using MATLAB Simulink via the dSPACE 1103 interface. To achieve this, we predetermined the different voltage levels of each source used, controlling them in real time with an algorithm developed in the Simulink interface. For the PEMFC, we utilized a continuous power supply associated with a BUCK converter, ensuring an adequate output voltage that aligns with the dynamics of a PEMFC. The voltage from the fuel cell is applied to the power bus via a second BOOST converter, which raises the output voltage of the PEMFC emulator to an appropriate level. The batteries are connected to the power bus, allowing for quick access to stored energy. Additionally, a buck-boost converter is designed to manage the energy flow between the batteries and supercapacitors. This hybrid system optimizes energy distribution, ensuring that the instantaneous power needs of the vehicle are met efficiently. The experimental results demonstrate

a significant improvement in range and energy efficiency, thereby validating our energy management approach.

In conclusion, we hope this thesis makes a significant contribution to research on electric vehicles by proposing an integrated approach to energy management in hybrid systems. The results obtained pave the way for practical applications in the field of sustainable transport technologies, while also offering perspectives for future research on energy optimization in transport and storage systems.

Introduction générale

Introduction générale

L'utilisation prédominante des énergies fossiles dans les transports publics pose des enjeux majeurs, aussi bien économiques qu'écologiques, qui deviennent de plus en plus préoccupants. La hausse constante des coûts des carburants affecte profondément la société, se répercutant sur le secteur industriel et modifiant les modes de vie individuels. La libération de l'énergie contenue dans les carburants par leurs combustions s'accompagne inévitablement d'émissions de polluants aux effets variés. En tête, le dioxyde de carbone (CO_2), principal responsable de l'augmentation de l'effet de serre, représente environ 75 % des émissions mondiales de gaz à effet de serre et accélère le réchauffement climatique. À ses côtés, des polluants tels que le monoxyde de carbone (CO), les oxydes d'azote (NO_x), les hydrocarbures imbrûlés (HC) et les particules fines proviennent d'une combustion jamais totalement maîtrisée. Dans les zones urbaines, les oxydes d'azote sont responsables de près de 40 % de la pollution de l'air, tandis que l'exposition aux particules fines entraîne chaque année environ 4,2 millions de décès prématurés, selon l'OMS. Ces substances dégradent la qualité de l'air, aggravent la pollution des villes et ont des effets délétères sur la santé publique, notamment par l'augmentation des risques de maladies respiratoires et cardiovasculaires [1].

Dans l'industrie, l'importance du carburant réside dans sa densité énergétique exceptionnelle. Le moteur à combustion interne (MCI), le convertisseur principal de cette énergie, affiche un rendement de conversion du potentiel chimique en énergie mécanique très important. C'est là, le plus grand défi du véhicule électrique. À priori, l'hybridation MCI-Électrique constitue une première solution avant le recours au véhicule électrique total. [2]

Le véhicule électrique à l'ère contemporaine, est défini comme étant tout véhicule mu totalement ou partiellement par traction électrique. Cela comprend plusieurs sous catégories de véhicules, qu'on peut classer essentiellement en fonction de la source d'énergie dont ils dépendent et disposent. On trouve alors des véhicules alimentés exclusivement par des batteries, d'autres hybrides qui utilisent une source tierce qui peut être soit un moteur à combustion fonctionnant à énergie fossile, ou une pile à hydrogène combustible [1] [2]. Chaque type d'hybridation soulève des contraintes liées à son niveau de performances, évaluées en termes de rapport qualité/prix, d'impact carbone global (GIC), d'endurances et de fiabilité. L'ensemble de ces systèmes requièrent une gestion rigoureuse des flux d'énergie ; cette étape est cruciale dans le sens où une mauvaise gestion va impérativement impacter négativement sur la qualité et l'endurance du véhicule [3-5]. L'accent doit donc être mis à chaque étape et à tout instant sur les contraintes liées soit à la technologie du processus de gestion soit aux performances ciblées.

Les contraintes liées à la technologie sont globalement définies par les choix de la technologie future à adopter. Des consortiums seront amenés à se constituer pour élaborer et mettre sur pied les points cardinaux qui constitueront les fondamentaux du véhicule électrique. Plusieurs critères décisifs liés à ces contraintes prendront certainement en compte l'état et les résultats actuels de la recherche en la matière. On peut en citer les suivants [1].

- De quel type de source d'alimentation doit disposer un VE.
- Doit-on délaissier un type d'hybridation au profit d'un autre.
- Quels sont les standards les plus adéquats en termes de niveaux de tensions pour le bus d'alimentations.
- Comment doit-on se préparer pour la production de l'énergie électrique verte de futur.
- Quel est l'impact de la généralisation du véhicule électrique sur la société et l'environnement.

En ayant pallié les contraintes liées à la technologie, celles liées aux processus demanderont plus d'engagement. L'industrie doit impérativement et publiquement soulever les imperfections liées aux différents processus de fabrications actuels [4].

- Avec quel type de pile à combustible munirons-nous le VE.
- Quelle sera la contenance moyenne du réservoir d'hydrogène pour chaque gamme de véhicule.
- Quel sera son emplacement géométrique dans le véhicule par rapport aux passagers.
- Quel type d'adjuvants doit-on lui conférer pour lui donner une odeur distincte.
- Comment mettre sur pied un procédé de fabrication d'un réservoir sans soudures.
- Quelle technologie choisir pour les batteries.
- Comment définir des conditions strictes et suffisamment restrictives qui gouverneront les futurs procédés de recyclage.
- Quel est le sort des déchets industriels qui seront générés.

Les contraintes liées aux performances recherchées, seront certainement sujettes à améliorations continues. Elles seront fonction des objectifs atteints ou non et des précédentes contraintes suscitées, qui toucheront l'autonomie des véhicules, les coûts de production et de mise sur le marché, la hauteur des taxes qui seront imposées aux véhicules classiques et les fonds mis à contribution pour l'aide à l'achat de VE. Les batteries constituent la plus grande part du prix du véhicule, elles sont dans beaucoup de cas non incluses à l'achat du véhicule. Les propriétaires sont alors amenés à les louer post achat. Le coût de fonctionnement au Kilomètre se trouve considérablement réduit à long terme [5].

Les *BEV* ou véhicules électriques à batteries, sont donc des véhicules tout électriques possédant un rack de batteries constituant la source d'énergie principale. Ces batteries sont chargées régulièrement sur des points de charges dispatchés sur un territoire donné à la manière des stations-services. Leurs autonomies sont généralement limitées et ne dépassant que rarement les 350 km sur les routes de pleines [2]. Les contraintes liées à cette technologie sont bien entendu la quantité colossale d'énergie électrique qu'il faille mettre à disposition pour garantir l'alimentation d'un parc automobile qui ne cesse de croître.

Les *HEV* ou véhicules électriques hybrides, possèdent en plus d'un rack de batteries, une source d'alimentation primaire. Cette source est pour une grande partie de ce parc, un moteur à combustion à énergies fossiles, qui ne sert qu'à charger le rack de batteries installé à bord pour l'alimentation du moteur électrique de traction, une fois un niveau d'énergie minimal

prédéterminé est détecté, ou comme traction de substitution en cas de défaillance du système électrique, ou de besoin de couple de traction additionnel. Ce type d'hybridation offre une autonomie très élevée néanmoins en voie de déclassement à cause de son impact carbone qui reste encore très élevé [4].

Le deuxième type de véhicules hybrides sont des véhicules utilisant des piles à combustibles propres généralement de l'hydrogène qui sert de source d'alimentation primaire. Ce procédé est globalement très peu polluant. La production d'énergie ne produisant que de l'eau et à basse température, a un impact carbone nul, mais requiert un niveau de sécurité plus élevé à cause du réservoir d'hydrogène à bord [6]. Bien que beaucoup d'expérience soit acquise avec les véhicules GPL, l'hydrogène et le propane ont des propriétés physiques très différentes. Le stockage d'hydrogène dans un véhicule roulant et à grande échelle posera certainement des problèmes de sécurité routières accrues. Ce type de véhicule est en cours d'expérimentations à vitesse réduite et en milieu urbain. Les domaines de recherches futures de cette technologie impacteront sur la physique des matériaux utilisés et sur le coût de production à grande consommation. En d'autres termes, la généralisation de l'utilisation du véhicule électrique est avant tout un problème transdisciplinaire qui soulève des complexités éthiques, stratégiques et industrielles difficilement gérable [1].

La gestion de l'énergie dans les véhicules hybrides est sujette à et de nombreux travaux de recherche. En pratique, elle se formalise par un problème de commande optimale basée sur la consommation de carburant. Les deux approches principales, dites "hors ligne" sont la programmation dynamique (*DP*) et le Principe du Minimum de *Pontryagin* (*PMP*). Ces méthodes, bien qu'efficaces, présentent l'inconvénient d'être non causales : elles nécessitent une connaissance préalable et exhaustive de l'itinéraire, ce qui empêche leurs applications en conditions réelles. Le défi principal, est donc de concevoir des lois de commande causales et utilisables en ligne facilement applicables. Les véhicules électriques à pile à hydrogène rencontrent des défis similaires en matière de gestion de l'énergie. En effet, la pile à hydrogène ne peut pas à elle seule alimenter la chaîne de traction, car sa dynamique est trop lente pour répondre aux variations de puissance requises en temps réel. Pour pallier cette limitation, elle est couplée à un système de stockage tampon, généralement constitué de supercondensateurs. Ces derniers jouent un rôle crucial en absorbant les fluctuations rapides de la demande de puissance et en maintenant la pile à hydrogène dans une zone de fonctionnement optimale, garantissant ainsi un rendement élevé. De plus, ce système de stockage permet la récupération d'énergie lors du freinage, contribuant à améliorer l'efficacité globale du véhicule. [2-6]

Dans ce contexte, cette thèse se concentre sur une analyse approfondie d'une stratégie de gestion d'énergie en temps réel. L'objectif principal de cette stratégie est d'optimiser la consommation de l'hydrogène dans des conditions réelles de conduite, tout en répondant aux attentes du conducteur et en garantissant le bon fonctionnement du véhicule. L'étude est appliquée à un véhicule hybride intégrant une pile à combustible, des batteries, et des supercondensateurs pour assurer une gestion énergétique optimale. Un émulateur de pile à combustible a été conçu puis réalisé, intégrant ses propres convertisseurs de puissance pour simuler efficacement le fonctionnement de la pile dans le système hybride. La partie stockage d'énergie combine deux

racks de batteries et des supercondensateurs, permettant une réponse rapide aux variations de puissance et une gestion efficace de l'énergie dans diverses conditions de conduite.

Le travail que nous nous proposons d'entreprendre, consiste donc en la gestion d'énergie pour une alimentation hybride pile à combustible de type PEMFC - batteries - supercondensateurs appliquée aux véhicules électriques. Notre alimentation est constituée d'une pile à hydrogène comme source primaire, d'un rack de batteries associé à un deuxième rack de supercondensateurs. La pile à combustible est réalisée autour d'un émulateur constitué lui-même par une alimentation classique et d'un convertisseur dc/dc à travers lequel nous avons injecté le modèle mathématique de la PEMFC.

Cette pile débite sur un rack de batteries à travers un convertisseur lui assurant la recharge à des moments opportuns en fonction de leurs niveaux d'énergie. Un troisième convertisseur est dédié à la gestion du niveau d'énergie stockée dans le rack de supercondensateurs. Le bus d'alimentation est maintenu autour d'un niveau de tension de 88 volts qui servira de tension d'alimentation pour la traction. Les systèmes ainsi réalisés sont tous contrôlés indépendamment les uns des autres. La pile à combustible, l'ESS ainsi que les différents convertisseurs chargés de fournir les différentes tensions sont contrôlés par l'interface « Control Desk » via la dSPACE 1103 sous MATLAB Simulink.

Le travail qui est exposé sera subdivisé en quatre parties.

Le premier chapitre comportera un état de l'art de véhicule électrique qui sera complété par un état de l'art de pile à combustible, un état de l'art batterie et en fin un état de l'art supercondensateurs. Au deuxième chapitre nous aborderons la modélisation de la source hybride. Cette source est constituée d'une pile à combustible, d'un rack de batteries et d'un rack de supercondensateur. Nous allons entamer en premier lieu, le modèle de la pile à combustible, les équations qui la régissent et synthétiser sur les relations générales de fonctionnement. Nous allons ensuite exposer le principe de fonctionnement ainsi que les équations régissant les systèmes de stockage

Batteries/Supercondensateurs chacun séparément. En dernier lieu nous allons mettre l'accent sur la modélisation des convertisseurs de l'électronique de puissance qui seront utilisés afin de mener la gestion d'énergie recherchée.

Dans le troisième chapitre, nous allons présenter les différentes stratégies de gestion d'énergie les plus présentes et exposées dans la littérature. En mettant l'accent sur les avantages et les inconvénients de chaque stratégie. Nous allons enfin exposer une gestion d'énergie adaptée à la source hybride que nous allons utiliser.

Dans le quatrième et dernier chapitre, nous présenterons la stratégie de gestion adoptée. Les résultats de simulations des différents étages seront exposés, et commentés. Nous passerons en revue toutes les étapes de conception, d'études et de réalisation de notre émulateur. Les résultats obtenus seront comparés et discutés. La conception du modèle utilisé sera présentée ; la réalisation du convertisseur qui lui est dédié sera également exposée. Nous allons présenter les contraintes et

conditions du bus d'alimentation, ainsi que les critères choisis pour la réalisation de ce convertisseur. Le modèle MATLAB Simulink sera exposé et discuté. Les résultats expérimentaux seront présentés et commentés. Nous présenterons également l'étude et les étapes de conception d'un convertisseur bidirectionnel en courant. Ce module aura la tâche d'assurer la récupération intuitive d'énergie pour la stocker dans les supercondensateurs en usant de l'étage Buck. Les contraintes imposées au Bus d'alimentation feront intervenir l'étage Boost du convertisseur aux moments opportuns.

Cette thèse se termine par une conclusion générale.

Chapitre I

État de l'art

I.1. État de l'art véhicules électriques

I.1.1. Histoire de la voiture électrique : impressionnante évolution

Alors qu'on présente la voiture électrique comme le moyen de transport du futur, le tout premier véhicule électrique a vu déjà le jour en 1830. Dès cette année, le premier prototype de véhicule électrique connu, est conçu par *Robert Anderson* à partir d'une calèche. En 1834, l'Américain *Thomas Davenport* conçoit le tout premier modèle de locomotive électrique. C'est en 1852 qu'un premier modèle de voiture électrique est commercialisé. Mais à cette époque, les voitures n'étaient pas munies de systèmes rechargeables, puisque la recharge n'existait pas encore.

1859, marque l'invention de la batterie rechargeable au plomb acide par le Français *Gaston Planté*. Elle sera plus-tard améliorée par les travaux de *Camille Faure* en 1881 et le britannique *Thomas Parker* en 1882 (Figure I.1). Grâce à ces hommes, les voitures électriques auraient dû prendre depuis, leurs réels essors, car elles devinrent viables puisque rechargeables [7].



Figure.I.1. Photographie de 1884 qui présenterait la voiture électrique

Au même moment, un autre premier modèle viable de voiture électrique est mis au point par trois Français dont *Camille Faure*, électro chimiste qui travaille à l'amélioration des batteries au plomb, *Charles Jeantaud*, constructeur automobile et *Nicolas Raffard*, ingénieur en mécanique. En 1881, le Français *Gustave Trouvé* présente plusieurs prototypes de véhicules électriques à l'Exposition internationale d'électricité de Paris. Une concurrence s'installe entre la voiture à moteur à explosion et la voiture électrique.

L'année 1899 est marquée par les progrès et le potentiel de la voiture électrique alors que la voiture de *Camille Jenatzy* appelée La « *Jamais Contente* » donnée en *Figure I.2*, bat un record de vitesse en dépassant les 100 km/h. En 1900, les taxis électriques circulent dans les rues de New York. 38% du marché américain de l'automobile était électrique. On disait ironiquement, que les voitures électriques sont faciles à démarrer et qu'elles ne laissent pas un nuage irrespirable de fumée noire derrière elles [7] [8].



Figure I.2. Photographie de 1899 qui présente « La jamais contente » au podium pour avoir dépassé le cap de 100 Km/h.

- **Abandon de la voiture électrique dans les années 1900**

En 1908, *Ford* lance son modèle *T* représenté en *Figure I.3*. Devenu le symbole de l'essence bon marché, de l'accessibilité grand public et de la puissance du moteur thermique. C'est un point de rupture dans l'histoire du véhicule grand public. À partir des années 1910, les besoins militaires étaient énormes et pressants l'effort de guerre ayant contribué considérablement en faveur du moteur thermique plus puissant moins onéreux et dont la technologie est fin prête, l'histoire de la voiture électrique et ses progrès céderont au profit des innovations de *Ford*. 1920, c'était le début de l'ère de la voiture thermique accessible à tous alors que l'essence était bon marché. La voiture électrique tombe dans l'oubli pour les 40 prochaines années [9].

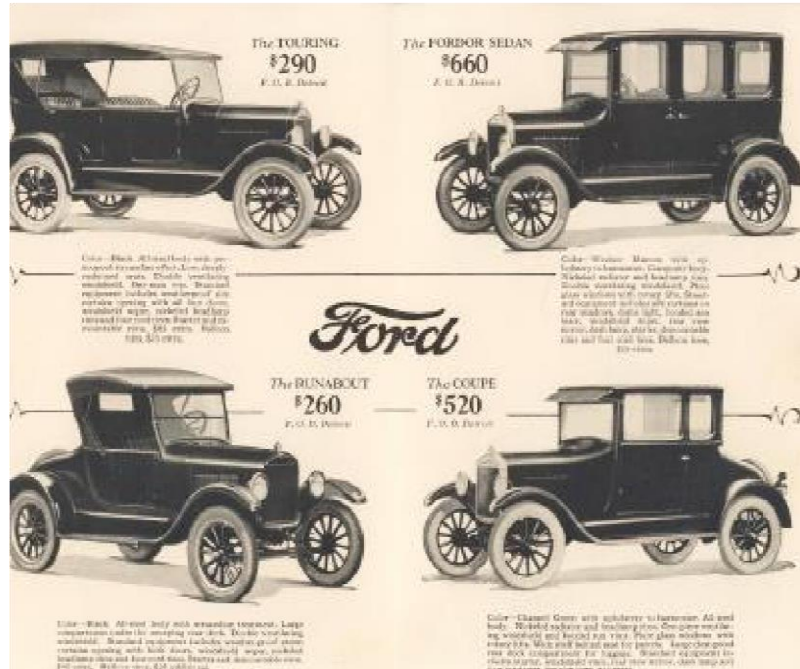


Figure I.3. Brochure Ford du Modèle T. (National Automotive History Collection)

- **1966 : retour vers le potentiel de l'électrique**

La pollution est de plus en plus présente, les impacts environnementaux commencent à se faire sentir et les fluctuations du prix du pétrole menaçant l'aggravation de la crise, la réduction de la pollution de l'air entre dans les préoccupations majeures du Congrès américain qui recommande dès 1966 la construction de voitures économiques et écologiques orientant l'intérêt vers les voitures électriques. En 1973, avec le premier choc pétrolier et l'embargo de l'OPEP envers les États-Unis, la voiture électrique devient un sujet d'actualité. Partout à travers le monde, plusieurs initiatives sont lancées et des prototypes sont développés. *Renault* produit une version électrique de la R5, mais elle ne sera jamais commercialisée [7-9].

- **1990 : un point tournant pour la voiture électrique**

En 1990, la Californie vote pour le « *Zero Emission Vehicle (ZEV)* ». La loi prévoit et fixe une date butoir de 1998 où chaque constructeur devra compter 2% de véhicules écologiques dans ses ventes pour être autorisé à commercialiser ses autres voitures. *General Motors*, lance l'*EV1* et un peu plus de 1000 unités seront produites. Toutefois à cause de leurs faibles autonomies, la plupart des projets ne verront pas le jour, mais au moins une réflexion s'amorce, c'est le début des modèles hybrides. En 1997, *Toyota* lance la *Prius* au Japon. Une première voiture hybride dont 18000 exemplaires seront vendus la première année. De nombreux constructeurs sortiront à leur tour des modèles hybrides : le *Ford Ranger pickup EV*, la *Honda EV plus*, la *Chevy S-10 EV*, le *Toyota RAV4 EV* et la *Nissan Altra EV*. La clientèle n'étant pas au rendez-vous, la plupart des projets seront abandonnés. En 2003, la

Californie retire sa loi du *Zero Emission Vehicle* sous la pression des grands constructeurs automobiles [10].

Du 30/11/2015 au 11/12/2015, *Paris* a accueilli la conférence des nations unies sur les changements climatiques. La *COP21 (The conference of the parties)* qui désigne les parties signataires de la convention cadre des nations unies sur les changements climatiques (*CCNUCC*) signée en 1992 au sommet de la terre à *RIO* au *Brésil*, ou le dérèglement climatique a été reconnu officiellement. Ce comité se réunit périodiquement pour assier des décisions capitales et stratégiques globales se basant sur des études et compréhensions rigoureuses des enjeux climatiques présents et à venir [10]. L'objectif de cette conférence est de trouver les moyens nécessaires, universels et suffisamment contraignants qui auront pour objectif de remplacer graduellement le protocole de *Kyoto* adopté en 1997 qui fixait des objectifs chiffrés pour la réduction des émissions des gaz à effets de serre (*GES*) aux pays développés. Les principaux gaz visés sont le Méthane et le CO_2 . Cela permettra de maintenir le réchauffement climatique à l'ores 2100 au-dessous des $2^\circ C$ par rapport à l'ère préindustrielle de 1850, en mettant à contribution des fonds publics et privés des pays développés afin de rassembler chaque année 100 Md\$. La chine, premier pollueur et émetteur de CO_2 , a promis une réduction de 60 à 65% ; les USA, deuxième pollueur a quant à lui promis une réduction de 28% d'ici 2025 ; en troisième position l'UE a promis d'atteindre une réduction de 40% d'ici 2030 [7].

I.1.2. Différentes configurations des véhicules électriques

I.1.2.1. Configuration EV

Comparé à un véhicule à moteur à combustion, la configuration d'un véhicule électrique est plutôt flexible. Cette flexibilité est due à plusieurs facteurs liés à la nature elle-même du véhicule. Le flux d'énergie se fait principalement via des câbles électriques et non par liaisons mécaniques. Ainsi le concept de sous-système distribué est facilement réalisable. La propulsion représente des configurations très différentes, les systèmes étant différents. Les sources d'énergie différentes, leurs caractéristiques sont différentes et les modes de ravitaillement sont différents [11].

La *Figure I.4* montre la composition d'un véhicule électrique ou une double ligne représente une liaison mécanique, une ligne épaisse une liaison électrique et une ligne fine, un lien de contrôle. Cette composition est principalement constituée de trois sous-systèmes [12].

- a) **Une propulsion** : constituée d'un moteur de traction, d'un contrôleur électronique, d'un convertisseur de puissance, d'une transmission mécanique, et des roues motrices.
- b) **Une source d'énergie** : cela implique la source d'énergie principale, l'unité de gestion d'énergie et l'unité de ravitaillement en énergie.

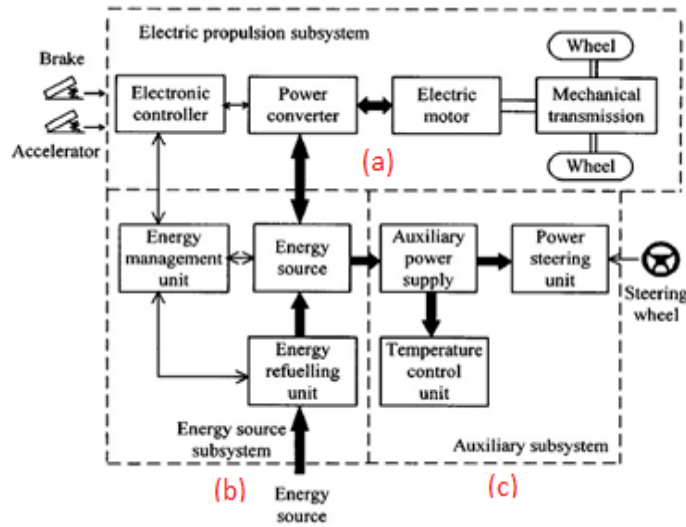


Figure I.4. Constitution d'un véhicule électrique.

- c) **Système auxiliaire** : comprend tous les équipements de sécurité, d'aide à la conduite, de confort et de commande et éventuellement d'une source d'alimentation auxiliaire [12].

On notera que cette configuration de véhicules électrique est très variable, elle dépend surtout du nombre de sources et de leurs natures. Elle dépend également du type de la propulsion électrique que l'on peut classer en six (06) catégories différentes comme illustré en Figure I.5.

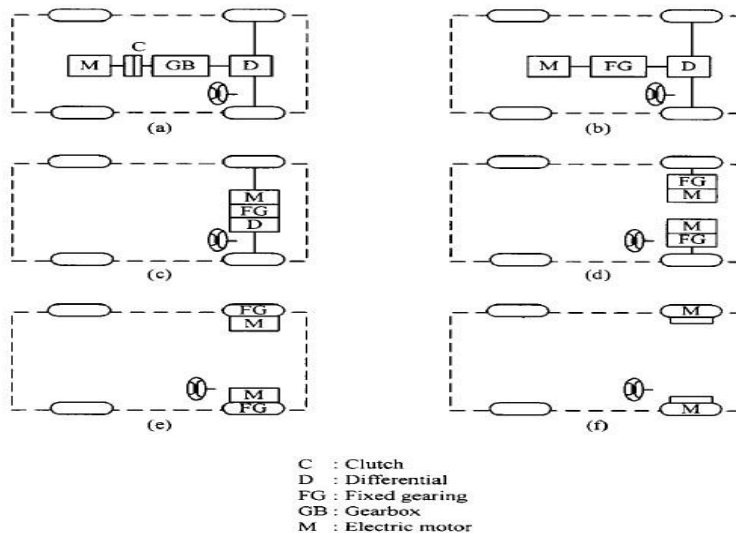


Figure I.5. Différentes configurations de propulsions

La *Figure I.5(a)* montre la première alternative qui est l'extension directe d'un véhicule à moteur à combustion, ce dernier est simplement remplacé par une propulsion électrique suivi par un embrayage, d'une boîte à vitesse et d'un différentiel. Les *Figures I.5(b)* et *I.5(c)* illustrent deux configurations différentes où la boîte à vitesse est remplacée par un moteur à rapport fixe. Appelé « *single speed EV* ». Cette configuration élimine la nécessité d'un embrayage et d'une boîte de vitesse. Elle est utilisée dans les petites voitures et les véhicules utilitaires à traction intégrale (*EV-AWD*). Cette configuration permet une meilleure répartition du couple entre les roues. La *Figure I.5(d)* montre le cas où les moteurs sont intégrés aux roues (*in-wheel motors*) avec un rapport fixe. chaque roue est équipée de son propre moteur éliminant le besoin d'une transmission mécanique traditionnelle. Cette configuration offre encore un meilleur control de couple que dans la configuration (*b*) et (*c*). Pour la cinquième alternative montrée en *Figure I.5(e)*, illustre le cas d'un moteur intégré à l'essieu arrière qui peut être accompagné ou non d'une transmission mécanique à l'essieu avant. Cette configuration est utilisée dans les véhicule électriques hybrides où le moteur électrique est couplé à un moteur à combustion interne couplé à l'essieu avant. La *Figure I.5(f)*, le moteur est fixé aux roues sans boîte à transmission à rapport fixe. Cette alternative offre un meilleur équilibre des masses et du centre de gravité améliorant ainsi la maniabilité du véhicule [13] [14].

I.1.2.2. Configuration HEV

Cette configuration est principalement basée sur les configurations suscitées. Avec l'ajout d'un moteur à combustion interne et classifiée en sous catégories suivantes [13-15].

a) HEV série

Dans cette configuration le moteur à combustion interne fonctionne à régime constant, optimisé pour une efficacité maximale et est utilisé pour recharger les batteries. Tandis que le moteur électrique sert à la traction. Un système de récupération d'énergie est disponible lors de freinage régénératif.

b) HEV parallèle

Cette configuration offre la possibilité de coupler les deux moteurs directement et en parallèle sur les roues motrices. Les deux moteurs peuvent fonctionner ensemble pour fournir une puissance supplémentaire lors de l'accélération ou fonctionner séparément en fonction des besoins de la conduite. Cette configuration permet de fournir une plus grande puissance et une accélération plus efficace que la configuration en série.

c) HEV à variation continue (HEV-CVT)

Dans cette configuration, un système de transmission à variation continue (*CVT*) est utilisé pour combiner la puissance du moteur à combustion et du moteur électrique de manière optimum. La *Figure I.6* montre les diagrammes fonctionnels correspondants qui permettent de coupler à la fois le moteur à combustion interne et le moteur électrique soit en mode série ou parallèle. Ceci a pour effet d'optimiser les deux configurations précitées. Cela permet d'offrir des modes de fonctionnement supplémentaires et polyvalents [14].

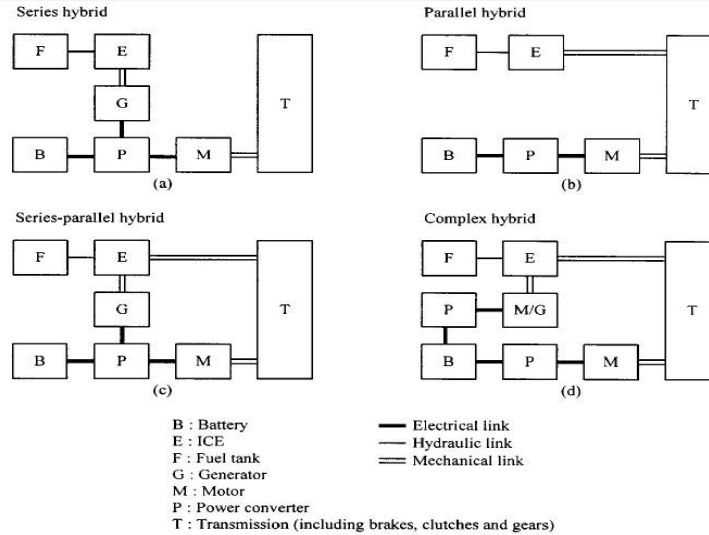


Figure I.6. Système de transmission à variation continue (CVT)

I.1.3. Taux d'hybridation des véhicules

Le terme "hybridation" est apparu avec les nombreux systèmes pouvant cohabiter dans un même véhicule. Ce taux d'hybridation est mesuré grâce à un facteur qui prend en considération l'existence ou non d'un moteur à explosion et le reste du système de traction incluant une pile à hydrogène, d'un rack de batteries et de supercondensateurs ou d'un panneau photovoltaïque. Pour un véhicule de type batteries et moteur à combustion classique, le facteur d'hybridation peut être mesuré comme suit [16], [17] :

$$H = \frac{P_{Bat}}{P_{comb} + P_{Bat}} \quad (I.1)$$

P_{Bat} et P_{comb} sont respectivement les puissances développées par les batteries et le moteur à explosion.

Pour l'année 2006 et pour les 15 pays constituant l'UE, l'organisation pour la coopération et le développement économique (OCDE) a publié un rapport alarmant et suffisamment inquiétant, révélant que le recours à la voiture particulière est systématique et que 10% de la population active représente 14 millions de personnes travaillant dans le secteur des transports. Générant un chiffre d'affaires de 290 Milliard d'Euros amenant l'indice (Passagers. Km) à augmenter de 24% entre 1998 et 2010. L'indice (Tonne. Km) quant à lui, a enregistré une hausse de 38% dans la même période. Et le transport routier a progressé de 50% [18].

Depuis 2000, les efforts consentis pour la mise en circulation des véhicules propres ont été anéantis par l'augmentation fulgurante du parc automobile ce qui a entraîné une surconsommation de carburants fossiles et une augmentation conséquente des émissions des GES. La Figure I.7 montre l'intensité du trafic routier/unité de PIB (Produit Intérieure Brut) en 2014 pour différents pays de l'OCDE. À cet effet l'union européenne entend créer « l'Union de l'Énergie », un marché européen de l'énergie plus intégré et plus compétitif, pour

assurer un approvisionnement énergétique fiable à des prix abordables. Elle encourage également la production d'énergie à partir de sources renouvelables et une utilisation efficace de cette énergie afin de réduire les émissions de *GES*. Ce projet a pour but également de réduire la dépendance énergétique à l'égard des importations en diversifiant et en utilisant plus efficacement ces ressources domestiques [19] [20].

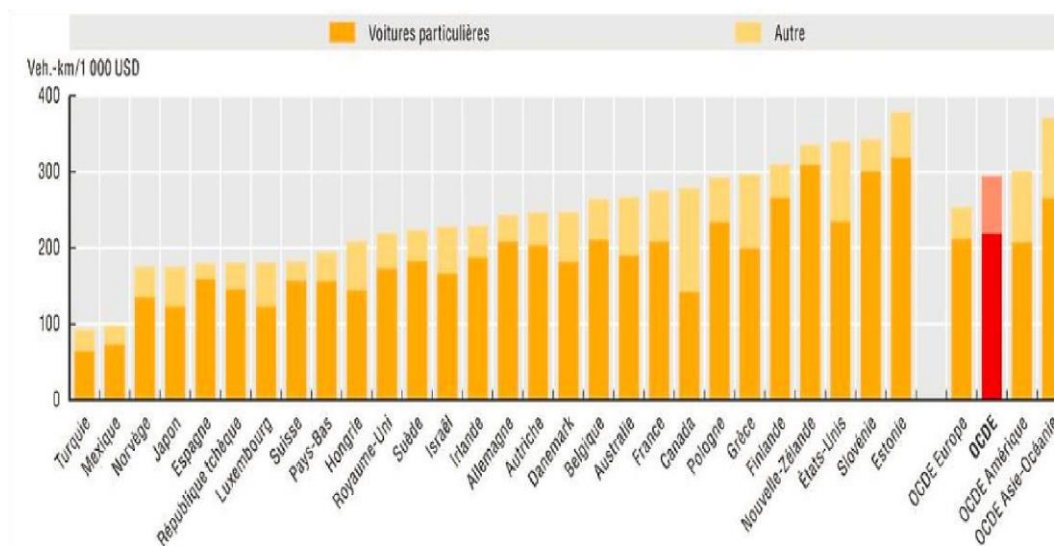


Figure I.7. Trafic routier/unité de PIB en 2014 pour différents pays de l'OCDE.

I.1.4. Infrastructure pour les véhicules électriques

Pour soutenir la commercialisation des véhicules électriques (*VE*), les infrastructures nécessaires constituent une base sous-jacente, cela inclut les installations de base et les services nécessaires pour soutenir le fonctionnement d'un grand nombre de *VE*. L'infrastructure pour les *VHE* (*véhicules hybrides électriques*) est beaucoup plus simple car la taille de la batterie est généralement plus petite et elle peut également utiliser l'infrastructure existante pour l'essence. L'infrastructure des véhicules à *PAC* (*Pile à Combustible*) sera assez différente en fonction du carburant utilisé. Afin de développer une infrastructure réussie pour les *VE* de manière globale, nous devons prêter attention aux aspects suivants [20] :

- Disponibilité des stations de recharge électrique et en hydrogène.
- Facilité de paiement pour la recharge.
- Normalisation des batteries et de la recharge des *VE*.
- Réglementation d'une recharge propre et sûre.
- Soutien par la formation et la promotion.
- Impacts sur les services publics d'électricité.

La conception des systèmes de recharge des *VE* dépend principalement du niveau de courant de recharge nécessaire pour recharger les batteries des *VE*. Il existe trois niveaux de courant principaux [20] [21].

a) Courant de recharge normal

Les batteries des *VE* peuvent être rechargées avec un courant de recharge plutôt faible, d'environ 15 A, et la période de recharge peut durer plus de six heures. Les coûts d'exploitation et d'installation du chargeur correspondant sont relativement faibles car les niveaux de puissance et de courant impliqués ne sont pas critiques. Ce courant de recharge est généralement avantageux pour augmenter l'efficacité de la recharge et prolonger la durée de vie de la batterie.

b) Courant de recharge moyen

Les batteries des *VE* peuvent être rechargées avec un courant moyen de 30 à 60 A et la période de recharge peut durer quelques heures. Les coûts d'exploitation et d'installation du chargeur correspondant sont relativement plus élevés que ceux du courant de recharge normal en raison de la nécessité de mettre à niveau l'équipement de recharge.

c) Courant de recharge rapide

Les batteries des *VE* peuvent être rechargées en peu de temps en utilisant un courant de recharge élevé de 150 à 400 A. Contrairement à l'utilisation d'un courant de recharge normal ou moyen, le chargeur correspondant offre une meilleure efficacité de recharge. Les coûts d'exploitation et d'installation correspondants sont donc élevés.

Les courants de recharge normaux sont adoptés à la fois dans les infrastructures de recharge domestiques et publiques, tandis que les courants de recharge moyen et rapide ne se trouvent que dans les infrastructures de recharge publiques. De plus, le courant de recharge rapide ne devrait être utilisé que dans les stations de services de recharge publiques dédiées, car la demande de courant correspondante peut avoir un effet néfaste sur le réseau électrique et peut également avoir un impact important sur la durée de vie de la batterie [16].

I.1.5. Normalisation des batteries et de la recharge

La normalisation des batteries et de la recharge des *VE* est essentielle pour faciliter leur adoption à grande échelle. Des normes doivent permettre d'assurer l'interopérabilité entre les différents fabricants de *VE* et les infrastructures de recharge, ce qui facilite les opérations de recharge et garantit la sécurité des utilisateurs.

Plusieurs normes ont été développées pour les batteries des *VE*, telles que les normes *IEC 62660* et *ISO 12405*. Ces normes définissent les exigences relatives aux performances, à la sécurité et à la durabilité des batteries des *VE*, ainsi que les méthodes d'essai correspondantes.

En ce qui concerne la recharge, des normes telles que le standard de recharge combinée (*CCS*) et le système de charge rapide ont été développées pour assurer la compatibilité entre les *VE* et les infrastructures de recharge. Ces normes définissent les spécifications des connecteurs, les protocoles de communication et les méthodes de sécurité pour la recharge des *VE* [16] [19] [20].

I.2. État de l'art pile à combustible (PAC)

I.2.1. Principe de fonctionnement

La première pile à combustible à avoir vu le jour, est la pile à hydrogène. Mise au point pour la première fois par *William Grove* en 1839, son principe de fonctionnement est relativement simple. La *Figure I.8*, montre le principe de l'électrolyse de l'eau. Grâce au passage d'un courant électrique dans un électrolyte généralement de l'acide caustique, cette réaction dissocie les atomes d'hydrogène de l'oxygène formant l'eau pour produire les gaz d'hydrogène à la l'anode et de l'oxygène à la cathode. Comme le montre la *Figure I.8. (b)*, *Grove* a remplacé le générateur de courant par un galvanomètre, il est apparu alors le passage d'un courant électrique ayant un sens inverse. Cela ne peut être expliqué que par la recombinaison des deux gaz pour reformer de l'eau. Cette réaction d'oxydoréduction, oxyde l'hydrogène et réduit l'oxygène. Cependant, la tension et le courant produits sont inexploitable. Cela s'explique par [22] :

- Les surfaces de contacts des électrodes en platines, sont très petites.
- La grande distance séparant ces électrodes.

Pour augmenter donc l'énergie produite, on construit des unités appelées *MEA* (*Membrane Electrodes Assembly*) ou, les électrodes sont de formes plates et le plus proche possible l'une de l'autre comme indiqué en *Figure I.9*. En évoluant et en optimisant chaque unité, la technologie a également permis d'associer ces unités pour en former des plus grandes multipliant à la fois le courant et la tension. Donnant ainsi naissance à l'apparition puis la compréhension de nouveaux phénomènes électrochimiques régissant la PAC à hydrogène en particulier [18].

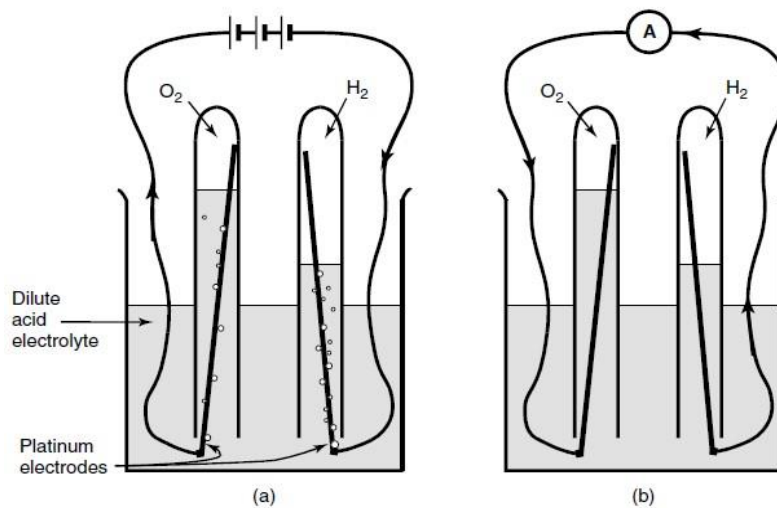


Figure I.8 : (a)Électrolyse de l'eau. (b) Électrolyse inverse.

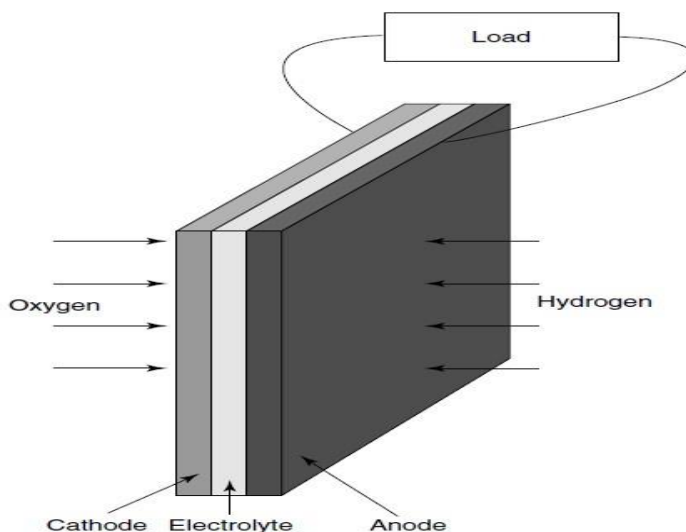


Figure I.9. Structure d'un élément de PAC (MEA)

I.2.2. Les différents types de la PAC

Pour répondre à la disponibilité d'énergie dans une PAC, la technologie s'est diversifiée pour au moins deux raisons :

- En réponse à la réaction lente de la PAC, le temps de réponse d'une PAC étant très lent à cause des phénomènes chimiques à l'origine de la création du courant électrique.
- L'hydrogène étant un combustible artificiel, qu'il faut donc produire.

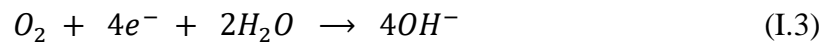
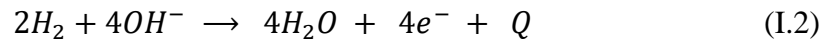
Les autres types de PAC qui ont vu le jour se différencient par la nature de l'électrolyte utilisé, par le carburant exploité et les produits et résidus éjectés. Le *Tableau 1* résume les six types de PAC qui ont émergé du lot [18].

Tableau I.1. Différents types de PAC

Fuel cell type	Mobile ion	Operating temperature	Applications and notes
Alkaline (AFC)	OH^-	50–200°C	Used in space vehicles, e.g. Apollo, Shuttle.
Proton exchange membrane (PEMFC)	H^+	30–100°C	Vehicles and mobile applications, and for lower power CHP systems
Direct methanol (DMFC)	H^+	20–90°C	Suitable for portable electronic systems of low power, running for long times
Phosphoric acid (PAFC)	H^+	~220°C	Large numbers of 200-kW CHP systems in use.
Molten carbonate (MCFC)	CO_3^{2-}	~650°C	Suitable for medium- to large-scale CHP systems, up to MW capacity
Solid oxide (SOFC)	O^{2-}	500–1000°C	Suitable for all sizes of CHP systems, 2 kW to multi-MW.

I.2.2.1. Alkaline fuel cell (AFC)

Mise au point dès 1902, elle n'a été fiabilisée que vers les années 1950. Ce type de PAC a été utilisé dans le programme Apollo et d'une manière générale dans tous les vols spatiaux américains. C'est ce composant qui a permis à l'homme de poser les pieds sur la lune. La température de fonctionnement d'une pile AFC avoisine les 200°C. Elle possède des électrodes en titan baignant dans une solution électrolytique peu couteuse, très soluble dans l'eau et très peu corrosive généralement de l'hydroxyde de Sodium ou l'hydroxyde de Potassium. Les ions d'hydroxyle OH^- présents à l'anode, réagissent avec l'hydrogène produisant un courant électrique et de l'eau et relâchant de la chaleur [23] [24].



À la cathode, l'oxygène réagit avec l'eau présente dans la solution et les électrons récoltés sur l'électrode pour produire les ions OH^- traversant la barrière électrolytique de nature perméable à ces ions. *Figure I.10.*

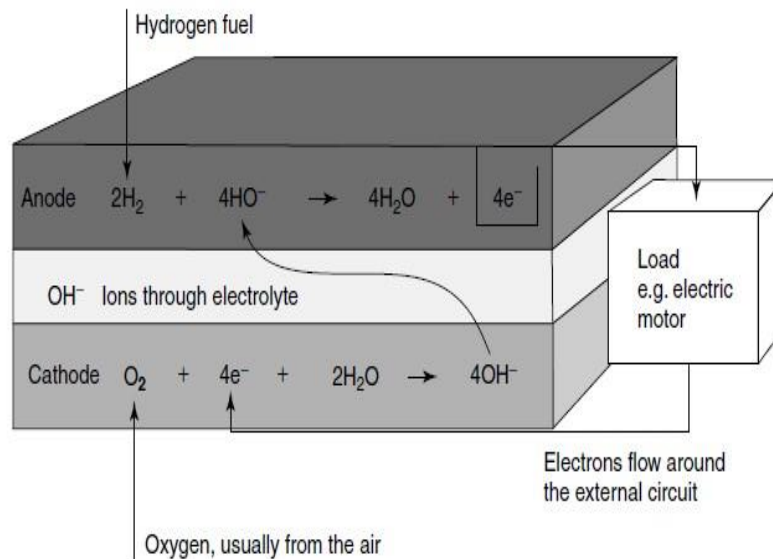


Figure I.10. Réaction oxydo-réduction dans une unité AFC

Pour les autres paramètres des AFCs, les modèles sont très différents. Le programme Apollo a utilisé une pile fonctionnant à 290°C montrée en *Figure I.11*, alors que son Orbiter a utilisé un modèle à 90°C [25].

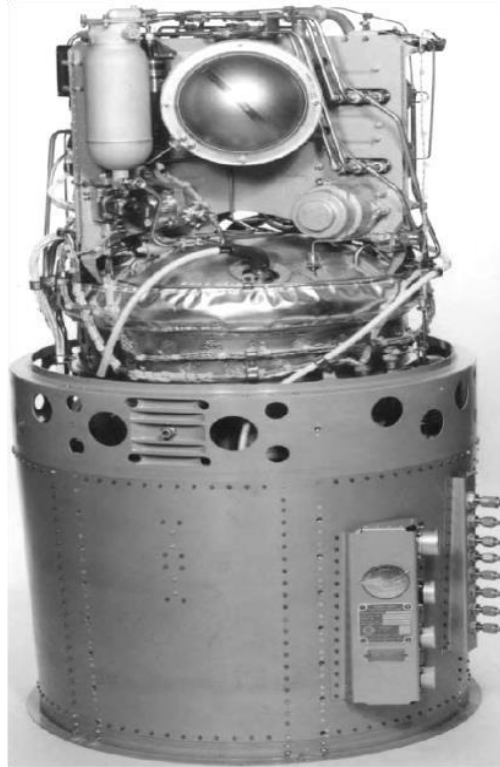
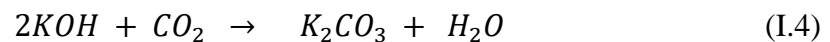


Figure I.11. PAC de type AFC utilisée dans le programme Apollo.

Hormis le fait d'utiliser un électrolyte très peu coûteux et des électrodes sans spécificités chimiques particulières, le principal avantage des piles Alcalines, est leurs Tension d'Activation Cathodique nettement inférieure à celle des piles à électrolyte d'acide. Cette grandeur représente la chute de tension majeure à basse température. Ce paramètre n'est pas très couvert dans la littérature scientifique, mais il a été longuement observé que la réduction de l'oxygène se fait plus rapidement dans les milieux alcalins ce qui permet aux pile AFCs de s'activer à partir de 0,875 V par élément de pile. Elles peuvent être de trois différents types [17] :

I.2.2.2.1. Pile à électrolyte mobile

La Figure I.12 montre le schéma structurel d'une PAC Alcaline à électrolyte mobile, dont la synthèse chimique est donnée par la relation suivante :



Ce type d'électrolyte a été utilisé par *Bacon* dans sa célèbre pile alcaline des années 1950, et dans les missions *Apollo* et dans la plupart des systèmes terrestres stationnaires.

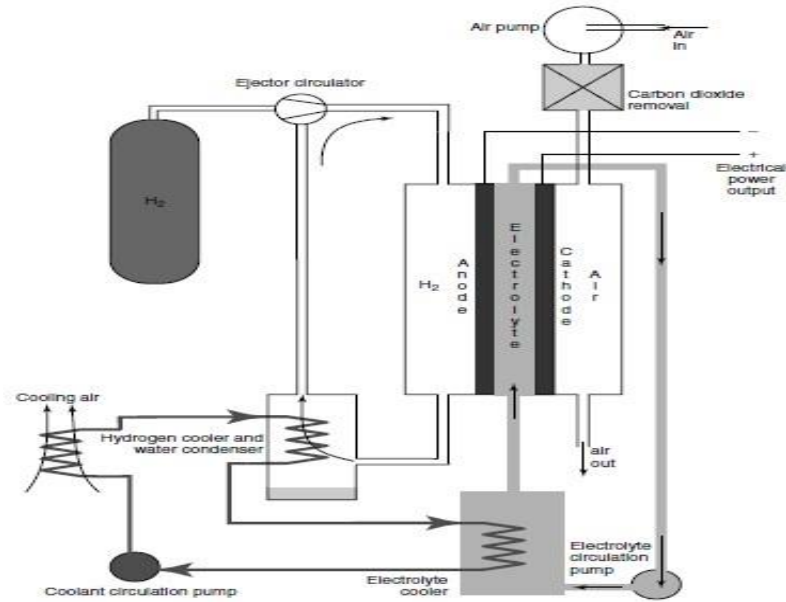


Figure I.12. Diagramme d'une pile Alcaline à Electrolyte mobile.

I.2.2.2.2. Static electrolyte alkaline fuel cell (SAFC)

Pour ce type de PAC illustrée en *Figure I.13*, chaque unité de pile possède son propre électrolyte séparé et contenu dans une matrice inter-électrodes habituellement de l'Amiante, qui présente d'excellentes porosité et robustesse et un pouvoir anticorrosion de haute qualité. Mais pose malheureusement un problème de sécurité et de santé publique non négligeables.

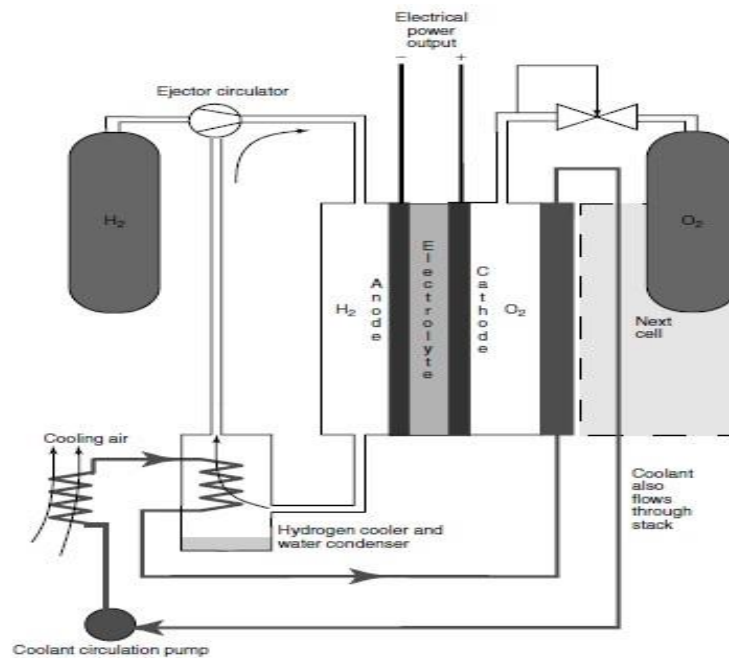


Figure I.13. Schéma structurel d'une SAFC avec dépollueur CO₂.

I.2.2.2.3. PAC à combustible dissout

Ce type de pile illustré en *Figure I.14*, est présenté comme le système de pile alcaline le plus simple. Une solution H_2NNH_2 (Hydrazine) est utilisée à la fois comme électrolyte et combustible, dans lequel les deux électrodes baignent. La pile est alimentée simplement en ajoutant du carburant dans l'électrolyte. Malheureusement, cette technologie est toxique, cancérigène et explosive et ne peut être manipulée que dans un cas de sécurité extrême à des fins purement pédagogiques ou de démonstrations.

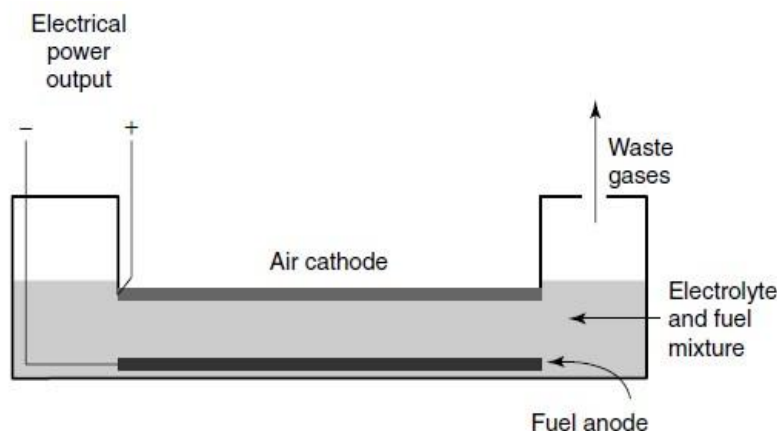


Figure I.14. Exemple type d'une PAC à combustible dissout.

I.2.2.2. Direct méthanol fuel cell

Malgré sa haute densité énergétique, l'hydrogène pose toujours une problématique lors de son stockage.

Tableau I. 2. Densité énergétique du méthanol en comparaison avec l'Hydrogène.

Storage method	Energy density of fuel	Storage efficiency (%)	Net energy density
H ₂ at 300 bar pressure in composite cylinders	119.9 MJ kg ⁻¹ 33.3 kWh kg ⁻¹	0.6	0.72 MJ kg ⁻¹ 0.20 kWh kg ⁻¹
H ₂ in metal hydride cylinders	119.9 MJ kg ⁻¹ 33.3 kWh kg ⁻¹	0.65	0.78 MJ kg ⁻¹ 0.22 kWh kg ⁻¹
H ₂ from methanol – indirect methanol	119.9 MJ kg ⁻¹ 33.3 kWh kg ⁻¹	6.9	8.27 MJ kg ⁻¹ 2.3 kWh kg ⁻¹
Methanol in strong plastic tanks for direct use as fuel	19.9 MJ kg ⁻¹ 5.54 kWh kg ⁻¹	95	18.9 MJ kg ⁻¹ 5.26 kWh kg ⁻¹

Sachant que le méthanol CH_3OH , est le meilleur conteneur d'hydrogène, il est cependant utilisé comme source d'énergie dans les *PACs DMFC*, écartant ainsi les risques liés au stockage de l'hydrogène. Le méthanol étant chimiquement plus stable et plus facile à contenir avec une densité énergétique comparable à celle du gasoil. Le *Tableau I.2* montre la densité énergétique du méthanol en comparaison avec l'Hydrogène sous ses différentes formes de stockage [26].

Cela dit, les *DMFCs* présentent deux inconvénients majeurs. Le premier est que la réaction chimique à l'anode est plus lente qu'avec l'hydrogène. Car l'oxydation du méthanol est plus complexe. Le second inconvénient est dû au fait que les *DMFCs* utilisent des membranes échangeuses de protons (*PEM*) qui ont la particularité d'absorber le méthanol, puis de le mélanger avec l'eau présente dans le milieu cathodique ; ce qui réduit non seulement la tension à vide mais aussi la tension en charge. Ces deux phénomènes conduisent à des performances réduites par rapport aux autres types de *PACs*, montré en *Figure I.15* [17] [27].

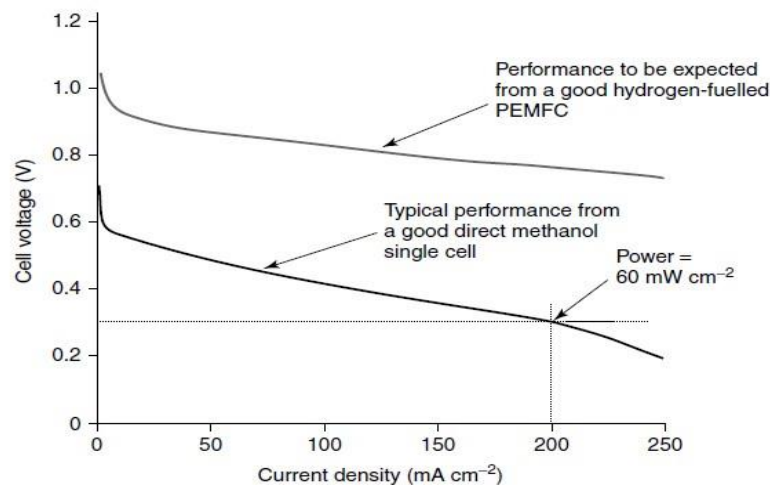


Figure I.15. Densité Tension/Courant à température ambiante d'une DMFC

I.2.2.3. Les pafc (phosphoric acide électrolyte fuel cell)

C'est le type le plus développé. Les modèles de 200KW, sont très répandus sur les bases militaires, hôpitaux, prisons, centres de loisirs ou sur des sites industriels et autres centres d'affaires [28]. Son principe de fonctionnement est bien maîtrisé. Fonctionnant en moyenne sous 200°C, son catalyseur requiert un métal noble. Les circuits de gaz doivent aussi être hermétiques et bien étanches pour éviter leurs pollutions par le CO_2 ou le CO .

Les performances tension-courant d'une *PAFC*, sont illustrées par la *Figure I.16*. La densité de courant usuelle d'une *PAFC* est située entre 150 et 400 mA/cm² sous une pression atmosphérique de 1 At. Elle délivre alors une tension entre 600 et 800 mV, typiquement plus élevée avec de l'air qu'avec de l'oxygène pur. Les pertes ohmiques sont autour de 12 mV par 100mA/cm² [17].

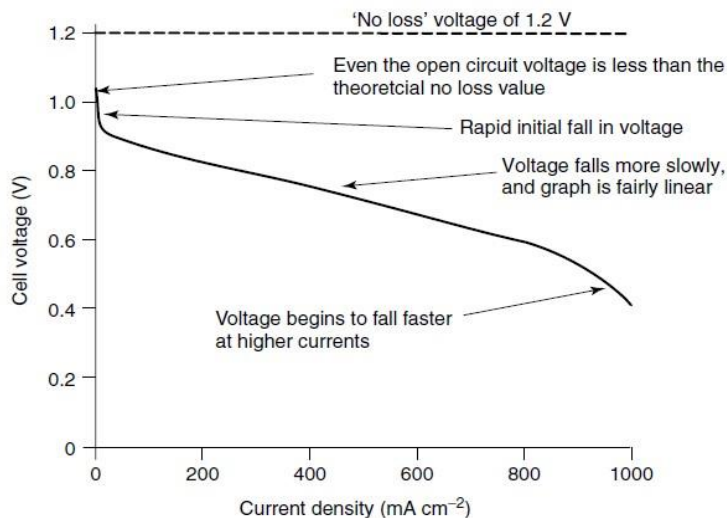


Figure I.16. Graphe Tension/Courant d'une PAC à Basses Température et Pression.

I.2.2.4. Les mcfc (molten carbonate électrolyte fuel cell)

Créées dans les années 1920s par *BAUR & Associés*, en Suisse. Sa température de fonctionnement est aux alentours de 650°C. Même avec un taux de CHP (*Combined Heat and Power*) très intéressant, cette technologie souffre principalement de la dégradation de ces composants [17] [18].

La matrice poreuse est habituellement fabriquée par pression à haute température. L'évolution de cette technologie est résumée dans le *Tableau I.3*.

Tableau I.3. Évolution de la technologie des composants de la MCFC

Component	Ca. 1965	Ca. 1975	Current status
Anode	Pt, Pd, or Ni	Ni – 10 wt% Cr	Ni–Cr/Ni–Al 3–6 μm pore size 45–70% initial porosity 0.20–1.5-mm thickness 0.1–1 m ² /g
Cathode	Ag ₂ O or lithiated NiO	Lithiated NiO	Lithiated NiO 7–15 μm pore size 70–80% initial porosity 60–65% after lithiation and oxidation 0.5–1-mm thickness 0.5 m ² /g
Electrolyte Support	MgO 10–20 m ² /g	Mixture of α-β-γ-LiAlO ₂ 0.1–12 m ² /g	α-LiAlO ₂ β-LiAlO ₂ 0.5–1-mm thickness
Electrolyte ^a	52 Li-48 Na 43.5 Li-31.5 Na-25 K 'Paste'	62 Li-38 K ~60–65 wt% Hot press 'tile' 1.8-mm thickness	62 Li-38 K 50 Li-50 Na ~50 wt% Tape cast 0.5–1-mm thickness

Les pertes ohmiques pour une *PAC MCFC*, dépendent hautement de l'électrolyte utilisé. Sous des conditions de fonctionnement types, les travaux publiés par [18] ont démontré que l'électrolyte absorbe à lui seul plus de 70% des pertes ohmiques et qui dépendent grandement de l'épaisseur (e) de cet électrolyte exprimée en centimètre suivant la formule :

$$\Delta V = 0.533 e \quad (I.5)$$

Les conditions optimales pour le fonctionnement des *MCFCs* sont globalement les mêmes que pour les *PAFCs*. Le gabarit, le rendement, la tension produite, la charge et le coût sont des paramètres recherchés. La réponse $V=f(I)$ est définie en fonction de la pression, de la température, la composition des gaz réactant et son utilisation. Son débit est situé entre 100 et 200 mA/cm² sous une plage de tension de 750 à 900 mV par cellule comme illustré en *Figure I.17*.

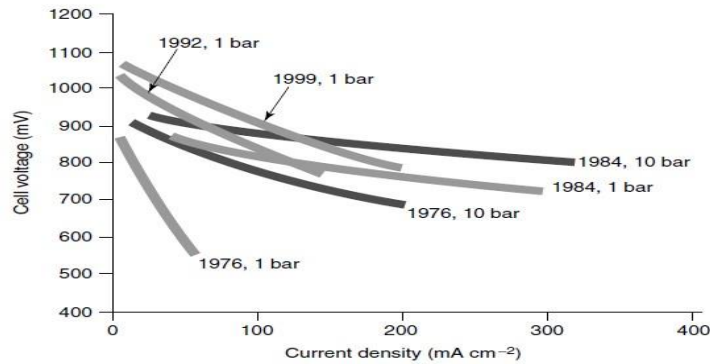


Figure I.17. Évolution des performances des MCFC

I.2.2.5. Les sofc (solid oxide electrolyte fuel cell)

Sa mise au point remonte à 1899. Son électrolyte solide lui confère une simplicité d'utilisation et beaucoup d'avantages mécaniques. Elle peut être utilisée dans une large gamme d'applications sous plusieurs gabarits. Sa température de fonctionnement varie de 650°C à 1000°C. Elle doit donc être considérée non comme uniquement un moyen de production d'énergie, mais comme sous-système d'un ensemble plus vaste de génération, cogénération et reformage énergétique [29] [30].

I.2.2.6. Les pemfc : proton exchange membrane fuel cell

Les *PEMFC* appelée aussi *Solid Membrane Fuel Cell (SMFC)* ont été développées pour la première fois aux *USA*. Dans les années 1960s par la *NASA* dans le cadre de ces programmes spatiaux. Elles sont constituées d'un électrolyte conducteur d'ions serti par des électrodes poreuses catalysées pour n'en former qu'un seul corps mince comme illustré en *Figure I.18* [31]. L'intégration de nouveaux polymères comme le *Nafion*, à partir de 1967 par la compagnie *Dupont* et utilisé jusqu'à nos jours, a permis le développement considérable de ce type de *PAC*.

Ces membranes *MEAs* constituées d'Anode-Électrolyte-Cathode, sont reliées à des plaques bipolaires reliées en série l'une à l'autre, pour former des ensembles plus épais *Figure I.18*.

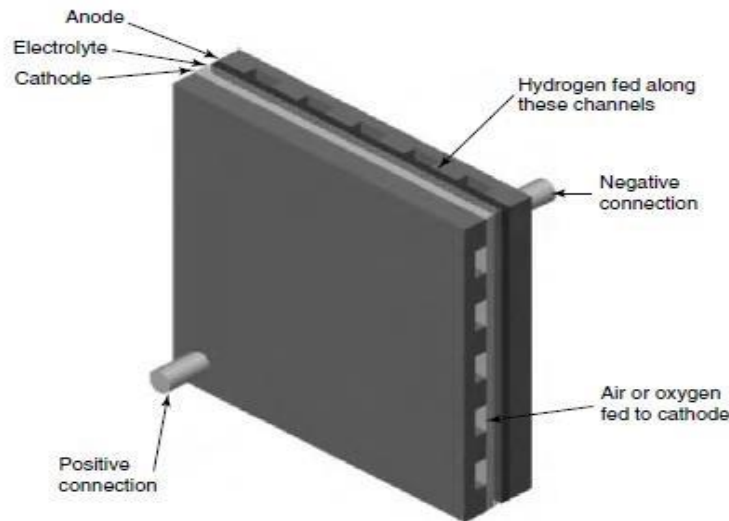


Figure I.18. Plaques bipolaires formant une cellule PAC.

L'ion traversant le polymère est un proton H^+ . La réaction de base est la même que pour une PAC à électrolyte acide. L'électrolyte réagit à basse température ce qui confère à la PAC l'avantage de démarrer rapidement. La fine épaisseur de la membrane (*MEA*) rend la pile compacte facilement utilisable sur des systèmes mobiles et transportables. Les premières *PEMFC* construites par la *NASA* et utilisées dans les programmes *GEMINI* avait une durée de vie limitée de 500 h. Cependant le reformage de l'eau dans l'électrolyte coté cathode est jugé trop contraignant, et a causé le ralentissement du développement de la *PEMFC* dans le programme spatial américain au profit des *AFCs* et des *PAFCs*.

À cette époque le niveau d'intégration n'a permis qu'une précision de 28mg/cm^2 de *Pt* et par électrode, le niveau atteint aujourd'hui est moins de 0.2mg/cm^2 . Le déploiement et le développement des *PEMFC* ont été retardés ou ralenti jusque dans les années 1990s avec l'apparition des modèles « *Ballard Power System* » au Canada et à « *Los Alamos National Laboratory* » aux États Unis.

Depuis les *PEMFC* sont devenues les plus prisées et les plus utilisées sur les systèmes mobiles tels les voitures, les bus et certaines embarcations maritimes, ainsi que sur une large gamme d'applications portables. Elle est également utilisée sur les systèmes *CHP* (*Combined Heat Power*) et redevenue le système de génération par excellence pour les différents programmes spatiaux et véhicules orbitaires [32].

Les *PEMFC* ont donc une gamme d'utilisation très variée, allant de quelques Watts pour l'alimentation des téléphones portables et ordinateurs, à quelques KWatts pour de petites embarcations de plaisance ou des appareils domestiques, à quelques dizaines de KWatts pour

des véhicules sur route, jusqu'à des centaines de KWatts pour les bus, trains et autres systèmes CHP industriels, utilisant des électrodes et électrolytes adaptés et induisant des conceptions de fabrication différentes comme [33] :

- La gestion de l'eau produite.
- Le refroidissement de la pile.
- La mise en série des cellules primaires.
- Pressions des gaz réactants.

I.2.3. La gestion de l'eau dans une pemfc

La structure chimique générale de l'électrolyte d'une *PEMFC* explique clairement la nécessité de la présence d'une quantité minimale et suffisante d'eau afin d'assurer un fonctionnement adéquat de la PAC. La conductivité protonique est proportionnelle à la quantité d'eau présente, sans dépasser un seuil limite qui pourrait noyer les électrodes empêchant la diffusion des gaz dans les pores. Un seuil d'équilibre doit donc être impérativement trouvé.

Dans une *PEMFC* l'eau est formée à la cathode, à travers laquelle l'air doit être soufflé lui apportant l'oxygène nécessaire au reformage de l'eau. Ce souffle doit drainer une quantité d'eau proportionnelle à sa pression. En pratique cet équilibre est quelque peu perturbé à cause de la migration des ions H^+ venant au sens inverse et empêchant l'hydratation d'une partie de l'électrolyte. Ce phénomène est appelé « Drainage Electroosmotique » [34].

Un autre phénomène à révéler est celui de la température. À 60°C, les électrodes sont asséchées plus vite qu'elles ne sont réhydratées. L'unique solution est d'hydrater le flux d'air d'alimentation. Les différents mouvements des molécules d'eau sont illustrés par la *Figure I.19*.

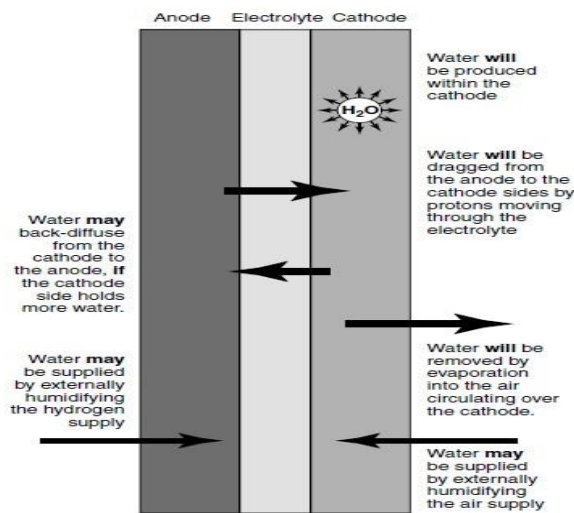


Figure I.19. Mouvement des particules d'eau durant un cycle de réaction.

Un troisième problème révélé est la difficulté à maintenir une humidité constante de l'air à travers la pile. Souvent l'air soufflé avec un taux d'humidité précis, perd ou acquiert de l'humidité après avoir parcouru plusieurs cellules. Il peut parfois sortir de la pile complètement asséché. La solution proposée est l'élargissement des conduites d'air des cellules elles-mêmes ou du rack entier [35].

I.2.4. Le facteur humidité pour une pemfc

L'humidité d'une *PEMFC* doit donc être contrôlée de manière à ce que l'air ne soit ni sec pour pouvoir drainer le surplus d'eau, ni trop humide pour éviter la saturation en eau de la membrane, soit 80% le taux limite. Les travaux publiés dans [18], exposent une méthode pour l'humidification des gaz dans une *PEMFC*, expliquant notamment le fait que pour les PACs de faibles puissances l'apport d'une humidification externe n'est pas nécessaire. Cependant une température supérieure à 60°C est désirable et préférable non seulement pour réduire les pertes dues à l'activation, mais aussi pour faire fonctionner la PAC à sa densité de puissance maximale. Il existe alors principalement deux méthodes d'humidification : soit par humidificateurs à bulles soit par aspersion. Une pression des gaz doit donc être constamment ajustée afin de canaliser l'eau et l'évacuer, permettant ainsi à la pile d'être humidifiée et refroidie convenablement [35].

I.2.5. Refroidissement et alimentation en air des pemfc

I.2.5.1. Refroidissement par air à travers l'alimentation cathodique

Le rendement d'une *PEMFC* est aux alentours de 50%. Le taux de pertes thermique

P_{th} est [36]:

$$P_{th} = P_e \left(\frac{1.25}{V_c} - 1 \right) \quad (I.6)$$

P_e : La puissance de la PAC.

V_c : Tension par élément de pile.

L'évacuation de cette chaleur dépend grandement de la puissance de la pile. Pour une pile de 100 W, la chaleur est évacuée simplement par convection naturelle. Avec un espacement entre éléments de 5 à 10 mm. Pour des piles plus compactes, on a recours à une convection forcée.

I.2.5.2. Refroidissement par circuit d'air indépendant

Prenons le cas où les gaz de refroidissement et les gaz réactants sont combinés à travers le circuit cathodique. Pour une pile de 100 W fonctionnant à 50 °C, dont la tension moyenne est de $= 0.6 V$. On suppose que le flux d'air de refroidissement entrant est à 20 °C puis sortant dans le meilleur des cas à 50 °C. On supposera également que seulement 40% de la chaleur est évacuée par l'air et le reste est extrait par convection naturelle avec un $C_p = 1004 J/Kg$.

K. En suivant la méthode de calcul donnée en *ANNEXE I*, on obtient après avoir calculé les pertes thermiques P_{th} [17] [37]:

$$0.4 P_e \left(\frac{1.25}{0.6} - 1 \right) = m C_p \Delta T \quad (I.7)$$

m : Masse de gaz convertie en Kg/s.

C_p : Capacité thermique en J/Kg.K.

ΔT : Écart de température en K.

$$m = 1.4 \times 10^{-6} P_e \quad (I.8)$$

$$m = 3.57 \times 10^{-7} \lambda \frac{P_e}{V_{fc}} \quad (I.9)$$

On obtient alors une valeur excessive de la Stoechiométrie de l'air $\lambda = 24$, correspondant à une humidité relative $\Phi = 26\%$ suivant le *Tableau I.4*.

Tableau I.4. Humidité relative de l'air sortant en fonction de la température et de la Stoechiométrie de l'air

Temp (°C)	$\lambda = 1.5$	$\lambda = 2$	$\lambda = 3$	$\lambda = 6$	$\lambda = 12$	$\lambda = 24$
20					213	142
30				194	117	78
40		273	195	112	68	45
50	208	164	118	67	40	26
60	129	101	72	41		
70	82	65	46			
80	54	43	30			
90	37	28				

On conclut donc que l'air sortant de la pile est dans le meilleur des cas plus sec que l'air ambiant du désert du Sahara. On rappellera que les valeurs données dans le *Tableau 4*, ont été obtenues pour un taux d'humidité de l'air entrant entre 20 et 70 %.

Le seul moyen de réduire λ , est de séparer le gaz réactant et l'air de refroidissement. On rappellera qu'à 50 °C le facteur λ doit être compris : $3 > \lambda > 6$ pour empêcher l'assèchement de la pile. Cela requiert l'utilisation de deux pompes.

La *Figure I.20* illustre un exemple de pile à plaques bipolaires. On y remarque des canalisations séparées pour les différents gaz. Ce procédé est efficace pour les puissances

allant de 100-1000W. Un modèle réel « *Ballard Nexa* » de 1 KW est donné en *Figure I.21* [18].

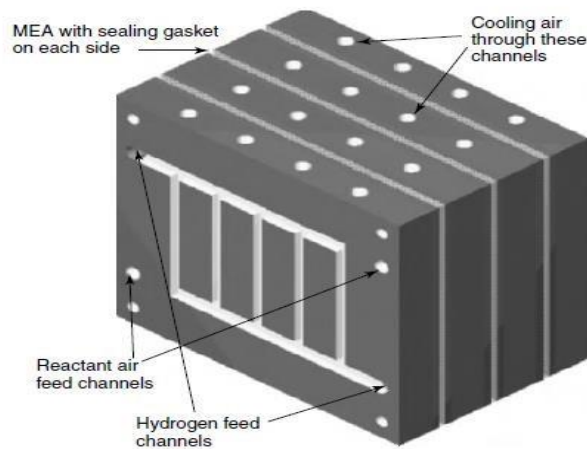


Figure I.20 : Conduit d'Air de refroidissement sur 3 cellules d'un Rack de PAC

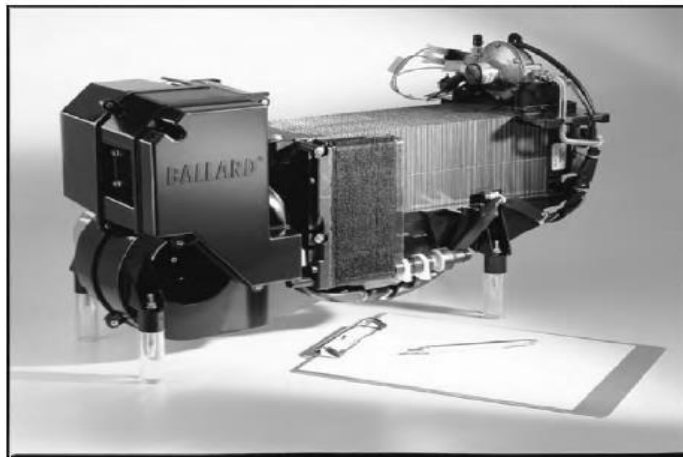


Figure I.21: Pile "Ballard Nexa". (Reproduced by kind permission of Ballard Power Systems.)

I.2.5.3. Refroidissement par eau

Le refroidissement par air devient de plus en plus difficile et moins efficace que le circuit le parcourant devient long. Ce qui conduit à un refroidissement non homogène. Le refroidissement par eau devient alors un impératif sachant que 1Kg d'eau possède un coefficient de pénétration supérieur à 1Kg d'air à travers des conduites étroites [18].

Le fonctionnement d'une PEMFC étant très affecté par la température, le passage d'un type de refroidissement à un autre dépend donc de la puissance de la pile. Au-delà de 5 KW, il est préférable et plus efficace de recourir à un refroidissement par eau. En dessous de ce seuil la méthode utilisée est du seul jugement de l'exploitant. Si l'on souhaite exploiter la

chaleur générée par la pile pour le chauffage domestique, il serait très utile d'utiliser l'eau comme refroidisseur [38] [39].

Dans le modèle de la *Figure I.22*, les gaz réactants coulent de manière homogène à travers des rainures parallèles. Plusieurs types de rainures ou de canalisations peuvent être réalisés *Figure I.23*.

En fonction de la spécificité de la pile les fabricants optent pour l'une ou l'autre des méthodes sans aucune préférence. L'un des modèles les plus commercialisés est de forme rectangulaire et utilisant des rainures schématisées en *Figure I.23d* [18].

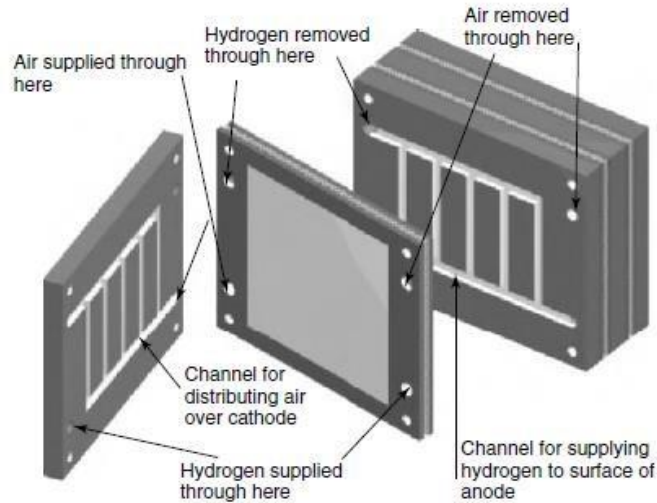


Figure I.22 : Collecteurs internes des conduits de refroidissement.

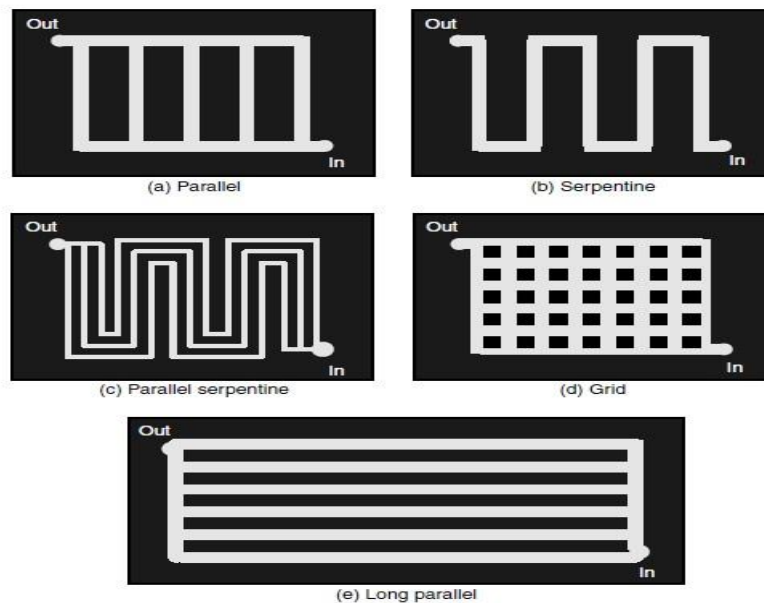


Figure I.23 : Différents schémas de canalisation des conduits de refroidissement.

I.3. État de l'art batterie et éléments de stockage

I.3.1. Principe de fonctionnement

Les batteries et autres éléments de stockage d'énergie fonctionnent principalement sur le principe de conversion électrochimique. Elles stockent l'énergie sous forme chimique et la convertissent en énergie électrique lorsque c'est nécessaire. Une batterie se compose de deux électrodes, l'anode et la cathode, immergées dans un électrolyte. Lors de la décharge, une réaction chimique se produit à l'anode, libérant des électrons qui traversent un circuit externe pour atteindre la cathode, produisant ainsi un courant électrique utilisable. Simultanément, des ions positifs migrent à travers l'électrolyte pour maintenir l'équilibre de charge. Lors de la recharge, ce processus est inversé, rétablissant les conditions initiales et permettant ainsi une nouvelle utilisation. Les types de batteries varient selon les matériaux et les conditions d'utilisation, ce qui influence leur capacité, leur durée de vie et leurs applications spécifiques.

I.3.2. Classification des piles et batteries

Les batteries et piles électrochimiques sont définies comme éléments primaires si elles sont non rechargeables, ou secondaires si au contraire elles le sont.

I.3.2.1. Batteries ou piles primaires

Ce type de batteries ne sont pas rechargeables et sont jetées une fois déchargées. Leur électrolyte est un matériau non liquide et est contenu dans un matériau absorbant. Elles sont appelées piles sèches.

Les batteries ou pile primaires sont habituellement bon marché, légères et souvent utilisées à souhait dans la plupart des équipements électroniques portables ou dans les équipements de pointe pour le maintien des mémoires, de signalisations, de veille et autres systèmes ne consommant qu'une faible énergie. Elles offrent une autonomie acceptable pour des besoins quotidiens ordinaires, elles ne nécessitent aucun entretien. Elles sont en forme cylindrique ou en bouton de chemise [41].

La plupart des fabricant redoutent les accidents inhérents à la recharge de leurs Batteries, qui peuvent irréversiblement se détériorer ou exploser. Cela n'est pas recommandé, mais certaines Batteries de ce type peuvent être rechargées sous des conditions contrôlées. Le moyen le plus simple pour l'empêcher c'est l'insertion d'une diode de blocage comme illustré en *Figure I.24(a)*. On notera que dans la configuration de la *Figure I.24(b)* et en cas de défaillance de l'une des cellules dans l'un des bras, le rack de batterie peut être chargé mais au risque de détériorer le second causant une défaillance totale et irréversible. En configuration de la *Figure I.24(c)*, les bras sont indépendants et la propagation des défaillances éventuelles sont rendues impossibles. Cette diode doit donc être prévue et doit être efficace et habituellement dimensionnée pour supporter le double du courant de fonctionnement normal de l'appareil considéré. Elles sont généralement de type Schottky, dont le courant direct est choisi comme suit [42] :

$$I_{max} = \frac{I_{op}}{N_B} \times 2 \quad (I.10)$$

- I_{op} : Courant de fonctionnement de l'appareil considéré.
- N : Nombre de bras de piles en parallèles.
- I_{max} : Courant maximal admissible par diode.

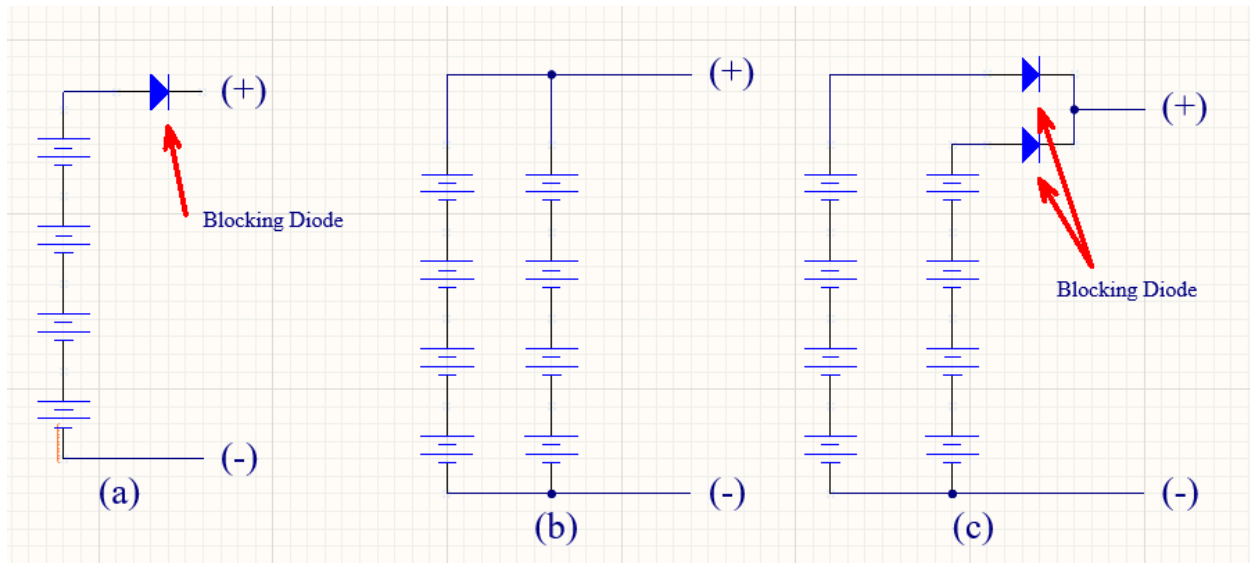


Figure I.24. Architecture interne des Batteries primaire.

I.3.2.2. Batteries secondaires et piles rechargeables

Ces batteries peuvent être rechargées électriquement en leurs injectant un courant en sens inverse au courant de décharge donc d'utilisation. Elles sont appelées accumulateurs, batteries de stockage ou batteries rechargeables. Elles sont utilisées conjointement et en association avec une autre source d'énergie primaire dite aussi principale, pour alimenter un système tiers continuellement ou par intermittence comme les UPS, les VE et les (*ESS : Energy Storage Systems*) [43].

Les critères pour la fabrication des Batteries primaires au Lithium ou autres sont valables pour les Batteries rechargeables. Cependant, lors de l'association en série des éléments de pile, la capacité doit être soigneusement étudiée. Effectivement, l'élément ayant la plus petite capacité va l'imposer au reste du rack lors de la décharge, et l'élément possédant la plus grande capacité va à son tour l'imposer au rack lors de la charge. Des conditions de sécurité doivent également être prises en compte lors des processus de la conception des systèmes de charge, en l'occurrence : la tension maximale, le courant maximal de charge ainsi que la température de fonctionnement.

Les Batteries de type Nickel Cadmium ou Nickel Métal Hybride, peuvent être chargées dans une gamme de capacité assez large, proportionnelle au courant. Cette augmentation du

courant induit une augmentation de la température qui doit être contrôlée par différents éléments, comme illustrés en *Figure I.25* [40].

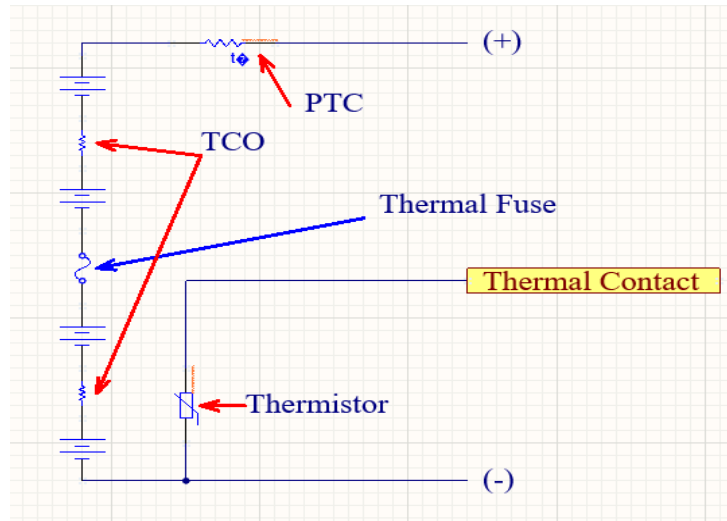


Figure I. 25. Protection pour la charge des Batteries.

Le thermistor NTC (*negative temperature coefficient*) : sa valeur nominale est donnée à 25°C est placée à un endroit propice, elle fournira la température lors de la charge et décharge afin de contrôler les grandeurs électriques par des circuits spécialisés.

Thermostat (*temperature cutoff TCO*) : il est utilisé pour un fonctionnement à une température précise, et est utilisé pour couper le circuit lorsque le fonctionnement déborde au-delà d'une gamme de fonctionnement préétablie mesurée en termes de courant ou de température.

Fusible thermique : il est chargé d'ouvrir le circuit à une température de fonctionnement prédéterminée. Suivant les modèles et les destinations ils sont conçus pour une rupture du circuit entre 30°C et 50°C. Ils sont réinitialisés après la baisse de la température.

Résistance PTC (*positive temperature coefficient*) : ce composant voit sa résistance augmenter avec l'augmentation de la température, diminuant par la même occasion le courant.

Le Tableau donné en ANNEXE 2 donne une esquisse sur le choix industriel sur les préférences du type de Batterie à utiliser en fonction de l'équipement à alimenter.

I.3.2.3. Les batteries de réserve

Dans ce type de batteries, la détérioration chimique ou l'autodécharge est éliminée en isolant l'électrolyte des électrodes. Elles sont ainsi capables de garder leurs charges à très long terme. Pour le cas des batteries thermiques, l'électrolyte sous forme de gel reste inactif et ne devient conducteur qu'après avoir chauffé la batterie. Ce type de batteries est généralement utilisé dans les systèmes d'armement comme les missiles, les torpilles et autres projectiles explosifs [40].

I.3.3. La décharge

Comme illustré en *Figure I.26*, la pile est connectée sur une charge externe. Les électrons migrent de l'Anode qui est oxydée vers la Cathode réduite. L'électrolyte se charge du déplacement des anions ou des cations. La réaction de décharge pour une anode en Zinc et une cathode en Chlore est donnée comme suit [40].

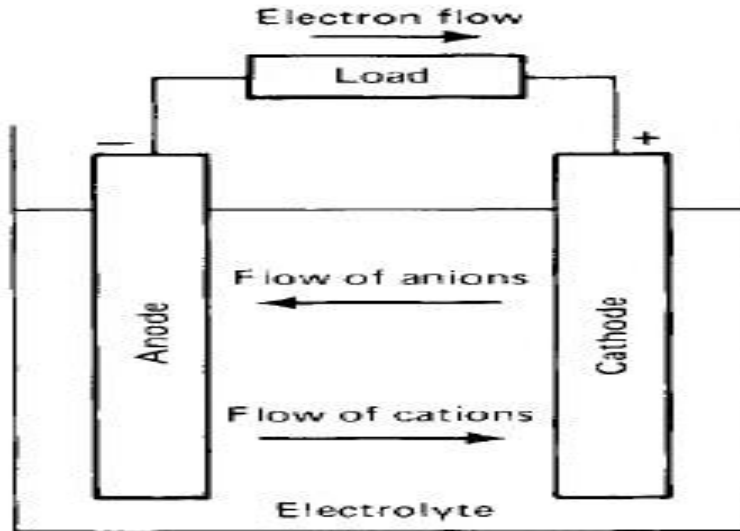
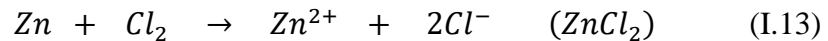


Figure I.26. Processus de décharge dans une Batterie.



La réaction globale devient alors :



Plus le courant drainé est important plus la grandeur ($I \times R$) augmente, et plus vite la batterie atteint son niveau de décharge. Cela conduit la batterie inexorablement vers sa fin de vie suite aux détériorations chimiques se produisant après des décharges plus ou moins violentes. Pour chaque régime de décharge correspond une durée de vie plus ou moins prédictible. On en déduit que le cycle de vie est fonction du taux de décharge « C_n » que l'on peut déterminer pour les batteries secondaires alcalines sur le standard *IEC 61434* décrit dans un guide de désignation publié par la commission *SC-21A* du comité international de l'électrotechnique IEC comme suit [40]:

$$I = C_n / N_h \quad (I.14)$$

Avec :

- I : le courant drainé en Ampère
- C_n : la capacité de la batterie fournie par le constructeur ($C_{10}=250Ah$)
- N_h : le temps en heures pour lequel la capacité est considérée.

Il existe plusieurs types de décharge de batterie, il est alors important de respecter les consignes d'utilisation du constructeur pour chaque type ou modèle de batterie. Cette consigne correspond à la nature de la charge ou de la température d'utilisation. Lors de l'évaluation de la performance, le mode de décharge doit être le même que celui proposé par le constructeur.

Ces décharges peuvent varier comme suit :

- **Résistance constante** : Dans ce cas, la charge doit avoir une résistance constante de manière à ce que le courant décroît proportionnellement à la tension.
- **Courant constant** : Le courant dans ce cas est maintenu constant tout au long du cycle de décharge

I.3.4. La recharge

Durant la recharge, le courant est injecté en sens inverse à celui de la décharge, provoquant une oxydation à la cathode et une réduction à l'anode comme illustré en *Figure I.27*. L'anode devient donc l'électrode positive et la cathode l'électrode négative. En prenant le même exemple précédent, à l'électrode négative où la réaction cathodique on aura un gain d'électrons [40] [43] :

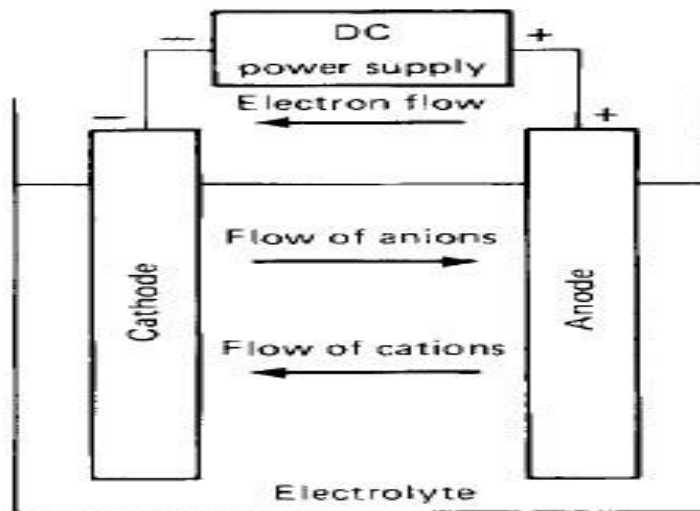
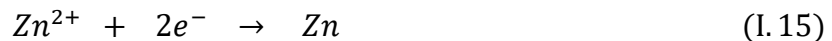


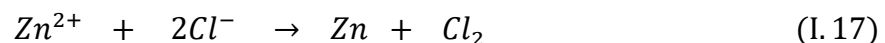
Figure I.27. Processus de charge dans une Batterie.



À l'électrode positive où la réaction anodique :



La réaction globale sera :



À la fin de la recharge, l'état chimique de la batterie revient à l'état initial. C'est ce processus qui est exploité dans tous les systèmes rechargeables.

I.3.5. Les contraintes liées à la charge et la décharge

L'énergie utile d'un pack de batterie est limitée lors de sa charge à celle de l'élément le plus chargé. Et lors de la décharge à celle le moins chargé. Pour une gestion optimale de l'énergie, on aura besoin de :

- Caractériser rapidement les cellules à partir d'une méthodologie facilement reproductible dans le but d'évaluer les différents modèles existant sur le marché.
- Disposer d'une estimation suffisamment précise de l'énergie utilisable dans l'ensemble visé.
- Élaborer une stratégie efficace de gestion d'énergie pour une autonomie optimum du système ainsi réalisé. Ce paramètre influe grandement sur la durée de vie du pack.
- Disposer d'un modèle numérique simple, rapide et robuste, représentant efficacement le comportement dynamique du pack à réaliser.
- Éventuellement un paramétrage précis à partir de mesures expérimentales.

Nous allons à cet effet présenter une caractérisation du comportement dynamique du pack. En fonction de leurs technologies, les batteries réagissent différemment en fonction de leurs compositions physico-chimique, de la température du milieu, du régime d'utilisation. La *Figure I.28*, illustre la courbe de Ragone pour différents types rencontrés le plus souvent dans l'industrie.

On y distingue clairement l'évolution de la capacité de charge pour différentes batteries dans l'aire $P_{spec} = f(E_{spec})$. Cette étude oriente vraisemblablement l'industrie des batteries vers le Lithium.

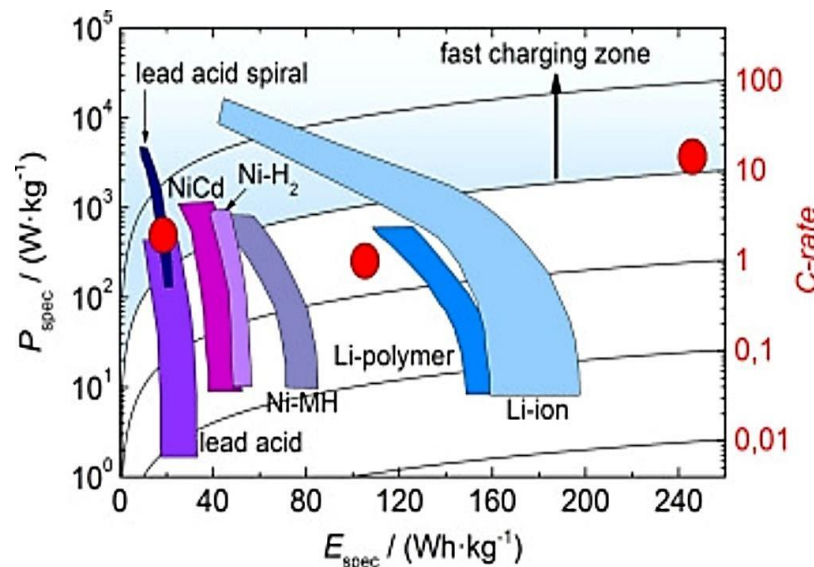


Figure I.28. Courbe de Ragone pour différents types de batteries.

I.3.6. Le SOC et le DOD

Le SOC représente le rapport entre la charge disponible en Ah et la capacité de la batterie en Ah . [44].

$$SOC = \frac{\text{Charge Disponible}}{\text{Capacité de la Batterie}} \quad (I.18)$$

La capacité de décharge donné par la *relation (I.20)* est également un indicateur de niveau de charge.

$$DOD = 1 - SOC \quad (I.19)$$

I.3.7. Niveaux de tension

- **La Tension Théorique** : Elle dépend de la nature de l'électrode, de l'électrolyte et de la température prise habituellement 25°C.
- **La Tension à Vide** : Est prise sans charge connectée. Elle est souvent proche de la tension théorique.
- **La Tension de Fonctionnement Normal** : Est une tension prise pour un fonctionnement optimal.
- **La Tension Nominale** : Est le niveau de tension typique acceptée. Pour une batterie en dioxyde de Zinc-Manganèse cette tension est de 1,5V.
- **La tension de Service** : Plus représentative, elle est inférieure à la *f.e.m* à vide.
- **La tension Moyenne** : Est la tension moyenne avant d'atteindre le niveau considéré comme état de décharge.
- **La Tension du Point Milieu** : (*Mid point Voltage*) Est la tension milieu durant la phase de décharge.
- **La Tension de Fin de Service** : Est la tension à partir de laquelle on considère que la batterie a fourni l'essentiel de sa capacité.

Pour une batterie Plomb-Acide, la tension à vide et théorique sont de 2,1V ; la tension nominale est de 2,0V ; la tension de fin de service est de 1,75V, pour un fonctionnement modéré sous une charge à 1,5V. La tension de charge peut varier de 2,3V à 2,8V [40].

I.3.8. La durée de vie de la batterie

Le graphe de la *Figure I.29* montre différentes performances en termes de durée de vie pour différentes batteries en fonction de la température et du courant d'utilisation. Ce graphe peut aisément être utilisé afin d'évaluer ou d'approximer la durée de vie d'une batterie sous un fonctionnement donné ou à l'inverse, de déterminer la capacité d'une batterie en termes d'A/Kg nécessaires pour une durée de fonctionnement pour lequel on se fixe l'objectif [45].

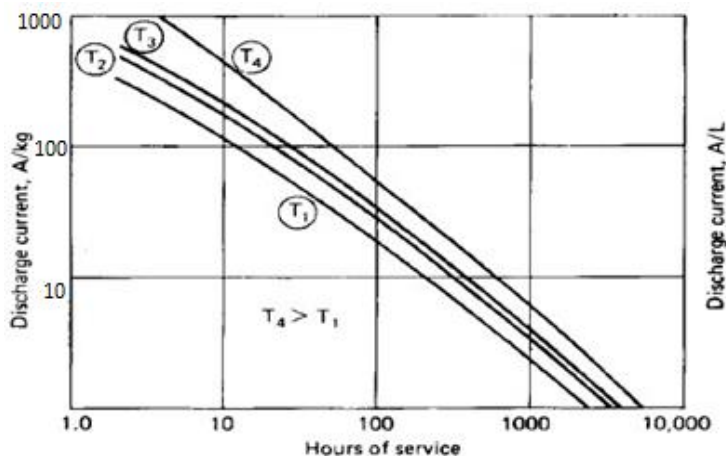


Figure I.29. Durée de vie de la Batterie en fonction du courant de décharge et de la température ($T_1 < T_4$). (Echelle log-log)

La température et la durée de stockage sont également des facteurs prédéterminant quant à la périssabilité prématurée du composant. La *Figure I.30* montre ce phénomène pour plusieurs types de batteries.

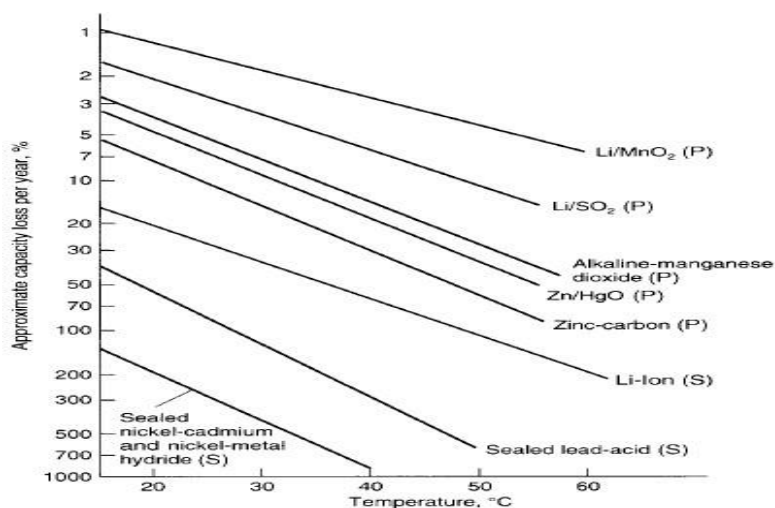


Figure I.30. Phénomène de l'autodécharge en fonction des conditions de stockage.

I.3.9. La standardisation des batteries

Les premiers standards ont vu le jour dès 1912, à l'initiative du « *Committee of the American Electro-chemical Society* » en proposant une méthode de tests pour les piles sèches. Cette initiative a permis la première publication en 1919, approuvée par le « *American National Standard Institute 'ANSI'* » sous l'accréditation *C18*. Depuis plusieurs standards industriels et militaires ont vu le jour. Les Tableaux donnés en *ANNEXE 3* énumèrent les standards de sécurité et d'utilisation les plus connus [46].

La nomenclature IEC pour les Batteries primaires achevée en 1992, est basée sur les aspects électrochimiques, forme et dimension. Les référencements incluent des lettres et valeurs numériques indiquant le diamètre et la longueur. Un exemple de référencement est donné en ANNEXE 4. Les modèles en forme cylindriques déjà existant ont été référencés en ANNEXE 5 [40].

I.4. État de l'art supercondensateurs

I.4.1. Introduction

Les Supercondensateurs sont des condensateurs à double couches (*Electrical Dual Layer Capacitors*) à haute densité de puissance. Ils peuvent être chargés et déchargés à plus de 10^6 fois, sans subir aucune perte d'énergie. Ils stockent de l'énergie par absorption des ions. Leurs structures sont autant variées que complexes. Les matériaux testés sont le Carbone, les oxydes de métaux, les polymères conducteurs et les polymères synthétiques. Les électrodes sont fabriquées en carbone haute porosité. L'électrolyte est également soigneusement choisi en fonction de la stabilité thermique, et la non volatilité. Ces matériaux conduisent à la forme géométrique finale et à l'encombrement du composant [47].

Ces composants sont généralement utilisés comme source d'énergie tertiaire. Largement présents dans les ESS des véhicules électriques haut de gamme. La *Figure I.31* montre la réponse des supercondensateurs sur une courbe de *Ragone* par rapport aux autres systèmes de stockage. On y relève que les supercondensateurs offrent une densité d'énergie très faible par rapport à celle des Batteries. Et inversement ils présentent une plus grande densité de puissance comparativement aux autres types de stockage.

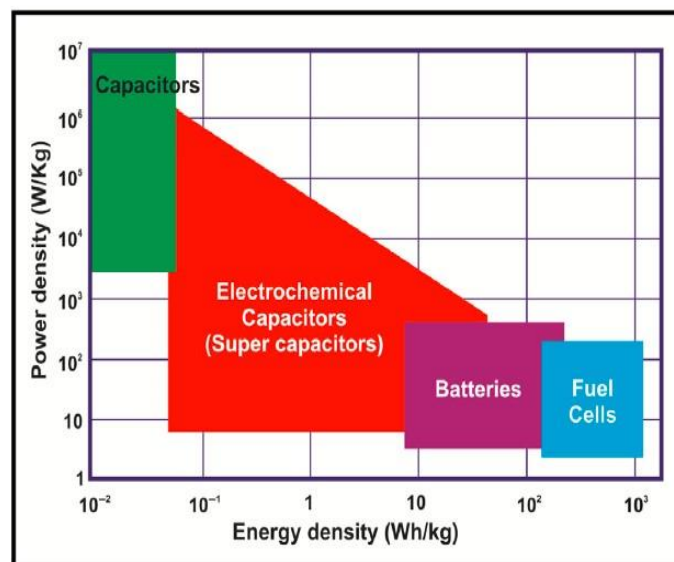


Figure I.31. Courbe de Ragone pour les Supercondensateurs.

I.4.2. Principe de fonctionnement

Les supercondensateurs ou EDLCs stockent l'énergie sous forme de charges (ions), sur une double couche électrique Électrode / Électrolyte comme illustré en *Figure I.32* offrant ainsi un processus hautement réversible pour un cycle de vie théoriquement infini [48].

Les EDLCs retiennent de l'énergie par réaction Faradique, ou la configuration de charge sur une double couche d'Helmholtz crée un déplacement de courant durant les processus de charge et décharge. Cette réaction est d'autant plus grande que la surface des électrodes est grande. La capacité s'exprime alors par :

$$C_{dl_e} = \frac{Q_e}{V_{EDLC}} = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 S}{d} \quad (I.20)$$

$$C_{dl} = 2 \cdot C_{dl_e} \quad (I.21)$$

- C_{dl} : Capacité total de l'EDLC.
- C_{dl_e} : Capacité EDL pour une seule électrode.
- Q_e : La charge totale.
- V_{EDLC} : Potentiel entre électrodes.
- ϵ_r, ϵ_0 : Constantes diélectriques respectivement du milieu et du vide.
- d : Distance inter-Charges.
- S : Surface de l'électrode.

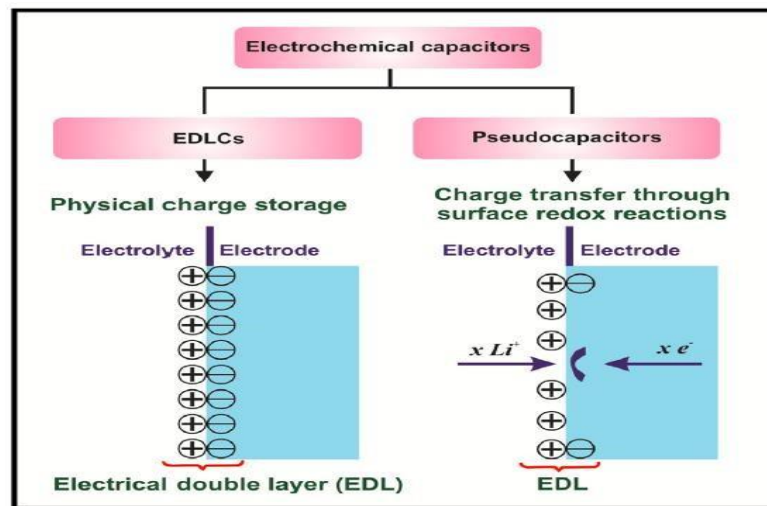


Figure I.32. Schéma de principe d'un Supercondensateur.

De la variation de cette charge, résulte un courant I exprimé par l'expression suivante.

$$I = \frac{dQ_{EDLC}}{dt} = C_{dl} \times \frac{dV_{EDLC}}{dt} \quad (I.22)$$

On considérant que la tension varie linéairement en fonction du temps t , tel que :

$$V = V_0 + v_t \cdot t \quad (I.23)$$

Où V_0 est la tension initiale et v_t et le taux de balayage en $V \cdot s^{-1}$. La variation du courant est donnée par :

$$I = C_{dl} \times v_t \quad (I.24)$$

Pour ces architectures, chaque cellule dispose de deux électrodes plongeant dans un électrolyte de nature organique ou aqueuse. À l'interface électrode/électrolyte et suite à l'application d'une tension entre électrodes, sont stockées des charges par effet électrostatique, résultant une double couche de charges dans l'électrolyte montré en *Figure I.33* [48].

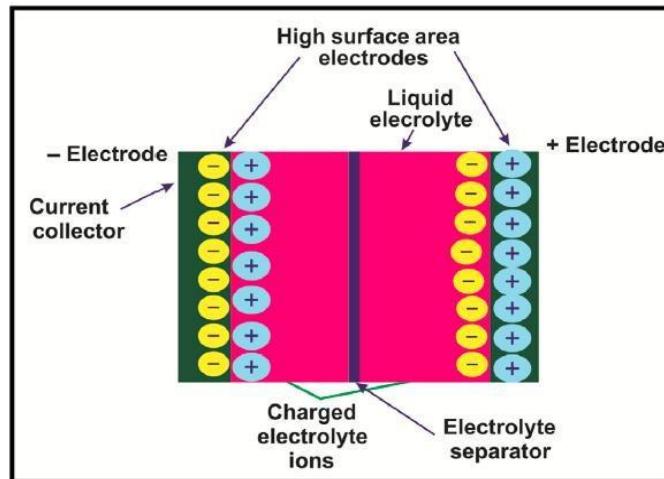


Figure I.33. Structure à double couche d'un supercondensateur.

La distribution de la tension à travers les différentes couches est illustrée en *Figure I.34* amenant à un circuit RC équivalent. Les résistances sont dues aux mouvements des ions à travers l'électrolyte.

L'électrode est reliée à la couche externe d'*Helmholtz* suivit par la couche interne du même nom encapsulant la double couche constituée de la zone de *Stern* et la zone de *diffusion*, formant une double capacitance montée en série et donnée en *équation (I.25)*.

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_s} + \frac{1}{C_d} \quad (I.25)$$

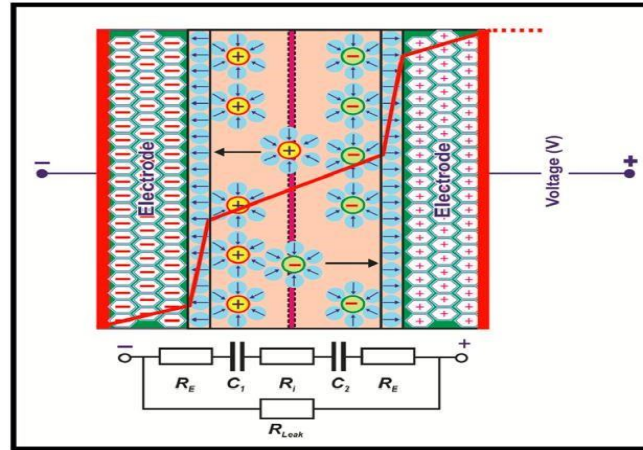


Figure I.34. Distribution de la tension à travers les différentes couches d'un Supercap condensateur.

I.4.3. Les supercapatteries

Le terme "supercapattery" (*SCAP*) est la combinaison de deux mots : supercondensateur et batterie. Ils sont donc des dispositifs de stockage d'énergie électrochimique qui combinent les avantages des batteries et des supercondensateurs. Cela est dû à la propriété de certains matériaux d'oxyde de transition, de *Chalcogénides* et d'autres matériaux, c'est-à-dire leur propriété de stockage de charge.

Les supercondensateurs, généralement divisés en condensateurs à double couche électrique (*EDLC*) et pseudo condensateurs (*PC*), diffèrent dans le processus de stockage d'énergie. L'énergie libérée par la rupture des liaisons dans le matériau d'électrode, due à l'interaction électrolyte/ions métalliques, sera stockée dans une double couche électrique (*EDL*) dans un *EDLC*. Dans les *PC*, le stockage de cette énergie impliquera non seulement l'*EDL* mais aussi l'intercalation de surface de l'électrode, ce qui permet une densité d'énergie améliorée par rapport aux *EDLC*. Cependant, cette amélioration de la densité d'énergie se fait au détriment d'une densité de puissance inférieure en raison du temps de réponse plus lent dans les *PC*. La caractérisation électrochimique de *SCAP* implique trois processus [49] :

- La volt-ampérométrie cyclique pour déterminer le processus de stockage de charge.
- La charge/décharge galvano statique pour déterminer la capacité pratique.
- La spectroscopie d'impédance électrochimique (*EIS*) pour déterminer les résistances caractéristiques pendant les processus de charge/décharge.

Habituellement, des matériaux carbonés tels que les nanotubes de carbone (*CNT*), le carbone activé (*AC*), le *Graphene* et l'*oxyde de Graphene* réduit (*rGO*) sont utilisés pour les électrodes *EDLC*, tandis que des oxydes métalliques tels que *RuO2* et *MnO2* sont utilisés comme électrodes *PC*.

I.4.4. Commercialisation des supercondensateurs

Les supercondensateurs commerciaux disponibles sur le marché utilisent du carbone ou du *Graphene* comme matériau d'électrode. Ces dispositifs sont également connus sous le nom de dispositifs de puissance en raison de leur capacité à libérer une grande quantité d'énergie stockée pendant une période limitée. Les dispositifs supercapacitifs commerciaux et leurs indicateurs de performance sont présentés en *ANNEXE 6*. Ces indicateurs de performance montrent que la tension de travail, la capacité et la résistance du dispositif commercial dépendent de la charge ou du volume de l'électrode. Par conséquent, pour commercialiser les électrodes supercapacitives en tant qu'électrode de travail, les facteurs mentionnés doivent être optimisés.

I.4.5. Les supercondensateurs : déficit et perspectives d'avenir

L'un des principaux défis techniques est la recherche de matériaux d'électrode appropriés qui peuvent fournir à la fois une haute densité d'énergie et une haute densité de puissance. De plus, les matériaux d'électrolyte doivent être compatibles avec les matériaux d'électrode pour assurer une performance stable et une longue durée de vie du dispositif. La recherche de matériaux appropriés est donc un domaine important pour le développement de supercapatteries. Un autre défi technique est la conception de supercapatteries à haute tension avec une stabilité électrochimique suffisante. Les supercapatteries à haute tension ont le potentiel d'offrir une densité d'énergie plus élevée, mais les réactions électrochimiques à haute tension peuvent réduire la durée de vie du dispositif. La recherche de matériaux et de conceptions appropriés pour les supercapatteries à haute tension est donc un domaine de recherche important [48].

En ce qui concerne les perspectives d'avenir, les supercapatteries ont un grand potentiel pour les applications de stockage d'énergie à haute puissance, telles que les véhicules électriques, les engins de construction et les ascenseurs. Les supercapatteries peuvent également être utilisées pour stabiliser les réseaux électriques et pour stocker l'énergie produite par les énergies renouvelables intermittentes telles que l'énergie éolienne et solaire. De plus, les supercapatteries ont un grand potentiel pour les applications de stockage d'énergie à haute densité d'énergie, notamment les appareils électroniques portables et les applications militaires. Une autre perspective d'avenir est la recherche de nouveaux matériaux et de nouvelles architectures de supercapatteries qui peuvent offrir des performances améliorées en termes de densité d'énergie, de densité de puissance, de stabilité et de durée de vie. La recherche de matériaux tels que les nanomatériaux et les matériaux composites est un domaine de recherche important pour le développement de supercapatteries de haute performance. En fin de compte, le développement de supercapatteries est un domaine de recherche en constante évolution qui a le potentiel de révolutionner le domaine du stockage d'énergie. Avec les avancées technologiques et la recherche continue, les supercapatteries pourraient devenir une composante clé de notre infrastructure énergétique à l'avenir.

I.5. Conclusion

En conclusion, l'état de l'art des véhicules électriques montre des progrès significatifs, favorisant une transition vers des transports plus durables. Les améliorations en autonomie, temps de recharge, et durabilité, ainsi que les nouvelles architectures de cellules, réduisent l'anxiété liée à l'autonomie et augmentent l'attrait des véhicules électriques. Toutefois, le coût élevé des batteries demeure un obstacle à une adoption plus large. La recherche continue vise à améliorer ces aspects par le développement de nouveaux matériaux et méthodes de production. Parallèlement, les supercondensateurs, avec leur densité de puissance élevée et leur capacité de charge rapide, offrent une solution complémentaire prometteuse, particulièrement pour les systèmes hybrides et les véhicules électriques. Néanmoins, des défis subsistent, notamment en termes de densité énergétique, coût, durée de vie des batteries et infrastructure de recharge. Un soutien continu des chercheurs, fabricants et pouvoirs publics, ainsi que des investissements dans les infrastructures de recharge et des normes de charge universelles, sont essentiels pour une adoption plus large des véhicules électriques. La collaboration entre tous les acteurs permettra de surmonter ces défis et de réaliser le potentiel des technologies électriques, contribuant ainsi à un avenir plus durable.

Chapitre II

Modélisation des sources hybrides

II.1. Modélisation de la pile à combustible

Pour une tension donnée tributaire du nombre de cellules constituant la *PEMFC*, l'énergie fournie par la pile sera calibrée par un convertisseur statique, dans le but d'être stockée dans des batteries, qui la restitueront en fonction des besoins de la charge auxquels la pile seule ne peut faire face à cause du phénomène d'activation. Le système sera complété par un pack de Supercondensateurs qui fournira les pics de courant en régime transitoire ou lors des démarrages [50].

La pile est caractérisée par une dynamique lente. Afin d'assurer une précision acceptable du modèle mathématique recherché, il est impératif de prendre en considération le maximum de paramètres constituant les caractéristiques statiques et dynamiques du modèle étudié.

Nous allons considérer les hypothèses suivantes :

- La pile utilise des gaz purs.
- Les gaz sont idéaux et les lois sur les gaz idéaux sont applicables et valables.
- La température dans la pile est constante et régulée.
- Les équations de Nernst sont valables.
- Le H_2O produit est globalement liquide.
- Tous les gaz d'échappement dus à la réaction sont évacués.

La nature de la pile et les lois régissant son fonctionnement, imposent le fait que la tension en sortie de la pile est inférieure à la tension produite à l'intérieur. On définit alors trois paramètres, à l'origine de cette chute de tension. $V_{act,cell}$, $V_{ohm,cell}$, $V_{conc,cell}$.

L'équation globale de la tension d'un seul élément de pile est donnée par la *relation (II.1)* :

$$V_{Cell} = E_{Cell} - V_{act,cell} - V_{ohm,cell} - V_{conc,cell} \quad (II.1)$$

La tension V_{fc} aux bornes d'une pile, donnée en *relation (II.2)*, est donc considérée comme étant la tension à vide E_{cell} (*OCV : open circuit voltage*) aux bornes de la pile appelée tension de Nernst E_{Nernst} à laquelle on soustrait les pertes E_{Drop} . Avec N , le nombre d'éléments de pile en série.

Les pertes E_{Drop} à l'origine de la diminution de E_{Nernst} sont définies par les trois composantes données en *relation (II.3)*. La première s'explique par la lenteur de la réaction au niveau des électrodes causant une chute de la tension à l'activation $V_{act,cell}$; elle apparaît aux intensités faibles; La seconde est la chute de tension $V_{ohm,cell}$ due à la résistance du matériau des électrodes, son effet est remarquable aux intensités modérées et moyennes ; la troisième est due à la non constance du flux de gaz aux électrodes causant une chute de tension de concentration $V_{conc,cell}$, celle-ci apparaît aux intensités élevées. On peut alors écrire [51] :

$$V_{fc} = N_{cell}(E_{Nernst} - E_{drop}) \tag{II.2}$$

$$E_{drop} = V_{act,cell} + V_{ohm,cell} + V_{conc,cell} \tag{II.3}$$

Le schéma équivalent de la pile déduit de la relation (II.1) est donné en Figure II.1 avec :

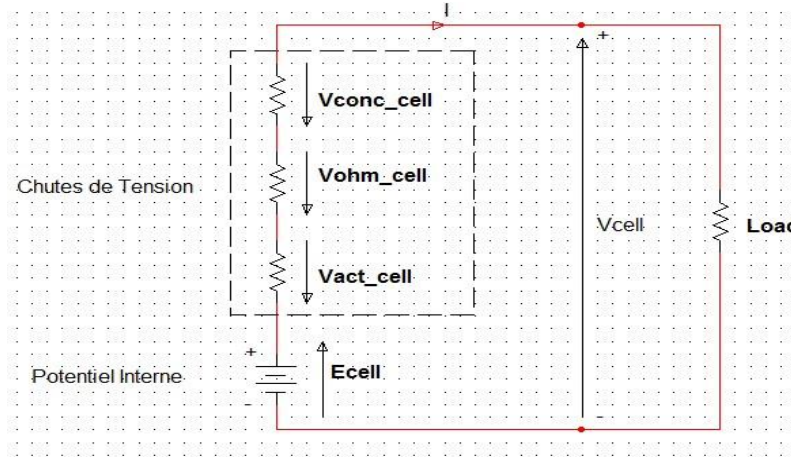


Figure II.1 : Schéma Équivalent d'une Pile à Combustible

L'évolution de la tension de pile est illustrée par la courbe de Tafel donnée en Figure II.2.

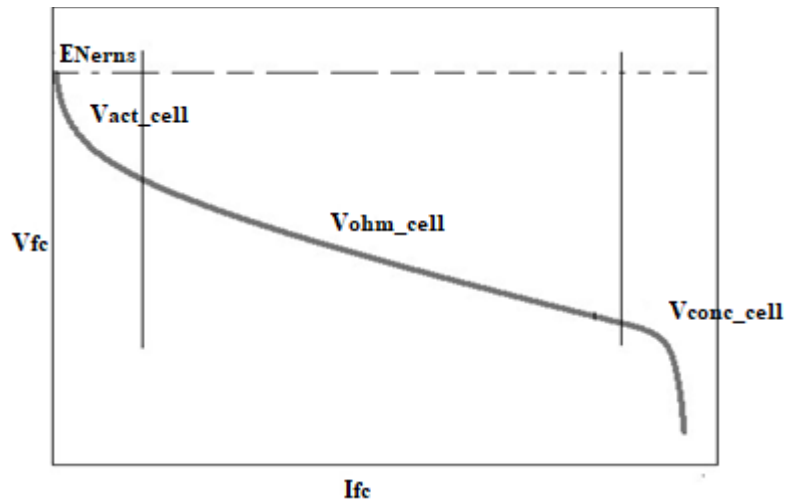


Figure II.2 : Polarisation de la Pile à Combustible (Courbe de Tafel).

II.1.1. Équation de Nernst

Pour chaque réaction chimique, on définit une activité notée a liée aux éléments réactants et résultants, tel que [52]:

$$a = \frac{P}{P_0} \quad (\text{II. 4})$$

Avec : P : Pression partielle de l'élément.

P_0 : Pression standard de 0,1 MPa.

Pour le cas du H_2O on écrira :

$$a_{H_2O} = \frac{P_{H_2O}}{P_{H_2O}^0} \quad (\text{II. 5})$$

La force électromotrice produite par la pile s'écrit alors [17] [21] :

$$E_{Nernst} = E_0 + \left(\frac{R.T}{2F}\right) \cdot \ln\left(\frac{(a_{H_2}) (a_{O_2})^{1/2}}{(a_{H_2O})}\right) \quad (\text{II. 6})$$

Avec :

$$E_0 = \frac{(\Delta\bar{g}_f)}{2F} \quad (\text{II. 7})$$

En termes de pressions l'équation (II.6) deviendra :

$$E_{Nernst} = E_0 + \left(\frac{R.T}{2F}\right) \cdot \ln\left(\frac{(P_{H_2}) (P_{O_2})^{1/2}}{(P_{H_2O})}\right) \quad (\text{II. 8})$$

La cinquième hypothèse considérée nous permet d'écrire que à 1 ATM la pression de l'eau est :

$$P_{H_2O} = 1 \quad (\text{II. 9})$$

Alors l'expression de E_{Nernst} devient en termes de pression :

$$E_{Nernst} = E_0 + \left(\frac{R.T}{2F}\right) \cdot \ln\left((P_{H_2}) (P_{O_2})^{1/2}\right) \quad (\text{II. 10})$$

La *f. e. m* aux conditions standards de pression est donnée en *Tableau 8* [17].

Tableau II.1. Grandeurs caractéristiques standards d'une PAC.

Form of water product	Temp °C	$\Delta \bar{g}_f$, kJ mol ⁻¹	Max EMF V	Efficiency limit %
Liquid	25	-237.2	1.23	83
Liquid	80	-228.2	1.18	80
Gas	100	-225.2	1.17	79
Gas	200	-220.4	1.14	77
Gas	400	-210.3	1.09	74
Gas	600	-199.6	1.04	70
Gas	800	-188.6	0.98	66
Gas	1000	-177.4	0.92	62

II.1.2. La non réversibilité de la PEMFC

La caractéristique tension courant (Courbe de polarisation) de la pile donnée plus haut, renseigne sur la non réversibilité de ce type de composant. Principalement à cause de la nature des pertes qui y prennent siège [53].

- Fuite de carburant.
- Pertes Ohmiques.
- Pertes par concentration.
- Pertes dues à l'activation.

II.1.2.1. Fuite de carburant

La pénétration d'une fine partie du carburant au travers de l'électrolyte, engendre une diminution du courant produit. Le carburant réagit à la cathode avec le flux d'air comburant par vaporisation et dissolution. Les pertes de courant dues aux fuites de carburant ne sont pas faciles à mesurer. Une méthode permet de quantifier la consommation des gaz en circuit ouvert et déterminer le nombre de charges traversant la membrane sans générer de courant circulant dans le circuit externe [55].

II.1.2.2. Pertes ohmique

Ces pertes sont dues à la nature du matériau constituant la pile. Elles sont linéaires, on les appelle aussi pertes résistives. Elles sont dues à la résistance électrique des milieux, des matériaux et des jonctions électrodes-électrolyte et répondent à la loi d'Ohm [56].

$$V_{ohm} = R_{ohm} \times I \quad (\text{II. 11})$$

R_{ohm} : Est la résistance surfacique spécifique du matériaux (*Area Specific Resistance ASR*) exprimée en $\Omega.cm^2$, et i , la densité de courant. Elle dépend du taux d'humidification de la

membrane et de la température de fonctionnement de la pile. Elle est exprimée par la *relation (II.12)* suivante.

$$R_{ohm} = \frac{e_m}{\delta_m} \quad (\text{II. 12})$$

Où e_m est l'épaisseur de la membrane et δ_m est la conductivité dépendante du taux d'humidité et de la membrane, exprimée en $(\Omega \cdot cm)^{-1}$.

Il existe trois moyens pour réduire cette grandeur :

- Utiliser pour les électrodes des matériaux à haute conductivité.
- Architecture favorisant le moins de connections possibles.
- Électrolyte aussi fin que possible.

II.1.2.3. Pertes par concentration

Elles sont le fait d'un manque de concentration en carburant à la surface des électrodes. À haute densité de courant, au fur et à mesure que le carburant réagit, sa concentration diminue, causant la limitation du courant produit. Il est clair qu'en utilisant de l'air comme carburant, augmenterait les pertes par concentration. L'Oxygène ne représente que 25% à 30% de l'air ambiant. Cette raréfaction de l'Oxygène va induire une baisse de la tension produite. Il est communément accepté qu'il n'y a pas de solutions analytiques à ce phénomène. Une approche consiste à manipuler les pressions partielles des gaz réactants [57].

Une approximation de ces chutes de tension est donnée par la *relation (II.13)* en considérant uniquement une variation de pression du gaz d'hydrogène allant de P_1 à P_2 .

$$V_{conc,cell} = \frac{R \cdot T}{2F} \cdot \ln\left(\frac{P_2}{P_1}\right) \quad (\text{II. 13})$$

II.1.2.4. Pertes par activation

La courbe de polarisation donne la variation de la tension de la pile V_{fc} en fonction de la densité de courant J , défini par le rapport du courant de pile sur la surface active de la pile sachant que les éléments de pile sont mis en série tel que :

$$J = \frac{i_{st}}{A_{fc}} \quad (\text{II. 14})$$

Ces pertes à l'activation données en *équation (II.15)* sont dues à la lenteur de la réaction chimique qui prend place au niveau des électrodes. Elles sont de nature non linéaires. En 1905 après plusieurs expérimentations, *Tafel* a observé une légère surtension à la surface des électrodes. La

courbe de Tafel donnée en Figure (II.2), illustre la chute de tension due à l'activation, en fonction du logarithme de la densité de courant exprimée par la relation (II.16) tel que :

$$V_{cell} = E_{cell} - \Delta V_{act,cell} \quad (II.15)$$

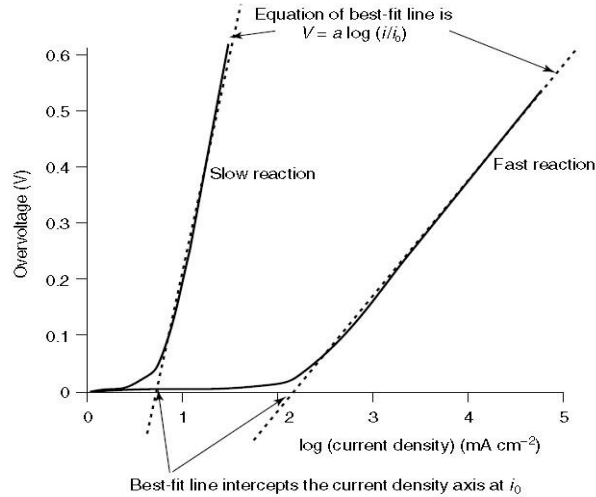


Figure II.3. Courbe de Tafel pour deux vitesses différentes de réaction chimiques.

$$\Delta V_{act,cell} = t_r \cdot \ln\left(\frac{i_{st}}{i_0}\right) \quad (II.16)$$

- La constante t_r exprime le temps de réaction induisant une chute de tension proportionnelle.

La constante i_0 la densité de courant d'échange (*Exchange Current Density*), et est d'autant plus grande que la réaction est rapide.

L'équation de *Tafel* est évidemment vérifiée pour tout courant i_{st} tel que $i_{st} > i_0$.

À l'origine, l'équation de *Tafel* a été déduite empiriquement. Pour l'Hydrogène produisant $2e^-/mole$, la constante t_r s'exprime par :

$$t_r = \frac{R.T}{2. \alpha. F} \quad (II.17)$$

α : Est le coefficient de transfert de charge, qui représente l'énergie électrique appliquée, et qui est exploitée pour modifier le taux de l'énergie électrochimique. Sa valeur dépend du matériau de l'électrode. Il est compris entre 0 et 1. Pour l'Hydrogène sa valeur est de $\alpha = 0.5$.

L'augmentation de la température T n'engendre pas une augmentation de la chute de tension. Cela est dû à l'augmentation par le même effet de la valeur de i_0 matérialisé par la réaction suivante occurrent à la cathode [54].



On en déduit, que cette densité de courant est d'autant plus grande que la surface de réaction au niveau de l'électrode est importante. Ce paramètre est très influant quant aux performances de la pile. Il est crucial de le maintenir aussi haut que possible. Après réarrangement, on obtient l'expression de *Butler-Vollmer* du courant mis en jeu donné en *relation (II.19)*.

$$i_{st} = i_0 \cdot e^{\left(\frac{2 \cdot \alpha \cdot F \cdot \Delta V_{act, cell}}{R \cdot T}\right)} \quad (\text{II.19})$$

Le *Tableau II.2* donne la valeur de i_0 obtenus pour quelques métaux utilisés comme électrodes.

Tableau II.2. i_0 pour différents métaux utilisés comme électrodes.

Métal	i_0 ($A \cdot cm^{-2}$)
<i>Pb</i>	$2.5 \cdot 10^{-13}$
<i>Zn</i>	$3 \cdot 10^{-11}$
<i>Ag</i>	$4 \cdot 10^{-7}$
<i>Ni</i>	$6 \cdot 10^{-6}$
<i>Pl</i>	$5 \cdot 10^{-4}$
<i>Pd</i>	$4 \cdot 10^{-3}$

La réduction du facteur i_0 peut se faire de plusieurs manières :

- Augmentation de la température de la pile.
- L'utilisation de catalyseurs plus efficaces.
- Augmentation de la rugosité des électrodes.
- Augmentation de concentration des réactifs.

Dans le cas d'une *PEMFC* utilisant l'air à la pression atmosphérique et à $30^\circ C$, et du *Palladium* comme électrode, on relève les grandeurs suivantes : $E = 1.2 V$, $A = 0.07$; $i_0 = 0.04 mA/cm^2$.

On obtient alors le *Tableau II.3* suivant donnant les valeurs de la tension de la pile aux abords des basses densités de courant.

Tableau II.3. Tension de Pile à basses densités de courant.

Densités de courant (mA. cm ⁻²)	Tension (V)
0	1.2
0.25	1.05
0.5	0.01
1	0.97
2	0.92
3	0.90
4	0.88
5	0.87
6	0.86
7	0.85
8	0.84
9	0.83

II.1.3. Réponse en boucle fermée

Lors d'un changement rapide de la charge, le flux d'alimentation en gaz ne suit pas à la même vitesse la demande de puissance, cela crée un déphasage ou un décalage entre la demande en courant et le flux des gaz. Cela affecte nécessairement la tension de *Nernst*, ce décalage peut être maîtrisé par une boucle de régulation du flux de gaz [17] [58].

On aboutit alors au modèle mathématique global combinant les deux régimes statique et dynamique de la pile à combustible que nous allons implémenter sous Matlab® Simulink®, suivant l'expression (II.20), les pressions de l'Hydrogène et de l'Oxygène sont régulées de manière à avoir les niveaux suivants.

$$P_{H_2} = 1.5 \text{ Atm}$$

$$P_{O_2} = 1 \text{ Atm}$$

$$V_{fc} = N_{cell} \left[E_0 + \frac{R.T}{2.F} \ln \left(P_{H_2} (P_{O_2})^{1/2} \right) - t_r \cdot \log \left(\frac{i_{st}}{i_0} \right) - R_{ohm} \cdot i_{st} - \frac{R.T}{2.F} \cdot \ln \left(\frac{P_2}{P_1} \right) \right] \quad (\text{II. 20})$$

II.2. Modélisation de la batterie

II.2.1. Les besoins énergétiques

On distingue trois types de véhicules électriques VE : Les rechargeables, Non rechargeables et hybrides. Tous ces véhicules représentent la masse des besoins énergétique dans le domaine des transports. La *Figure II.3* donne un historique et une estimation des besoins énergétiques aux États Unis sur un siècle. On y relève notamment l'évolution des besoins en énergie renouvelable [48] [59].

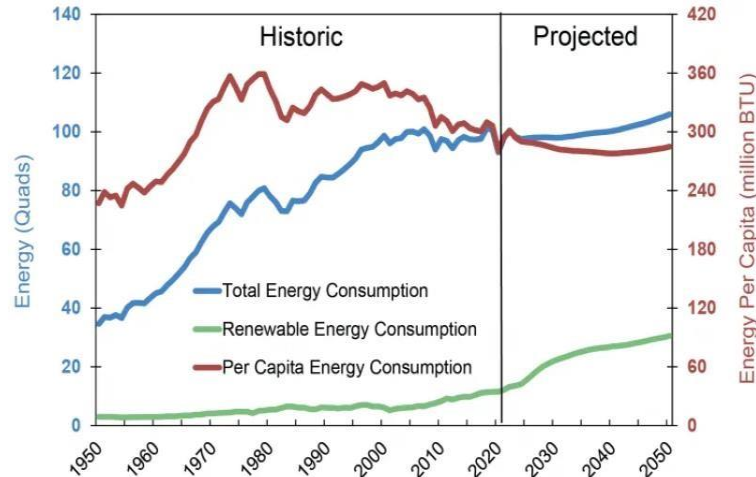


Figure II.4. Besoins Énergétique des États Unis s'échelonnant sur un siècle

II.2.2. Capacité théorique de la batterie

Théoriquement cette grandeur est déterminée par la quantité des composants actifs contenus dans la pile. Elle représente la quantité totale d'électricité générée après la réaction électrochimique, exprimée en Coulomb ou en Ampères Heures. Les tableaux d'équivalence sont donnés en ANNEXE 7. Théoriquement 1g en poids équivalent de composé va délivrer 96487 C ou 26,8 Ah. (Le gramme-équivalent poids est la masse molaire active divisée par le nombre d'électrons entrant dans la réaction). En reprenant l'exemple précédent, on obtient [61] :



$$0,82 + 0,76 \rightarrow 0,394 \quad (\text{Ah/g}) \quad (\text{II.22})$$

$$1,22 + 1,32 \rightarrow 2,54 \quad (\text{g/Ah}) \quad (\text{II.23})$$

II.2.3. Tension théorique

Pour une pile, le potentiel standard est déterminé par les matériaux utilisés. Il peut être obtenu à partir de l'expression de l'énergie ou expérimentalement. Le *Tableau 5* liste les différents potentiels d'électrodes obtenus dans des conditions standards [40] [60].

Le potentiel standard de la pile peut être calculé approximativement à partir du potentiel standard des électrodes comme suit :

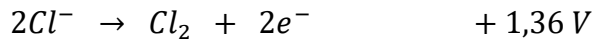
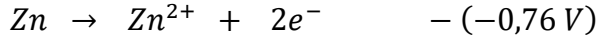
$$V_{Anode} + V_{Cathode} \cong V_{Cell} \quad (II.24)$$

Avec :

V_{Anode} : Potentiel d'Oxydation.

$V_{Cathode}$: Potentiel de Réduction.

V_{Cell} : Potentiel Standard de la Pile.



$$E_0 = 2,12 V$$

Tableau II.4. Caractéristiques pour différents Potentiels d'électrodes.

Material	Atomic or molecular weight, g	Standard reduction potential at 25°C, V	Valence change	Melting point, °C	Density, g/cm ³	Electrochemical equivalents		
						Ah/g	g/Ah	Ah/cm ³ ‡
Anode materials								
H ₂	2.01	0 -0.83†	2	—	—	26.59	0.037	
Li	6.94	-3.01	1	180	0.54	3.86	0.259	2.06
Na	23.0	-2.71	1	98	0.97	1.16	0.858	1.14
Mg	24.3	-2.38 -2.69†	2	650	1.74	2.20	0.454	3.8
Al	26.9	-1.66	3	659	2.69	2.98	0.335	8.1
Ca	40.1	-2.84 -2.35†	2	851	1.54	1.34	0.748	2.06
Fe	55.8	-0.44 -0.88†	2	1528	7.85	0.96	1.04	7.5
Zn	65.4	-0.76 -1.25†	2	419	7.14	0.82	1.22	5.8
Cd	112.4	-0.40 -0.81†	2	321	8.65	0.48	2.10	4.1
Pb	207.2	-0.13	2	327	11.34	0.26	3.87	2.9
(Li)C ₆ ⁽¹⁾	72.06	~ -2.8	1	—	2.25	0.37	2.68	0.84
MH ⁽²⁾	116.2	-0.83†	2	—	—	0.45	2.21	—
CH ₃ OH	32.04	—	6	—	—	5.02	0.20	—
Cathode materials								
O ₂	32.0	1.23 0.40†	4	—	—	3.35	0.30	
Cl ₂	71.0	1.36	2	—	—	0.756	1.32	
SO ₂	64.0	—	1	—	—	0.419	2.38	
MnO ₂	86.9	1.28‡	1	—	5.0	0.308	3.24	1.54
NiOOH	91.7	0.49†	1	—	7.4	0.292	3.42	2.16
CuCl	99.0	0.14	1	—	3.5	0.270	3.69	0.95
FeS ₂	119.9	—	4	—	—	0.89	1.12	4.35
Ag ₂ O	123.8	0.57†	2	—	7.4	0.432	2.31	3.20
Br ₂	159.8	1.07	2	—	—	0.335	2.98	
HgO	216.6	0.10†	2	—	11.1	0.247	4.05	2.74
Ag ₂ O	231.7	0.35†	2	—	7.1	0.231	4.33	1.64
PbO ₂	239.2	1.69	2	—	9.4	0.224	4.45	2.11
Li _x CoO ₂ ⁽³⁾	98	~2.7	0.5	—	—	0.137	7.29	—
I ₂	253.8	0.54	2	—	4.94	0.211	4.73	1.04

II.2.4. L'énergie théorique de la batterie

La capacité de la batterie peut également être exprimée en *Watt Heure* en considérant la tension en *Volts* et la capacité en *Ah*.

$$\text{Watts Heures (Wh)} = \text{Volts (V)} \times \text{Ampères Heures (Ah)} \quad (\text{II.25})$$

Pour l'exemple précédent, on obtiendra pour des conditions standards l'énergie spécifique suivante :

$$C_b = 2,12 \times 0,394 = 0,835 \text{ Wh/Kg} \quad (\text{II.26})$$

II.2.5. Énergie spécifique et densité d'énergie des batteries réelles

La quantité d'énergie que peut fournir une batterie dépend essentiellement de la nature et de ses constituants chimiques. La nature détermine la tension, la quantité détermine les Ampères-heures par unité de poids. En pratique, seule une fraction du poids est concernée par la réaction produisant de l'énergie. Sachant que dans le poids total de la batterie on inclut celui de tous ses constituants comme illustrés en *Figure II.4*. Le *Wh/Kg* fait référence à l'énergie spécifique, et le *Wh/L* à la densité d'énergie [40].

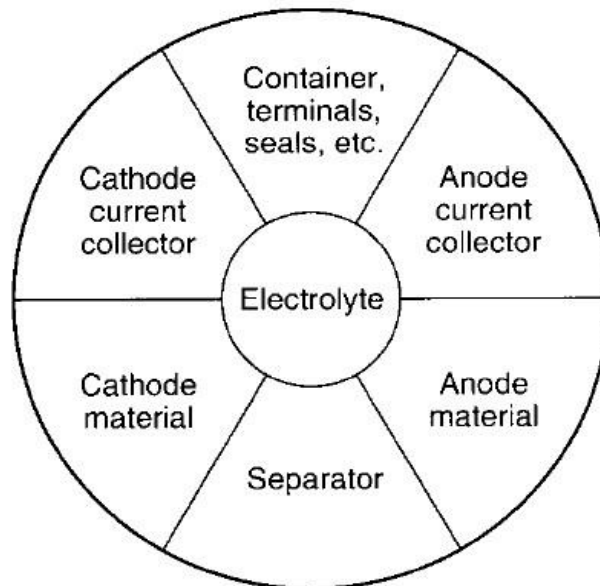


Figure II.5. Constitution de la Batterie

De manière plus schématique, la *Figures II.5* montre l'efficacité réelle des batteries primaires et rechargeables. Ne répondant pas à la loi de *Moore*, cette efficacité a atteint ses limites technologiques, l'énergie électrochimique des matériaux utilisés étant limitée.

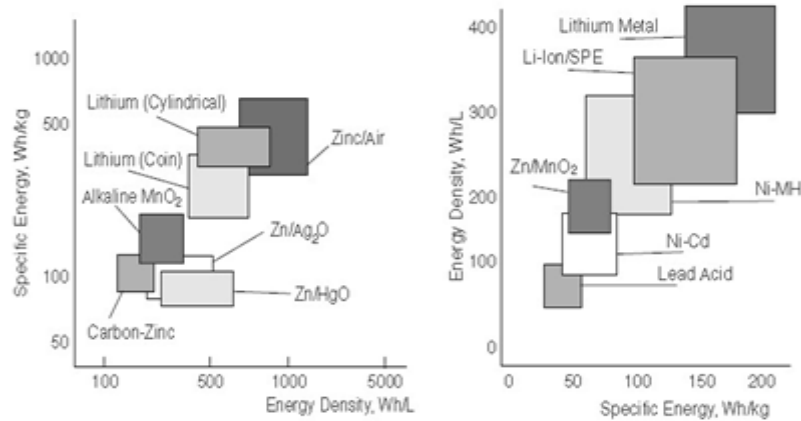


Figure II.6. Comparaison des capacités de stockage entre Batteries primaires et rechargeables.

II.2.6. Modèle mathématique

La modélisation mathématique des batteries consiste à développer des équations pour décrire leurs performances. Une modélisation simple peut prédire la capacité d'une cellule de pile en fonction du courant de décharge. Une modélisation plus complexe prend en compte la distribution spatiale du courant et de la tension expliquant ainsi les performances de la cellule à des vitesses différentes de charge en tenant compte des limitations des composants de la cellule ou des éléments qui la constituent. Ces modèles peuvent être étendus pour prendre en compte les connexions électriques entre les électrodes et les exigences tension-capacité.

Les premiers modèles mathématiques exprimaient simplement les relations empiriques entre des paramètres mesurés tels que la tension de la batterie, la résistance globale, la densité de l'électrolyte, la pression à l'intérieur de la batterie, la température de la cellule ainsi que la capacité restante dans différentes conditions de fonctionnement. Ces modèles sont toujours valables et utilisés aujourd'hui. À titre d'exemple, la relation de *Peukert* qui représente la capacité de décharge en fonction du courant de décharge *Figure II.6*, est utilisée dans différents scénarios depuis des décennies dans l'industrie des batteries plomb-Acide. Cette courbe représente l'évolution de la capacité d'une cellule en fonction du taux de décharge pour une batterie au plomb de 100 Ah sous un courant de 4,98 A avec un coefficient de *Peukert* $F=1.3$ [62] [63].

D'autres modèles plus complexes utilisent le même schéma de principe en intégrant chaque changement observé dans les performances de la cellule comme sous processus sous-jacent avec une constante de temps différente. Ces modèles analogiques sont encore utilisés dans l'industrie des batteries, car ils permettent une estimation rapide de l'état de charge *SOC* sans prendre en compte les paramètres physiques. La prise en compte des paramètres de conception tels que l'épaisseur du revêtement ou des électrodes a conduit à la formulation de modèles basés sur la physique prenant en compte l'équilibre de charge, la masse, la quantité de mouvement, et l'énergie chimique ainsi que le comportement des composants individuels internes de la cellule [40] [64].

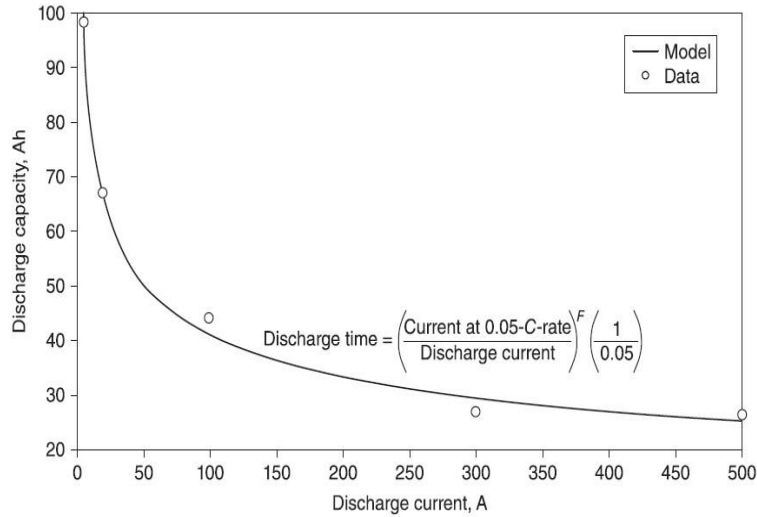


Figure II.7 : Capacité de la cellule de batterie en fonction du courant

Aujourd'hui, les paramètres de conception des batteries tels que la géométrie des électrodes et leurs natures, leurs emplacements et l'intégration de circuits électroniques dépendent de l'utilisation d'outils de conception assistés par ordinateur très avancés conduisant à des systèmes complexes rigoureux et ainsi atteindre une évolution considérable des batteries.

II.2.7. Équations mathématiques

L'objectif généralement visé est de prédire l'énergie que fournira une batterie dans des conditions spécifiées pendant une durée requise. Le développement de modèle mathématique implique la compréhension des processus physiques qui prennent siège ainsi que la façon dont les matériaux internes réagissent pendant le fonctionnement. Une approche consiste à utiliser les lois généralisées telle que la représentation de l'écoulement du courant à travers un fil de cuivre. Dans une batterie les barres omnibus qui relient les électrodes à la charge externe subissent une chute de tension suivant la loi d'Ohm donnée en *relation (II.27)* et engendrant son échauffement suivant la loi de Joule donnée en *relation (II.28)* et en particulier au niveau des joints de soudures, proportionnel au courant qui les traverse. Cela induit que les bornes corrodées réduisent d'avantage la tension de décharge [65].

$$V_{Batt} = R_{Batt} \cdot I_{Batt} \quad (II.27)$$

$$\Delta E_{Batt} = R_{Batt} \cdot I_{Batt}^2 \cdot t \quad (II.28)$$

Où ΔE représente la quantité de chaleur générée, R est la résistance de la barre omnibus, I est le courant le traversant et t, la durée de l'écoulement du courant. Les *équations (II.27)* et *(II.28)* peuvent être utilisées pour décrire adéquatement certaines observations physiques. Ces équations constituent le modèle mathématique dans cet exemple. Par conséquent, les matériaux de soudure peuvent être choisis en fonction de la quantité de chaleur calculée qui sera générée pour des

conditions de fonctionnement données. Tant que la conductivité d'un matériau donné peut être mesurée expérimentalement, les performances peuvent être modélisées avec ces équations.

En se référant à la *Figure II.7* le modèle empirique peut être développé en reliant les conditions de fonctionnement, telles que le taux de décharge ou de charge de la batterie, en considérant des quantités mesurées, telles que la température ou la tension de la batterie. Des connaissances préalables sur le comportement de la batterie ou des essais et erreurs sont utilisés pour déterminer ces expressions. L'objectif est de prédire la tension de la cellule en fonction de l'état de charge (*SOC*) de la batterie. La chute de tension à travers chacune des résistances R et R_{ct} suit la loi d'*Ohm*. Le taux d'accumulation de charge dans le condensateur C_D est égal au courant qui circule à travers le condensateur. Cela s'exprime mathématiquement comme suit :

$$I_2 = \frac{dq}{dt} \quad (\text{II. 29})$$

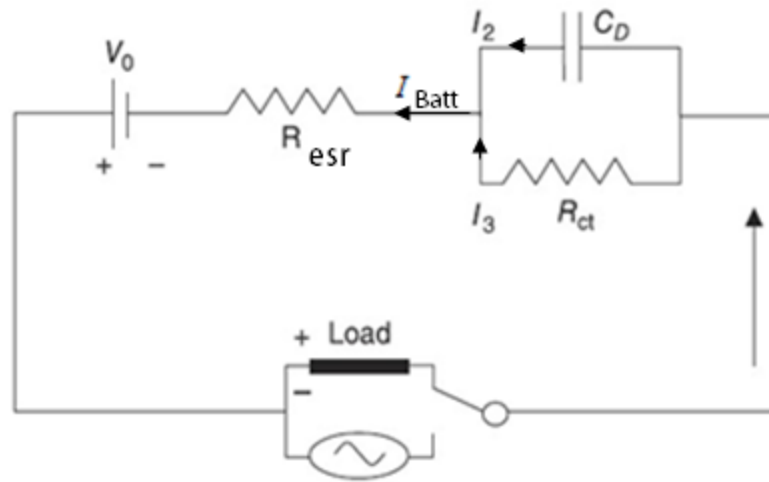


Figure II.8. Schéma électrique équivalent de la batterie.

La loi de *Kirchhoff* stipule que la tension à travers une branche est la somme de toutes les chutes de tension le long de la branche, et que la somme de tous les courants qui entrent ou sortent d'un nœud dans le circuit est nulle. Le courant total, I se divise en I_2 et I_3 comme illustré à la *Figure II.7*. Ainsi [65] [66] :

$$I_{Batt} = I_2 + I_3 \quad (\text{II. 30})$$

Les expressions des tensions à travers chaque branche sont :

$$V_{Batt} = V_0 + R_{esr_Batt} \cdot I_{Batt} + I_3 \cdot R_{ct} \quad (\text{II. 31})$$

$$V_{Batt} = V_0 + R_{esr_Batt} \cdot I_{Batt} + \frac{Q}{C_B} \quad (\text{II. 32})$$

Un réarrangement des équations (II.30) à (II.32) permet d'exprimer la chute de tension ($V_{Batt} - V_0$) en fonction de la variation du courant obtenant ainsi l'équation du modèle [40].

$$R_{esr_Batt} \frac{di_{Batt}}{dt} + \frac{1}{C_B} \left(1 + \frac{R_{esr}}{R_{ct}}\right) I_{Batt} = \frac{dV_{Batt}}{dt} + \frac{1}{R_{ct} \cdot C_B} (V_{Batt} - V_0) \quad (II.33)$$

La solution de l'équation (II.33) est de la forme :

$$V_{Batt} = \frac{Q_0}{C_B} e^{-(t/(R_{ct} \cdot C_B))} + V_0 + R_{esr_Batt} \cdot I_{Batt} + R_{ct} \cdot I_{Batt} (1 - e^{-(t/(R_{ct} \cdot C_B))}) \quad (II.34)$$

Elle exprime la tension V de la batterie en fonction du courant. Le paramètre Q_0 se réfère à la capacité totale de la batterie dont la variation peut s'exprimer par la relation (II.35). Les paramètres V_0 , R , R_{ct} et C_D peuvent être ajustés de manière à se rapprocher d'un modèle expérimental précis.

$$Q = Q_0 - \int_0^t I_{Batt} \cdot dt \quad (II.35)$$

Les Figures II.8 et II.9 donnent pour une cellule Nickel-Manganèse (*NiMh*), un comparatif entre le modèle prédictif obtenu en utilisant les équations précédemment données et les résultats issus de bancs d'essais expérimentaux. On y relève notamment la variation de la tension de la batterie en fonction de sa capacité de charge pour différents courants d'utilisation [67].

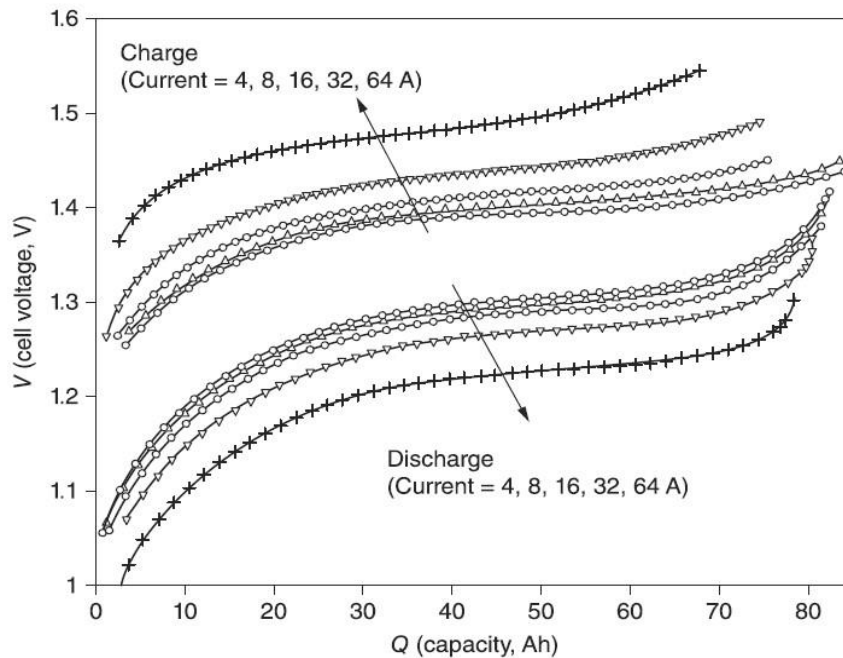


Figure II.9. Résultats obtenus en utilisant le modèle mathématique pour une cellule NiMh

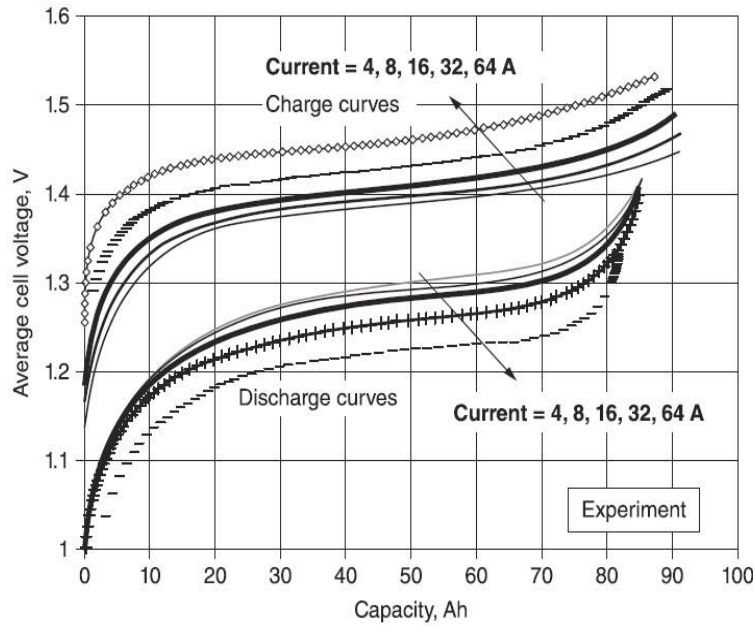


Figure II.10. Résultats obtenus sur bancs d'essais pour une cellule NiMh.

II.3. Modélisation du supercondensateur

Les *EDLCs* ont des densités de puissance élevées et un cycle de vie très long, le processus de stockage est réversible et se fait par charge électrostatique et non par réaction chimique comme dans les batteries. Ils disposent également d'une densité d'énergie supérieure à celle des condensateurs diélectriques traditionnels, ce qui constitue un avantage majeur qui suscite le grand intérêt toujours croissant que lui porte la communauté scientifique de par le monde [48] [68].

La capacitance spécifique d'un *EDLC* est donnée par l'expression (I.21).

Ce mécanisme d'accumulation de charge est le résultat de la réaction RedOx. La pseudo-capacitance théorique de l'oxyde métallique peut être exprimée comme suite.

$$C = \frac{n_e \cdot F}{M_m \cdot V} \quad (\text{II. 36})$$

Où n_e est le nombre d'électrons transféré, F la constante de Faraday, M_m est la masse molaire de l'oxyde métallique et V est la tension appliquée. La densité d'énergie et la puissance maximale que peut fournir un condensateur *EDLC* sont exprimées respectivement par les expressions (II.38) et (II.39) [69].

$$E_d = \frac{C_{dl} \cdot V^2}{2M_t} \quad (\text{II. 37})$$

$$P_{Max} = \frac{V^2}{4 \cdot M_t \cdot R_{EDLC}} \quad (\text{II. 38})$$

Où R est la résistance équivalente totale des composants et couche constituant l'*EDLC*, et m est la masse totale du composant *EDL* et électrodes [48].

Différents types de condensateurs fusionnant différents types de matériaux d'électrodes ont été développés afin d'améliorer leurs performances. Les capacitances ainsi créées sont simultanément associées dans un seul condensateur afin de produire un composant hybride combinant les propriétés Faradiques et électrostatiques de stockage de charges. Les principaux paramètres de performances recherchés sont :

- La capacitance spécifique Masse/Volume.
- La densité d'énergie et de puissance.
- Une capacité de charge rapide.
- Stabilité du cycle.

II.3.1. Modèle simplifié

Tenant compte des performances recherchées, la modélisation des *EDLCs* s'avère essentielle pour le dimensionnement d'un système cible. Plusieurs modèles de supercondensateurs sont disponibles dans la littérature. Ces modèles pour la plupart sont basés sur les caractéristiques physico-chimiques, mathématiques et électriques ainsi que le vieillissement. Un modèle électrique simple permet de décrire un comportement assez précis en termes de tension, fréquence et température du composant le rendant suffisamment approprié pour les simulations de gestion d'énergie en temps réel. Le circuit électrique équivalent conventionnel largement adopté est donc donné en *Figure II.10* [70].

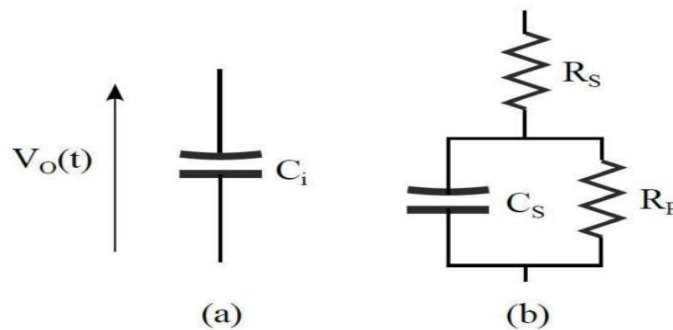


Figure II.11. Circuit électrique équivalent du supercondensateur.

Pour ce modèle, il est souhaitable de réduire la résistance équivalente série R_s et d'augmenter la capacitance C_s et la plage de tension de fonctionnement V_0 , afin d'augmenter les densités d'énergie et de puissance. La plage de tension maximale V_m atteignable pour un condensateur dépend uniquement du type d'électrolyte utilisé. Cette tension est limitée par la

stabilité thermodynamique de l'électrolyte. Pour un électrolyte aqueux, cette plage est de 1V. La recherche actuellement consiste à introduire des électrolytes d'un autre type introduisant des plages de tensions maximales plus élevées. La capacitance dans une double couche est générée par la dépendance du potentiel de la densité de surface des charges stockées électro statiquement aux interfaces des électrodes. Le diagramme de la composition principale d'un EDLC est présenté en *Figure II.11* [48] [71].

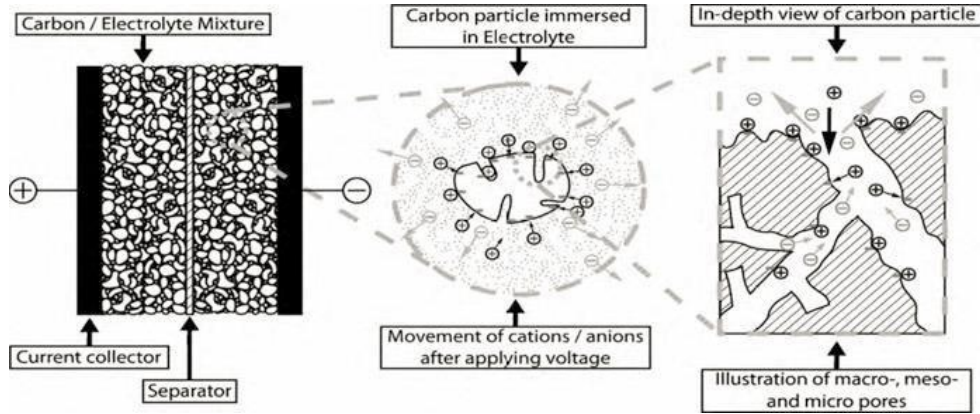


Figure II.12. Diagramme de la composition principale d'un EDLC

Les deux électrodes en matériau carboné immergées dans un électrolyte, entre une membrane séparatrice conductrice ionique mais non électrique. Le séparateur doit être hautement poreux et aussi fin que possible. Le phénomène d'auto-échauffement dû à la conduction, augmente la température du condensateur en augmentant les réactions secondaires irréversibles altérant la conductivité ionique de l'électrolyte.

Par conséquent, il est inconcevable d'établir un modèle de condensateur pour estimer son énergie, sa capacité et d'autres caractéristiques fonctionnelles sans tenir compte des variables des composants du dispositif.

II.3.2. Modèle électro-mathématique

Le modèle présenté en *Figure II.12*, est basé sur une équation intégrales différentielles. En considérant des paramètres supplémentaires tels que le cycle de vie, la capacité, la tension, le temps, la température et l'humidité et la résistance série. L'équations exprimant la tension aux bornes du supercondensateur est donnée par la *relation (II.41)* [72-74].

$$V_{EDLC} = i_{EDLC} R_{esr} + V_{sc} = i_{EDLC} R_{esr} + \frac{i_{EDLC}}{C_{dl}} t \quad (\text{II. 39})$$

Où:

- V_{EDLC} : la tension aux bornes de l'EDLC.
- i_{EDLC} : le courant traversant le supercondensateur.
- R_{esr}, C_{dl} : la résistances série / et la capacitance de l'EDLC.
- t : temps exprimé en seconde.

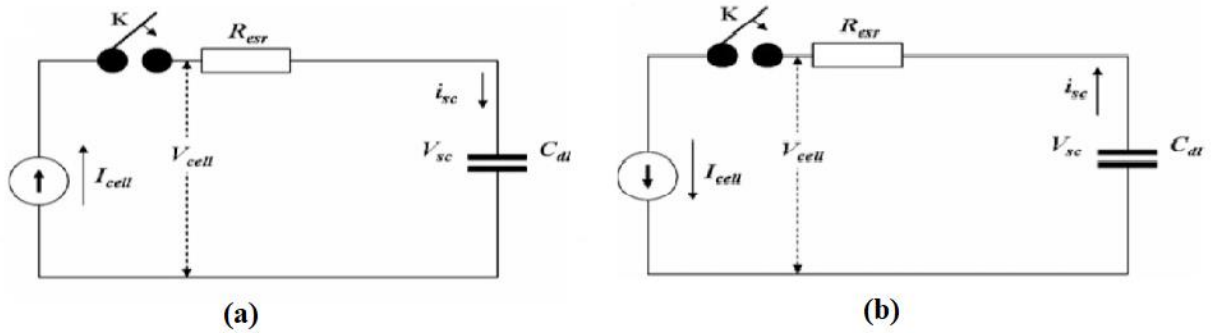


Figure II.13. Schéma équivalent d'un EDLC

En considérant les effets de vieillissement du supercondensateur on écrira :

$$C_{dl} = C_{dl}^0 \cdot C_{Cycle_vie} \tag{II. 40}$$

Les paramètres C_{dl}^0 et C_{cycl_vie} traduisent respectivement la capacitance théorique ou mesurée à la fabrication, et le vieillissement qui décroît avec le temps et dépend grandement des paramètres tels que la température, la tension et l'humidité. On prendra pour exemple que la durée de vie d'un supercondensateur est doublée pour chaque réduction de 10°C de température, cette règle utilise l'équation d'Arrhenius pour la dépendance de la température des taux de réaction [75].

En prenant en compte tous ces paramètres l'expression du cycle de vie devient alors :

$$C_{Cycle_vie}(\%) = 100 - \alpha_{cdl} \left(\frac{T - T_{ref}}{10} \right) \cdot \sqrt{N_{Cycle}} \cdot \frac{V_S - V_c}{V} \cdot H_S \tag{II. 41}$$

Où:

- α_{cdl} : facteur d'accélération ($\alpha = 2$) pour ce type d'application.
- T, T_{ref} : températures respectivement de fonctionnement et de référence (298 K) exprimées en Kelvin. N_{Cycle} , le nombre de cycles.
- V_S, V_c : tensions de services et de charge du composant.
- H_S : taux d'humidité de service.

La résistance série équivalente du supercondensateur est aussi fonction de son volume elle est inversement proportionnelle à la température de fonctionnement du composant. Elle s'exprime par :

$$R_{esr} = b_1 \cdot R_{esr_0} \cdot (1 + \gamma (T - T_{ref})) + b_2 \cdot R_{esr_0} \cdot e^{\left(\frac{-K_t}{2}\right)(T - T_{ref})} \quad (\text{II. 42})$$

Où:

- $\gamma = 0.007 K^{-1}$: Coefficient de température pour l'agrégat Aluminium – Carbon.
- $K_t = 0.045 K^{-1}$: est l'énergie d'activation ionique du même agrégat.
- b_1, b_2 : sont respectivement facteur de masse électronique et ionique dépendant du volume du supercondensateur.
- R_{esr_0} : la résistance théorique du composant.

II.4. Modélisation du groupe convertisseurs

II.4.1. Introduction

Les convertisseurs de l'électronique de puissance sont utilisés pour la conversion, le control et la gestion de l'énergie. Ce sont des dispositifs fondamentaux utilisés dans de nombreuses applications électriques, les systèmes de transmissions et de distribution et de conversion d'énergie.

La modélisation des convertisseurs de l'électronique de puissance est une étape essentielle pour une conception et une analyse optimale. Elle consiste à développer des modèles mathématiques afin de décrire le comportement et les caractéristiques électriques de ces dispositifs. Ces modèles permettent de simuler et de prédire leurs fonctionnements et d'analyser leurs performances dans le but de concevoir des stratégies de commandes et les intégrer dans des systèmes plus larges [76].

Les modèles de convertisseurs de l'électronique de puissance, sont de natures différentes et variées, allant de modèles simples basés sur des équations électriques fondamentales aux modèles plus complexes basés sur des techniques de modélisations avancées telles que les modélisations par commutations ou par vecteurs d'espace ou encore par modélisation des perturbations. Ces techniques prennent en compte les caractéristiques des composants électroniques utilisés ainsi que les interactions électromagnétiques et les contraintes thermiques [77].

La modélisation des convertisseurs de l'électronique de puissance permet également leurs optimisations en testant différentes configurations et stratégies de commandes et d'identifier les points de fonctionnement optimaux, afin de garantir un rôle crucial dans le développement de technologies énergétiques efficaces, durables et innovantes. Les convertisseurs de l'électronique de puissance sont variés par l'architecture, le but, la puissance ou l'objectif à atteindre. Les plus rencontrés sont les convertisseurs abaisseurs de tension (Buck), élévateur de tension (Boost). Nous

allons présenter dans ce qui suit une modélisation par équations électriques de chaque modèle [78].

II.4.2. Modélisation du convertisseur buck

Les convertisseurs Buck sont une topologie largement utilisée dans la conversion d'énergie notamment dans les systèmes photovoltaïques, ou le control des moteurs à courant continu. Ils sont chargés d'abaisser la tension d'alimentation et de l'adapter en fonction des besoins de la charge. L'intérêt grandissant qu'ils suscitent provient de leurs efficacités et leurs flexibilités [79] [80].

Les caractéristiques de commutations des convertisseurs Buck introduisent des défis considérables quant au transfert de l'énergie. Le modèle à structure simple et économique présenté en *Figure II.13* est de loin le plus largement utilisée dans l'industrie. Il représente une méthode de modélisation suffisamment performante afin de déterminer et dimensionner les différents composants du convertisseur. Dans la suite de la modélisation, la charge type est une résistance pure associée à un condensateur de filtrage. Une inductance, confère à l'ensemble le caractère de source de courant. Le principe de fonctionnement d'un tel convertisseur est d'assurer en continu la fluence d'énergie entre une source de tension et une autre source de courant. On cherchera dans ce qui suit à fixer une tension moyenne $\langle U_s \rangle$ aux bornes de la charge ; cette tension aura les critères suivants [81-84]:

$$0 \leq \langle U_s \rangle \leq U_e$$

$\langle U_s \rangle$: Réglable à souhait dans l'intervalle donné.

La cellule de commutation sera constituée d'interrupteurs électroniques de telle sorte que :

$0 \leq t \leq \alpha T_s$: Q_T : passant et Q_D : bloquée. Les conditions de fonctionnement sont :

$$\begin{cases} V_s = V_e & \text{avec} & V_D = -V_e \\ I_e = I_s & \text{avec} & I_Q = I_e \end{cases} \quad (\text{II. 43})$$

$\alpha T_s \leq t \leq T_s$: Q_T : bloqué et Q_D : passante. Les conditions de fonctionnement sont :

$$\begin{cases} V_s = 0 & \text{avec} & V_Q = V_e \\ I_e = 0 & \text{avec} & I_D = I_s \end{cases} \quad (\text{II. 44})$$

Globalement sur toute la durée de la période on aura donc :

$$\begin{cases} V_Q - V_D = V_e \\ I_Q + I_D = I_s \end{cases} \quad (\text{II. 45})$$

Au regard du fonctionnement de la cellule (Q_T, Q_D) , on déduit que le blocage commandé de Q , entraîne l'amorçage spontané de Q_D . cela met en évidence un point important : la nature de la commutation. La tension ainsi obtenue à la sortie sera caractérisée par :

- Une valeur moyenne.
- Une onde fondamentale de fréquence identique à celle de commutation des interrupteurs.
- Des harmoniques de fréquence multiples à celle de l'onde fondamentale.

Dans le cadre de l'étude de fonctionnement du dispositif, on posera les hypothèses suivantes :

- La période de résonance du filtre de sortie $L.C$ est largement supérieure à celle de commutation des interrupteurs Q_T et Q_D .
- L'ondulation de la tension U_s est négligeable devant sa composante continue.

On considèrera le cas où la commutation est continue sur toute la période [84].

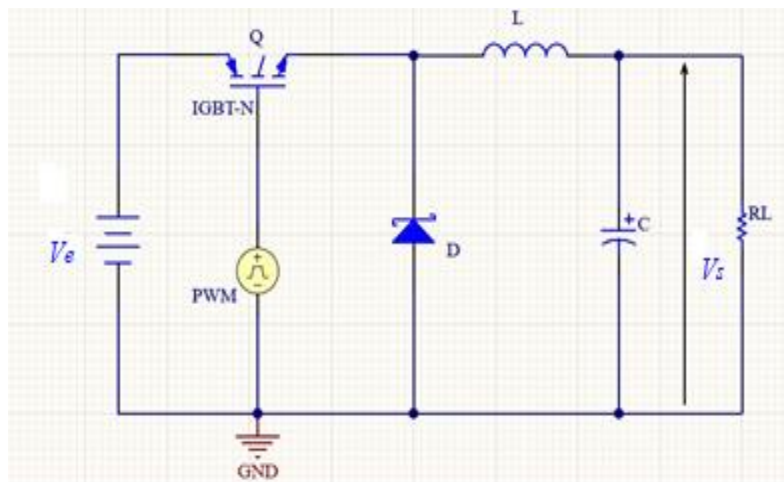


Figure II.14. Schéma Électrique du convertisseur Buck.

L'interrupteur Q_T est donc typiquement un transistor IGBT ou MOSFET ; il peut être également un Thyristor (GTO). On notera que ce dernier introduit une circuiterie plus complexe pour le blocage et donc sujet à de nombreux phénomènes perturbateurs [83] [84].

Pour obtenir l'équation différentielle décrivant la dynamique de ce convertisseur, on utilisera la loi de *Kirchhoff* appliquée au circuit de la *Figure II.13*, à travers les différents instants de conduction [85] [86].

Durant $t_{on} : (0 < t < D.T_s)$; Q_T : ON et Q_D : Off avec $D = t_{on} / T_s$.

$$V_e(t) = V_e = V_R + v_L(t) \quad \text{avec} \quad v_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} \quad (\text{II. 46})$$

Durant $t_{off} : (D.T_s < t < T_s)$; Q : Off et D : ON ;

$$\begin{cases} V_D(t) \approx 0 \\ i_D(t) = i_L(t) \end{cases}, \quad \begin{cases} i_e(t) = 0 \\ V_R + V_L(t) = 0 \end{cases} \quad (\text{II. 47})$$

Équations différentielles

Durant t_{on} :

$$V_e(t) = V_s(t) + L \frac{di_L(t)}{dt} \quad (\text{II. 48})$$

La solution de l'équation est :

$$I_L(t) = \frac{V_e - V_s(t)}{L} t + i_L(0) \quad (\text{II. 49})$$

Avec : $i_L(0) = I_{min}$

Durant t_{off} :

$$V_s(t) + L \frac{di_L(t)}{dt} = 0 \quad (\text{II. 50})$$

La solution de l'équation est :

$$i_L(t) = \frac{-V_s(t)}{L} (t - D.T_s) + i_L(DT_s) \quad (\text{II. 51})$$

Avec :

$$i_L(DT_s) = I_{max} = \frac{V_e(t) - V_s(t)}{L} D.T_s + I_{min} \quad (\text{II. 52})$$

Valeur moyenne de la tension de sortie est :

$$V_s = \frac{1}{T} \int_0^{D.T_s} V_e(t) \cdot dt + \frac{1}{T} \int_{D.T_s}^{T_s} V_e(t) \cdot dt = D.V_e \quad (\text{II. 53})$$

Avec :

$$I_s = \frac{1}{T_s \cdot R_c} \int_0^{T_s} V_e(t) \cdot dt = \frac{D.V_e}{R_s} = \frac{I_{max} + I_{min}}{2} \quad (\text{II. 54})$$

Ondulation du Courant de sortie

Durant t_{on} :

$$V_e - V_s = L \frac{\Delta i_s}{D.T_s} = V_e(1 - D) \geq 0 \quad (\text{II. 55})$$

Le courant croit et augmente à travers l'inductance L .

Durant t_{off} :

$$-V_s = L \frac{\Delta i_s}{D \cdot T_s} \leq 0 \quad (\text{II. 56})$$

Le courant décroît à travers l'inductance L .

$$-V_e(1 - D) = L \frac{\Delta i_s}{D \cdot T_s} \leq 0 \quad (\text{II. 57})$$

La *Figure II.14* illustre l'allure de l'ondulation du courant donné à travers l'inductance L qui s'exprime alors par [87] [88]:

$$\Delta i_s = I_{max} - I_{min} = \frac{V_e}{L \cdot f_s} (1 - D)D \quad (\text{II. 58})$$

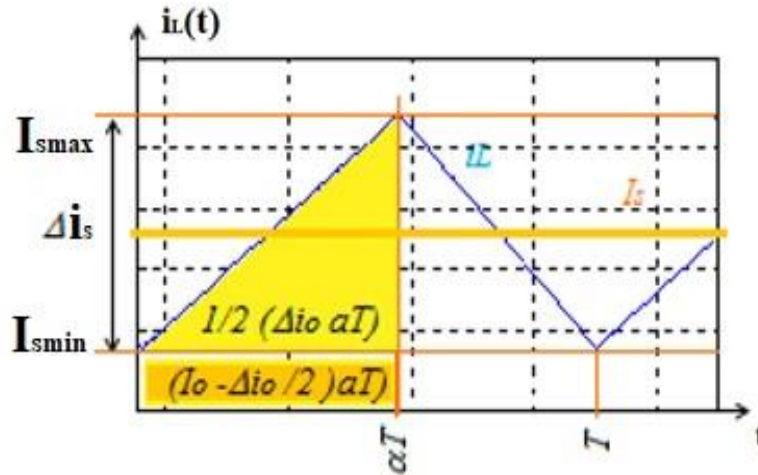


Figure II.15. Allure du courant à travers l'inductance L .

II.4.2.1. Ondulation de la tension de sortie

Le courant à travers le condensateur C de sortie est :

$$i_c(t) = C \frac{dV_c}{dt} = C \frac{dV_s(t)}{dt} \quad (\text{II. 59})$$

En supposant que la fréquence de hachage est suffisamment grande, on dira que le courant est assimilé à des portions de droites. Tandis que la tension de charge du condensateur est de forme hyperbolique [89] [90].

$$V_s(t) = \frac{1}{C} \int_0^{T_s} i_c(t) \cdot dt \quad (\text{II. 60})$$

$V_{s\min}$ et $V_{s\max}$ sont respectivement les tensions de sortie aux instants $\frac{D.T_s}{2}$ et $\frac{(1+D)T_s}{2}$.

L'ondulation de la tension illustrée par la *Figure (II.15)* peut être calculée par.

$$\Delta V_s = \frac{1}{C} \int_{D.T_s/2}^{(1+D)T_s/2} i_c(t). dt \quad (\text{II. 61})$$

$$\Delta V_s = \frac{1}{C} \left[\frac{D.T_s}{8} \Delta I_s + \frac{(1-D)T_s}{8} \Delta I_s \right] \quad (\text{II. 62})$$

$$\Delta V_s = \frac{1}{8.C.f_s} \Delta I_s \quad (\text{II. 63})$$

En remplaçant ΔI_s donnée en II.61, on obtient :

$$\Delta V_s = \frac{V_e(1-D)D}{8.L.C.f_s^2} \quad (\text{II. 64})$$

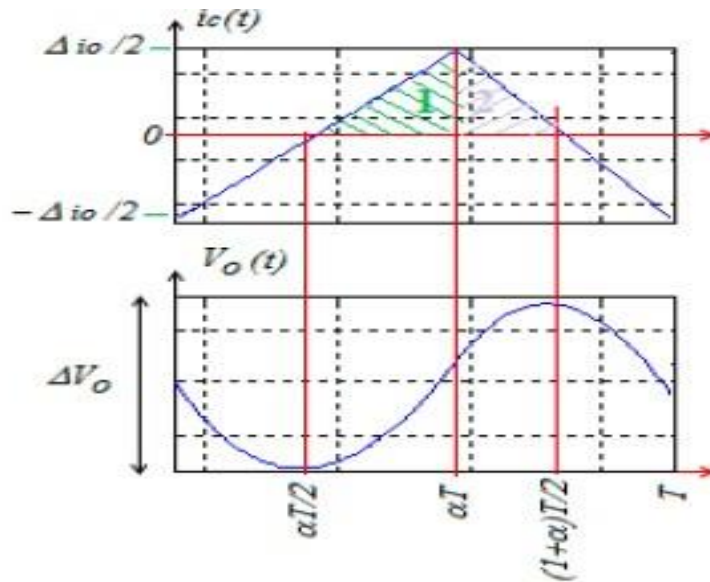


Figure II.16. Ondulation de la tension et du courant aux bornes du condensateur de sortie.

II.4.2.2. Calcul du filtre de sortie

Après réarrangement de l'expression (II.67) on obtient la relation (II.68) à l'origine de la *Figure II.13* qui illustre la variation de ΔI_s en fonction de D et donne un extremum local pour $D=0,5$.

$$\frac{\Delta I_s}{V_e} . L.f_s = (1-D)D \quad (\text{II. 65})$$

Ce point d'inflexion marque la limite de la conduction continue pour une inductance et une capacité minimale L_{\min} et C_{\min} . Le filtre $L_{\min} C_{\min}$ (L et C) de sortie peut être calculé en utilisant les expressions données respectivement par les relations (II.69) et (II.70). On notera que les courbes que décrivent ces équations atteignent leurs crêtes pour $\alpha = 0,5$ on aboutira alors aux valeurs minimales conseillées suivantes [87] [91].

$$L_{\min} = \frac{V_e}{\Delta I_s \cdot f_s} (0,5)^2 \quad (II.66)$$

$$C_{\min} = \frac{V_e}{\Delta V_s \cdot 8 \cdot L \cdot f_s^2} (0,5)^2 \quad (II.67)$$

II.4.2.3. Modélisation du convertisseur boost

Le principe de fonctionnement de ce type de convertisseur est d'assurer la fluence d'énergie entre une source de courant et une source de tension comme présenté en *Figure II.16* [92].

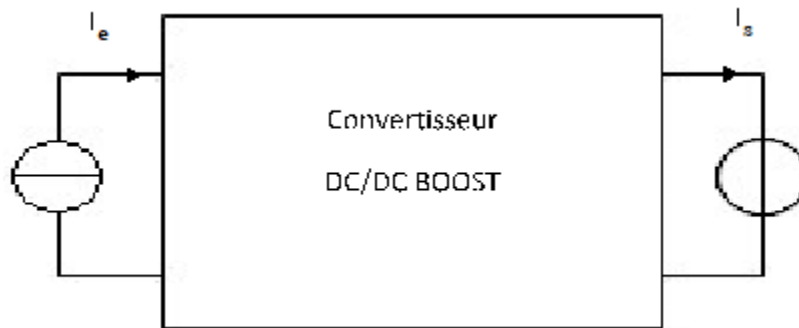


Figure II.17. Convertisseur Boost.

Le dispositif communément utilisé est celui montré en *Figure II.17*. La cellule de commutation est constituée du couple (Q, D). Dans le cadre de l'étude du fonctionnement du dispositif, nous poserons les hypothèses de travail suivantes [93] :

On cherchera à travers ce type de convertisseurs de fixer une tension de sortie $\langle V_s \rangle$ tel que :

- $\langle V_s \rangle > V_e$
- $\langle V_s \rangle$: réglable à souhait dans l'intervalle donné.
- La fréquence de commutation des interrupteurs est largement supérieure à celle du signal.
- L'ondulation du courant de sortie est négligeable devant sa valeur moyenne.
- L'ondulation de la tension V_s est également négligeable devant sa valeur moyenne.
- En régime permanent la valeurs moyenne du courant dans le condensateur est nulle.

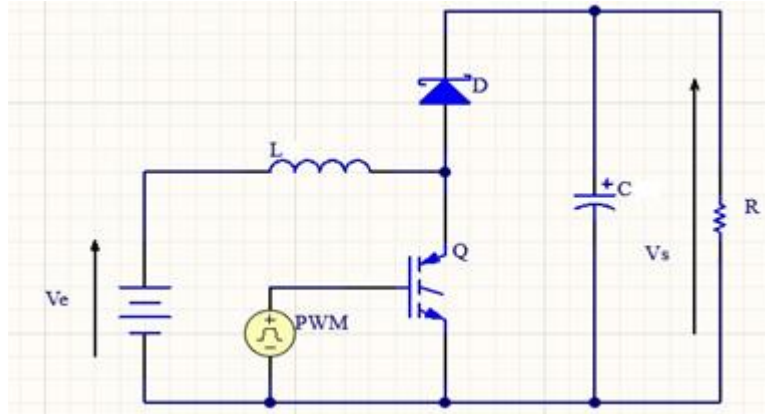


Figure II.18. Convertisseur Boost – Circuit Général.

On définit alors le coefficient D comme étant le rapport cyclique de conduction entre la durée d’amorçage et celle du blocage du transistor Q_T [94] [95].

Durant $D.T_s$: $V_L = V_e$.

Durant $(1-D)T_s$: $V_L = V_e - V_s$.

II.4.2.4. L’ondulation de la tension de sortie.

La valeur moyenne de V_L est :

$$V_L = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} V_e(t) \cdot dt \tag{II. 68}$$

$$V_L = \frac{1}{T_s} \int_0^{D.T_s} V_e(t) \cdot dt + \frac{1}{T_s} \int_{D.T_s}^{T_s} (V_e(t) - V_s(t)) \cdot dt \tag{II. 69}$$

En régime permanent la tension moyenne aux bornes de l’inductance est nulle ; on aboutira à l’expression (II.73), qui illustre le caractère élévateur du convertisseur.

$$V_s = V_e \frac{1}{1 - D} \tag{II. 70}$$

Le courant à travers le condensateur de sortie C est :

$$I_c = C \frac{dV_c(t)}{dt} \tag{II. 71}$$

La tension aux bornes du condensateur varie linéairement et vaut :

$$V_c = \Delta V_s = \frac{1}{C} \int_0^{(1-D)T_s} (I_e(t) - I_s(t)) \cdot dt \tag{II. 72}$$

$$\Delta V_s \frac{V_e}{C \cdot R_c \cdot f_s} \cdot \frac{D}{1-D} \quad (\text{II. 73})$$

Où ΔV_s représente l'amplitude des ondulations de la tension aux bornes de la charge. Elle est directement liée à la quantité $\frac{D}{1-D}$. L'ondulation de la tension de sortie est d'autant plus petite que le rapport cyclique est petit [96-100].

II.4.2.5. L'ondulation du courant de source

Compte tenu des hypothèses de travail adoptées, les variations du courant I_e sont linéaires.

$0 \leq t \leq DT_s$: Q_T : passant et Q_D : bloquée $V_L = V_e$. Le courant augmente à travers L .

$DT_s \leq t \leq T_s$: Q_T : bloqué et Q_D : passante. La tension aux bornes de L vaut $V_e - V_s$ et est négative du fait du survoltage (convertisseur Boost). Cela correspond à une décroissance du courant à travers L . Durant cet intervalle l'ondulation du courant s'exprime alors [101]:

$$\Delta I_e = \frac{V_s}{L \cdot f_s} (1-D)D \quad (\text{II. 74})$$

Cette ondulation est d'autant plus faible que l'inductance est grande ou la fréquence est élevée. Le régime de conduction discontinu est obtenu pour la condition suivante.

$$I_e = \frac{1}{2} \Delta I_e \quad (\text{II. 75})$$

On peut alors déduire la valeur minimale pour chaque composant utilisé en fonction du régime de fonctionnement choisi [100] [102-104].

II.5. Conclusion

Nous avons abordé en détail dans ce chapitre la modélisation des technologies clés utilisées dans les systèmes d'énergie avancés tels que les piles à combustible PEMFC, les batteries, les supercondensateurs et les convertisseurs statiques de l'électronique de puissance. Nous avons examiné les principes de fonctionnement de chaque composant, ainsi que leurs caractéristiques et leurs performances dans le but de réaliser une gestion d'énergie suffisamment précise afin d'assurer la fluence d'énergie en continu vers le système de traction.

Ce chapitre présente une vue d'ensemble aussi complète et approfondie que possible de la modélisation du système d'alimentation hybride qui aura la charge de fournir toute l'énergie nécessaire au système de traction d'un véhicule électrique. La compréhension de ces modèles est essentielle pour concevoir, optimiser et contrôler les systèmes d'énergie avancés. Dans le chapitre suivant nous allons aborder les différentes technologies de gestion d'énergie des véhicules électriques.

Chapitre III

Gestion de l'énergie dans les systèmes multi-sources

III.1. Introduction

Identifiés comme solutions prometteuses, pour améliorer l'économie de carburant et réduire le taux des émissions de gaz à effets de serre, le véhicule électrique est globalement défini comme étant un véhicule dont la propulsion est électrique. De nombreux indicateurs influencent les performances de ces véhicules, tels que le type de motopropulseurs, la configuration des composants, et la stratégie de gestion adoptée. Les véhicules à pile à combustible présentent une alternative plus intéressante en termes de disponibilité énergétique et d'impact carbone ; cette technologie est encore au stade expérimental en raison du ravitaillement en hydrogène qui suscite des préoccupations majeures [105]. Afin d'augmenter la fiabilité, la robustesse et l'endurance de ces véhicules l'approche consiste à multiplier et diversifier les sources embarquées à bord du véhicule. Cela implique une gestion d'énergie innovante et plus complexe établie en fonction des besoins énergétiques du groupe motopropulseur. Dans ce chapitre nous allons présenter les différentes techniques utilisées dans la gestion d'énergie à bord d'un véhicule électrique [106].

III.2. Les besoins énergétiques

La croissance du parc mobile d'ici 2050 est estimée à 3 Milliards de véhicules sur la planète, avec un nombre d'habitant qui avoisinera les 10 Milliards d'âmes. D'où viendra le combustible nécessaire ? et que deviendra le taux d'émission de gaz à effets de serre ? Si une partie ou la totalité de ce parc roulant devient électrique, alors les sources d'approvisionnement diverses déjà existantes suffiraient-elles pleinement à le satisfaire. Du point de vue exploitation, les véhicules électriques offrent une option plus sûre, globale, équilibrée, efficace, et respectueuse de l'environnement [105].

Le problème majeur auquel nous sommes confrontés est bien entendu le coût du véhicule et son autonomie. Celui de l'autonomie est relativement pallié aujourd'hui grâce aux avancées dans le développement de batteries telles que les batteries *Nickel-Metal-Hydrure (NiMH)*, *ZincAir*, (*Zn/Air*), ou *Lithium-ion (Li-Ion)*. Cependant étant donné que l'énergie spécifique et la densité d'énergie des batteries est bien inférieures à celles des hydrocarbures, le développement des sources tierces comme la pile à combustible s'est accéléré. L'hybridation prend alors un essor considérable touchant les véhicules utilitaires et de transports en commun. Le concept moderne de véhicule électrique est non seulement un moyen de transport propre mais aussi tout un arsenal d'équipements modernes, numériques pour le bien-être et la sécurité. Il constituera un système de transport propre et efficace, à condition qu'il soit accompagné d'une éducation et d'une pédagogie en réponse aux attentes des utilisateurs [105] [106].

Du point de vue de l'ingénierie, le véhicule électrique est une harmonie entre l'ingénierie automobile et électrique. La différence des caractéristiques des deux propulsions entraîne une approche novatrice. Ainsi l'optimisation des systèmes est une considération primordiale en vue de bonnes performances en termes de coût et d'efficacité. Atteindre le succès pour les véhicules électriques sur le marché, introduit plusieurs facteurs clés qui doivent être pris en considération [107] :

a) Autonomie

Le véhicule électrique doit offrir une autonomie suffisante pour réduire l'anxiété des utilisateurs et améliorer son acceptation.

b) Bornes de recharge

Le réseau de recharge doit impérativement se développer en quantité et en qualité.

c) Coût

Le coût est un facteur déterminant pour une démocratisation réussie.

d) Performance

Les performances de ces véhicules doivent être intéressantes et comparable à celles des véhicules à hydrocarbures, en termes de vitesse, maniabilité, accélération et sécurité.

e) Durée de vie des équipements

À l'instar des batteries, les équipements à bord des véhicules électriques doivent répondre aux standards de qualité et de sécurité et conformes à la réglementation en vigueur.

f) Sensibilisation et éducation

Des programmes d'incitation et de favorisation de ce type de véhicule doivent être menées par les pouvoirs publics pour encourager l'adoption et l'acceptation de ce nouveau mode de transport.

g) Poids et carrosserie

Le design des véhicules électriques doit prendre en compte le poids et l'aérodynamique du véhicule augmentant ainsi son autonomie et sa capacité à gravir des pentes, sa vitesse et son accélération et réduire sa résistance au roulement.

h) Gestion de l'énergie

Une gestion efficace de l'énergie doit être mise au point afin de maximiser et d'optimiser les ressources embarquées. Cela est grandement avantage par les équipements électroniques et informatiques d'accompagnement tels que les différents capteurs, et les calculateurs. Cela comprend :

- L'optimisation du flux d'énergie du système.
- Prédiction de l'énergie disponible restante donc de l'autonomie résiduelle.
- Comportement plus efficace à la conduite.
- Récupération de l'énergie régénérative lors du freinage.
- Régulation de la température en fonction du climat extérieur.
- Ajustement de la luminosité des feux en fonction de l'éclairage extérieur.
- Algorithme de charge des batteries adaptatif.
- Analyse historique des opérations.
- Diagnostic préalable de tout dysfonctionnement possible.

- Possibilité de couplage avec des systèmes de navigations afin de planifier des éco itinéraires ou la localisation des sites tels que les bornes de charge.

Toutes ces considérations liées essentiellement à la gestion d'énergie, résument l'interaction entre différents sous-systèmes affectant grandement les performances des véhicules électriques. Le choix d'un modèle de gestion d'énergie par rapport à un autre est lié à la complexité des objectifs visés et souvent contradictoire à son utilité. Il est alors nécessaire de trouver un équilibre entre précision, complexité et utilisabilité de l'ensemble de ces sous-systèmes. Cet équilibre impératif devient possible grâce au développement de technologies innovantes basées sur une gestion d'énergie efficace en fonction des besoins du moteur de traction [108].

La *Figure III.1* illustre le processus de conception du système pour parvenir à un groupe motopropulseur économe en énergie. Ou une topologie du groupe motopropulseur doit d'abord être sélectionnée. La deuxième étape consiste à déterminer la technologie et la dimension de la source d'énergie qu'elle soit unique ou multiple, pour enfin choisir la gamme et le type de convertisseurs qui seront mis en place [108].

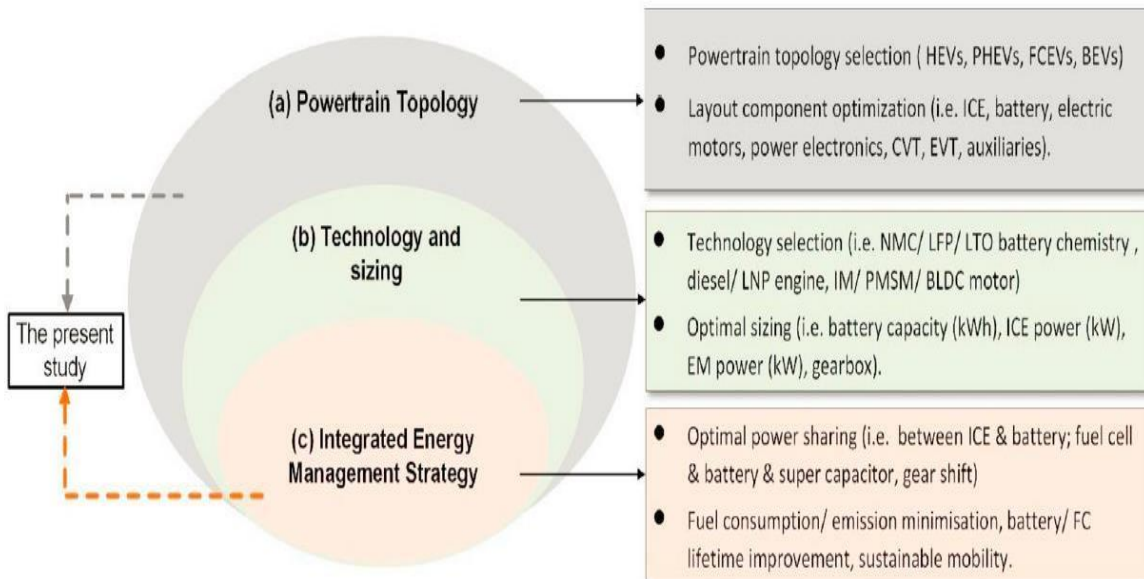


Figure III.1. Processus de conception d'un système d'énergie efficace.

Cette méthode a l'inconvénient d'être généraliste car elle ne prend en considération ni la carrosserie du véhicule ni sa forme. Elle débouche sur des modèles standards n'offrant qu'un choix réduit aux consommateurs. Cela tombe à contre sens des considérations suscitées [109] [110]. Il est vrai que l'optimisation de la stratégie de gestion d'énergie doit être couplée avec le choix des convertisseurs utilisés. Ce choix est fixé par le type de véhicule lui-même. *Le Tableau III.1*, présente les caractéristiques des trois principaux types de véhicules rencontrés [40] [111].

Tableau III.1. Caractéristiques des trois principaux types de véhicules électriques existants.

Types of EVs	Battery EVs	Hybrid EVs	Fuel Cell EVs
Propulsion	<ul style="list-style-type: none"> • Electric motor drives 	<ul style="list-style-type: none"> • Electric motor drives • Internal combustion engines 	<ul style="list-style-type: none"> • Electric motor drives
Energy system	<ul style="list-style-type: none"> • Battery • Ultracapacitor 	<ul style="list-style-type: none"> • Battery • Ultracapacitor • ICE generating unit 	<ul style="list-style-type: none"> • Fuel cells
Energy source & infrastructure	<ul style="list-style-type: none"> • Electric grid charging facilities 	<ul style="list-style-type: none"> • Gasoline stations • Electric grid charging facilities (optional) 	<ul style="list-style-type: none"> • Hydrogen • Methanol or gasoline • Ethanol
Characteristics	<ul style="list-style-type: none"> • Zero emission • Independence on crude oils • 100-200 km short range • High initial cost • Commercially available 	<ul style="list-style-type: none"> • Very low emission • Long driving range • Dependence on crude oils • Complex • Commercially available 	<ul style="list-style-type: none"> • Zero emission or ultra low emission • High energy efficiency • Independence on crude oils • Satisfied driving range • High cost now • Under development
Major issues	<ul style="list-style-type: none"> • Battery and battery management • High performance propulsion • Charging facilities 	<ul style="list-style-type: none"> • Managing multiple energy sources • Dependent on driving cycle • Battery sizing and management 	<ul style="list-style-type: none"> • Fuel cell cost • Fuel processor • Fueling system

Les EMS ou Système de Gestion d'Énergie, pour les véhicules hybrides utilisent des stratégies de contrôle basées sur des règles d'optimisation pour maximiser l'efficacité globale du groupe motopropulseur. Pour les configurations hybrides puissantes, différentes stratégies de contrôle sont utilisées en fonction de l'architecture. Les stratégies de contrôle couramment utilisées incluent la programmation dynamique, la stratégie de minimisation de la consommation équivalente, le contrôle optimal flou et diverses méthodes d'optimisation telles que les algorithmes génétiques et l'optimisation par essaim de particules. Les configurations série-parallèle sont encore plus complexes en raison de l'introduction de modes de fonctionnement multiples à l'aide d'un embrayage et de boîtes de vitesses planétaires [112]. Pour ces configurations, des algorithmes de contrôle prédictif basés sur des modèles déterminés sont utilisés pour optimiser les performances du groupe motopropulseur. Les architectures des véhicules hybrides rechargeables sont similaires à celles des hybrides puissants, à l'exception de leur autonomie électrique accrue. Les EMS des véhicules hybrides rechargeables tirent parti de cette autonomie accrue en adaptant le fonctionnement des composants du groupe motopropulseur selon les modes de décharge de la batterie et de maintien de charge, ou en combinant les deux modes. L'EMS est donc un système de protection, d'estimation et de contrôle d'un ESS (*Energy Storage System*), visant à garantir un fonctionnement sûr et performant sur le long terme [113]. Les packs ESS destinés aux véhicules électriques comportent des centaines voire des milliers de cellules. Pour simplifier l'agencement, les packs sont divisés en modules. Les modules gèrent la fonctionnalité de l'EMS au niveau de la cellule et fournissent une abstraction pour un contrôle de supervision. Les communications sont généralement mises en œuvre à l'aide d'un système de bus de terrain, tel que le *Controller Area Network (CAN)*, utilisé dans l'automobile. Les *HESS (Hybrid ESS)*, sont dotés de convertisseurs électroniques de puissances et présentent une topologie plus complexe par rapport à un pack de

batterie ou d'UC. La batterie et le sous-système UC sont généralement bien séparés et peuvent être traités individuellement par le système de gestion de batterie (BMS) [114].

III.3. Système de stockage d'énergie

Le système de stockage d'énergie représente la source principale d'énergie. Généralement, il est constitué d'un pack de batteries montées dans une configuration série/parallèle de manière à obtenir une tension et un courant nominaux nécessaires au bon fonctionnement du motopropulseur. La *Figure III.2* montre plusieurs configurations utilisées et documentées dans la littérature scientifique présentant chacune des avantages et des inconvénients en fonction des objectifs tracés [115].

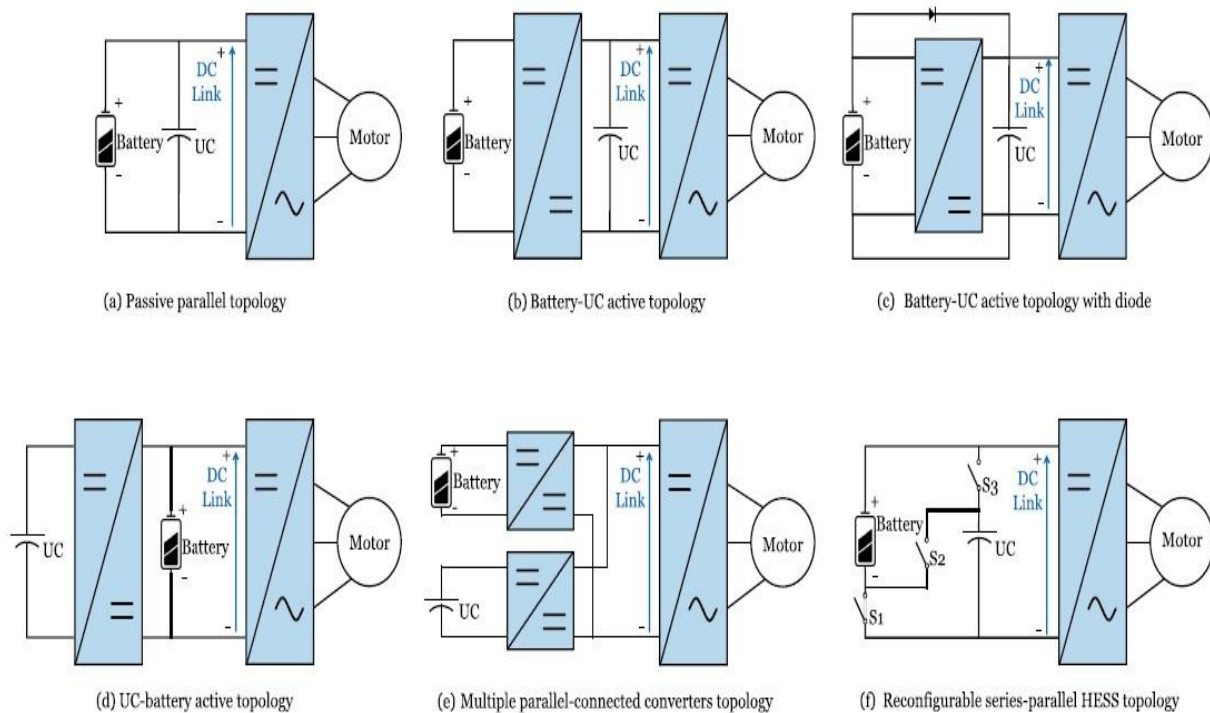


Figure III.2. Différentes configurations utilisées pour le stockage d'énergie à bord d'un VE

Dans la *Figure III.2. (a)*, la batterie et le supercondensateur sont montés en parallèle. Cette configuration présente des limitations technologiques du fait que les deux composants présentent des dynamiques différentes. Ce cas empêche toute décharge du rack de supercondensateur en dessous d'un seuil critique aux batteries. La puissance et l'endurance du véhicule sera considérablement affecté.

Dans la *Figure III.2. (b)*, le rack de supercondensateur est connecté sur le convertisseur DC/DC. Cette configuration n'a pas d'intérêts pratiques, elle présente les mêmes inconvénients que la configuration 2(a), de même que la liaison Batteries-Bus d'alimentation reste à définir.

Dans la *Figure III.2. (c)*, la liaison Batterie-Bus d'alimentation est clairement définie. Cette configuration reste difficile à mettre en pratique à cause des dynamiques très différentes des composants qui constituent l'ESS.

La *Figure III.2. (d)*, présente un cas très intéressant et très utilisé dans les véhicules électriques rechargeables, où les batteries servent à alimenter le groupe motopropulseur donc le Bus d'alimentation directement. Le niveau de tension doit être maintenu autour de la valeur nominale du Bus d'alimentation. Le rack de supercondensateur, intervient lors des appels en courant et sert de réservoir lors de la récupération d'énergie pendant le freinage régénératif.

La *Figure III.2. (e)* présente une configuration avec deux convertisseurs séparés dédiés chacun à un rack spécifique. Le rack de supercondensateur joue pleinement son rôle sans risque d'entraver ni les batteries ni le convertisseur des motopropulseurs. De même, le rack de batterie est techniquement séparé du bus d'alimentation. Cette configuration offre la possibilité de rendre le rapport cyclique de commande des convertisseurs dynamique et offre une plage de fonctionnement plus large.

La configuration illustrée en *Figure III.2. (f)*, offre une maniabilité accrue des sources disponibles à bord du véhicule. Le groupe motopropulseur peut être connecté séparément soit aux batteries soit aux supercondensateurs en fonction du régime de fonctionnement selon qu'on soit en mode alimentation ou récupération ou combiné. Il offre aussi la possibilité d'une liaison série pour une tension résultante, ou parallèle pour un courant résultant des deux racks formant la source principale.

III.4. Approche globale

L'efficacité de la stratégie de gestion d'énergie dépend donc grandement de l'architecture du véhicule électrique et de ces sous-systèmes. Le premier est le système de stockage d'énergie (ESS) installé, il est recommandé de traiter ce dernier de manière à le rendre le plus sûr possible. Cela dépend essentiellement de trois paramètres [115], [116] :

III.4.1. La protection

Les ESS stockent des quantités importantes d'énergie et nécessitent des précautions de sécurité passives et actives pour éviter une libération incontrôlée de l'énergie. Bien que des contacteurs électromagnétiques soient utilisés en tant que dernière ligne de protection au niveau du pack, des mécanismes de sécurité passifs et actifs à l'intérieur du pack sont utilisés pour assurer un fonctionnement sûr continu du pack. Les mécanismes de sécurité passifs sont utilisés pour prévenir les pires scénarios en cas de défaut électrique, de température élevée ou de pression interne élevée. Chaque cellule est généralement protégée contre les surintensités à l'aide de fusibles réparables, à coefficient de température positif et contre les courts-circuits à l'aide de disjoncteurs bimétalliques. La plupart des cellules de batterie sont également équipées de soupapes de décharge en cas de surpression. Les modules sont conçus en tenant compte des agressions physiques attendues (vibrations, chocs, etc.) et de l'isolation thermique des cellules et la propagation thermique inter-cellules. L'EMS doit donc protéger activement l'ESS.

III.4.2. Estimation de l'état de charge

Le *SOC* (*State of Charge*) est la charge normalisée d'une cellule. Il définit la quantité de charge stockée dans une cellule. Un système de gestion de batterie moderne doit pouvoir estimer le *SOC* de la batterie, qui ne peut pas être mesuré directement. Elle est corrélée à la tension de circuit ouvert (*OCV*) et, en général, est une fonction non linéaire qui varie avec l'âge et la température. Il peut être déduit en utilisant des tables de correspondance fournies par le constructeur ou élaborée empiriquement. Néanmoins, cette approche présente des limitations car elle ne peut pas être utilisée pendant le fonctionnement.

La méthode de *Luenberger* est une approche couramment utilisée pour estimer l'état de charge (*SOC*) d'une batterie. Elle repose sur un modèle mathématique de la batterie et utilise des mesures de tension et de courant pour estimer le *SOC* actuel. Voici comment fonctionne la méthode de *Luenberger*.

- 1. Modèle de la batterie :** tout d'abord, un modèle mathématique de la batterie est utilisé pour représenter son comportement. Ce modèle est généralement basé sur des équations électrochimiques qui décrivent la relation entre la tension, le courant et le *SOC* de la batterie.
- 2. Observateur de *Luenberger* :** Un observateur de *Luenberger* est un algorithme qui utilise le modèle de la batterie et les mesures de tension et de courant pour estimer le *SOC*. L'observateur calcule une estimation du *SOC* en comparant les prédictions du modèle avec les mesures réelles.
- 3. Correction de l'estimation :** l'estimation du *SOC* est corrigée en utilisant des techniques d'ajustement pour réduire les erreurs entre les prédictions du modèle et les mesures réelles. Cela permet d'améliorer la précision de l'estimation du *SOC* au fil du temps.
- 4. Répétition du processus :** Le processus d'estimation est répété à intervalles réguliers pour mettre à jour l'estimation du *SOC* à mesure que de nouvelles mesures de tension et de courant sont disponibles.

Il est important de noter que la méthode de *Luenberger* nécessite un modèle précis de la batterie pour obtenir des estimations fiables du *SOC*. Ce modèle peut être basé sur des données expérimentales ou sur des modèles théoriques de la batterie. De plus, la précision de l'estimation du *SOC* peut être influencée par des facteurs tels que l'âge de la batterie, la température et d'autres conditions de fonctionnement.

Le *SOH* (*State of Health*), ou état de santé, peut être déterminé par rapport à l'énergie ou par rapport à la puissance, en tenant compte des paramètres de la batterie. Le principal paramètre pour calculer l'état de santé énergétique est la capacité, mais il peut également prendre en compte la tension et/ou les taux d'autodécharge pour capturer plus précisément les capacités énergétiques. En revanche, l'état de santé de puissance est principalement déterminé en fonction de la résistance ou de l'impédance. Dans les véhicules électriques (*EV*), le système de gestion d'énergie doit garantir un état de santé pour le système de stockage d'énergie (*ESS*) à un niveau suffisant pour répondre aux exigences de puissance et d'autonomie [114-116].

III.4.3. Équilibre et redistribution

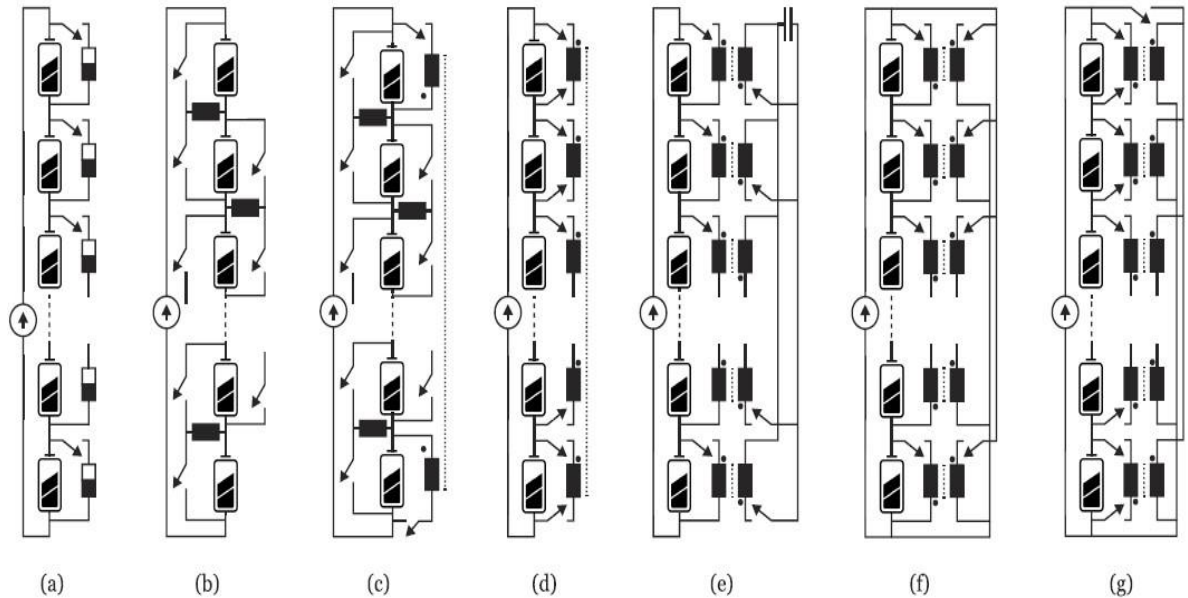
Un pack déséquilibré présente une capacité effective réduite et un risque accru de charger/décharger les cellules au-dessus/en dessous des tensions de fonctionnement sûres. Ainsi, les systèmes de gestion de l'énergie modernes utilisent des techniques pour égaliser l'état de charge (*SOC*) des cellules. Il existe deux classes d'équilibrage matériel : dissipatif et non dissipatif.

Dans l'équilibrage dissipatif, une charge excessive est prélevée sur les cellules ayant le *SOC* le plus élevé et est dissipée à travers une résistance de dérivation ou un transistor. Il peut être passif ou actif.

L'équilibrage passif repose sur les propriétés du système, c'est-à-dire la tension de la cellule, pour obtenir des cellules équilibrées. La Figure III.3 présente différentes variantes de configurations. En *Figure III.3. (a)*, les résistances de dérivation sont connectées en parallèle avec les cellules en permanence pendant l'équilibrage. L'équilibrage est obtenu car un courant plus élevé et prélevé sur les cellules ayant une tension de cellule plus élevée par rapport aux cellules ayant une tension plus basse. Cependant, l'équilibrage passif prélève de la charge de toutes les cellules, y compris celles avec un faible *SOC* (par rapport aux autres cellules), et nécessite un temps significatif pour l'équilibrage. Ces inconvénients sont résolus en utilisant un équilibrage dissipatif actif qui est obtenu en combinant la même topologie avec un système de contrôle qui contrôle activement les commutateurs d'équilibrage. Le contrôleur identifie les cellules avec un *SOC* élevé et élimine la charge excessive de ces cellules en dissipant l'énergie dans une résistance.

Les topologies non dissipatives déplacent la charge entre les cellules de la batterie. Elles sont généralement actives et utilisent une stratégie de contrôle pour identifier le courant d'équilibrage dans les liaisons. Elles peuvent être classées en tant que topologies de cellule à cellule, de cellule à pile et de pile à cellule. Les convertisseurs électroniques de puissance sont utilisés pour déplacer la charge à travers la pile et réaliser les liaisons d'équilibrage. Des exemples sont illustrés à la *Figure III.3* [114].

L'équilibrage non dissipatif utilise des liaisons électroniques de puissance, c'est-à-dire des convertisseurs dc/dc, pour déplacer la charge entre les cellules. Le matériel non dissipatif peut être en outre distingué d'un point de vue fonctionnel. L'équilibrage fait référence à l'égalisation des *SOC* des cellules dans une chaîne et est généralement appliqué pendant la charge. La capacité utile d'une chaîne équilibrée est celle de sa cellule la plus faible. Pendant la décharge, l'opération doit s'arrêter une fois que la cellule la plus faible est vide, même si les cellules plus puissantes contiennent encore de l'énergie. La redistribution déplace dynamiquement la charge des cellules les plus puissantes vers les cellules les plus faibles pendant le fonctionnement, de sorte que toute l'énergie stockée dans la pile puisse être utilisée. On peut la considérer comme une forme d'équilibrage non dissipatif où chaque liaison est capable de gérer la puissance requise [117].



Balancing topologies. (a) Dissipative. (b) Line. (c) Ring. (d) Inductive. (e) Capacitive. (f) Individual. (g) Common.

Figure III.3. Topologie d'équilibrage de charge des dispositifs de stockage.

III.5. Architecture du groupe motopropulseur

Le deuxième sous-système impliqué dans l'efficacité de la stratégie de la gestion d'énergie, est le groupe motopropulseur. Les groupes motopropulseurs électrifiés peuvent être regroupés en micro-hybrides, mild hybrides, hybrides puissants, hybrides rechargeables et entièrement électriques. Selon le degré d'électrification et l'emplacement des composants clés, les groupes motopropulseurs hybrides électriques peuvent être classés en topologies série, parallèle et série-parallèle. Cette dernière a été conceptualisée pour combiner les avantages des topologies série et parallèle. Les EMS pour les véhicules micro-hybrides et mild hybrides utilisent des stratégies de contrôle basées sur l'optimisation afin de maximiser l'efficacité globale du groupe motopropulseur.

Pour les configurations hybrides puissantes, différentes stratégies de contrôle sont utilisées en fonction de l'architecture [118]. Les stratégies de contrôle couramment utilisées incluent la programmation dynamique, la stratégie de minimisation de la consommation équivalente, le contrôle optimal flou et diverses méthodes d'optimisation telles que les algorithmes génétiques et l'optimisation par essaim de particules.

Les configurations série-parallèle sont encore plus complexes en raison de l'introduction de modes de fonctionnement multiples à l'aide d'un embrayage et de boîtes de vitesses planétaires. Pour ces configurations, des algorithmes de contrôle prédictif basés sur des modèles connus sont utilisés pour optimiser les performances du groupe motopropulseur. Les architectures des véhicules hybrides rechargeables sont similaires à celles des hybrides puissants, à l'exception de leur autonomie électrique accrue. Les EMS des véhicules hybrides rechargeables tirent parti de

cette autonomie accrue en adaptant le fonctionnement des composants du groupe motopropulseur selon les modes de décharge de la batterie et de maintien de charge, ou en combinant les deux modes [118) [119].

III.6. Évolution et classification de la gestion d'énergie

III.6.1. Objectif de la gestion d'énergie

L'objectif principal d'une gestion d'énergie efficace vise à réduire la dépendance aux combustibles fossiles et à minimiser les émissions de polluants à l'échappement d'un véhicule électrique hybride. L'*EMS* doit satisfaire la demande en puissance du véhicule et maintenir la charge de la batterie dans des limites acceptables. Bien que de nombreuses recherches se soient concentrées individuellement soit sur la réduction de la consommation de carburant soit sur la minimisation des émissions à l'échappement, la majorité des *EMS* ont été conçus pour satisfaire ces deux objectifs simultanément [120]. Quelques travaux de recherche abordent également des objectifs non conventionnels tels que la minimisation de la dégradation de la santé de la batterie et l'amélioration de la conduite. Les problèmes de conduite liés au démarrage du moteur à combustion interne et aux changements de vitesse sont atténués à l'aide d'un *EMS* pouvant être mis en œuvre en temps réel [121].

III.6.2. Principe de fonctionnement des systèmes de gestion de l'énergie (EMS)

Bien que différentes stratégies de contrôle et algorithmes soient utilisés pour atteindre différents objectifs, le principe de fonctionnement des EMS reste le même. En tant que contrôleur de supervision, l'*EMS* communique avec tous les contrôleurs au niveau des composants. Les contrôleurs au niveau des composants suivent les commandes de l'*EMS* pour faire fonctionner le groupe motopropulseur et le système de stockage d'énergie électrique autour de leurs points de fonctionnement optimaux respectifs. L'*EMS* exploite un degré de liberté supplémentaire, offert par l'électrification en répartissant la puissance demandée par le véhicule de manière variable à chaque pas de temps et en répartissant la puissance entre le moteur à combustion interne s'il existe et les moteurs électriques. Grâce à l'électrification, les *EMS* des groupes motopropulseurs électrifiés peuvent toujours faire fonctionner le moteur à combustion interne comme support de couple ou d'énergie autour de ses points optimaux sans compromettre l'objectif de conduite [121] [122].

III.6.3. Évolution du concept de gestion d'énergie

La *Figure III.4* montre l'évolution des systèmes de gestion de l'énergie (*EMS*) à travers la littérature. Entre 1993 et 2018 plus de 250 articles ont été publiés rien qu'en n'incluant les études concernant le véhicule hybride sans pile à combustible. La caractéristique discriminante clé de tout *EMS* est sa stratégie de contrôle pour la gestion de l'énergie. Quinze grandes stratégies de contrôle telles que les règles déterministes, les règles floues, la programmation dynamique déterministe, la programmation quadratique, la théorie des jeux, les algorithmes génétiques, l'optimisation convexe, l'optimisation par essaim de particules, les réseaux neuronaux, l'optimisation analytique, le principe minimum de *Pontryagin*, différentes versions de la stratégie *ECMS*, la programmation dynamique stochastique, différentes versions du contrôle prédictif basé sur le modèle et

l'apprentissage par renforcement, ont été utilisées dans différents *EMS*. Chacune de ces stratégies présente des avantages et des inconvénients [123].

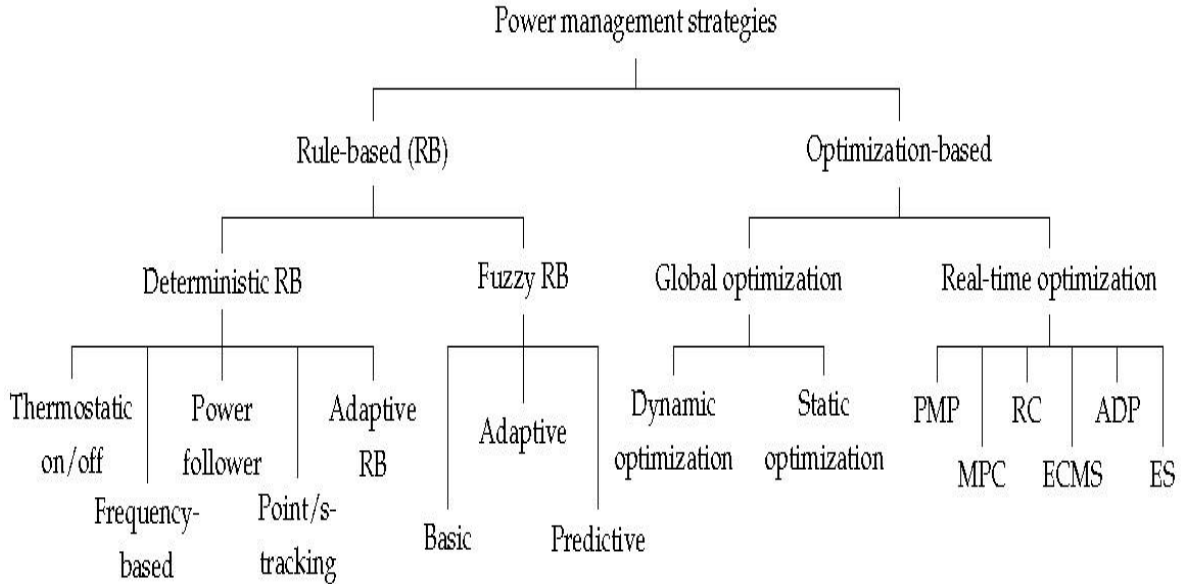


Figure III.4. Évolution des systèmes de gestion d'énergie.

Au cours de l'examen de ces articles de recherche, il a été constaté que des chercheurs de différentes institutions et organisations se sont concentrés sur différentes stratégies de contrôle selon leurs préférences à la même période. De plus, la plupart de ces stratégies de contrôle ont leur propre fondement mathématique et sont distinctes des autres stratégies. Il est donc très difficile de décrire l'évolution des stratégies de contrôle. Cependant, il existe une évolution explicite des objectifs des *EMS* au cours des deux dernières décennies et demie, comme le montre la *Figure III.5*.

Pour les véhicules hybrides, les *EMS* se concentraient sur la répartition de la demande de puissance entre le moteur à combustion interne et le moteur électrique afin de réduire les émissions du moteur à combustion interne. Ces stratégies de contrôle étaient principalement basées sur la méthode appelée (*Rules method*) et étaient construites à partir de données sur banc d'essais dynamométrique et d'essais sur route. Avec l'avènement de la programmation dynamique, les performances optimales des architectures de groupes motopropulseurs électrifiés sont comparées à l'optimisation globale hors ligne. Cependant, le flux de données obtenu à partir de la programmation dynamique était entravé par la charge informatique importante, et ne pouvait donc pas être mis en œuvre en tant que contrôle optimal en temps réel [105].

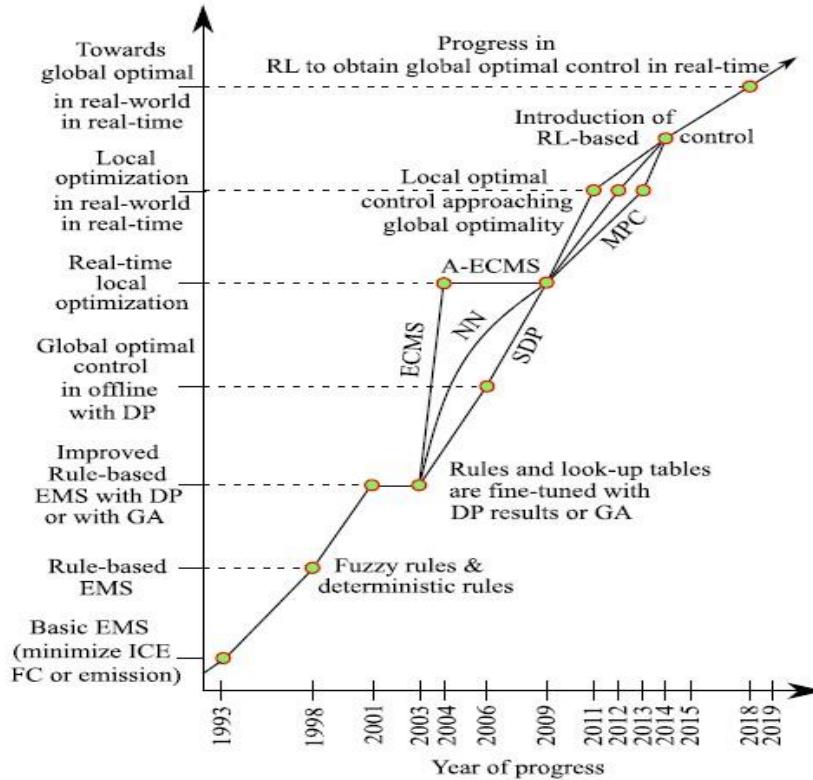


Figure III.5. Évolution dans le temps des objectifs de gestion d'énergie.

À la même période, des recherches étaient en cours dans trois directions distinctes pour contourner les inconvénients de la programmation dynamique et mettre en œuvre un contrôle optimal en temps réel. L'utilisation de l'apprentissage automatique à l'aide de réseaux neuronaux, le contrôle optimal instantané via le principe minimum de *Pontryagin* et la stratégie *ECMS*, et la programmation dynamique *stoch*. Une étude a été menée pour comprendre les tendances et l'évolution des systèmes de gestion de l'énergie (*EMS*) [105].

Actuellement le problème de la gestion d'énergie à bord d'un véhicule électrique consiste à trouver une méthode de gestion de puissance pour les véhicules hybrides électriques (*HEV*) qui soit à la fois applicable en temps réel et offre une solution optimale. L'approche « *Rules method* » est une méthode simple et rapide, mais elle ne fournit pas une solution optimale. D'un autre côté, les méthodes d'optimisation peuvent converger sur une solution optimale, mais elles nécessitent une connaissance complète des conditions de conduite, ce qui n'est pas toujours possible dans la pratique. Ainsi, le défi actuel est de développer des méthodes de gestion de puissance en temps réel qui s'approchent de la solution optimale sans être trop complexes. Pour cela, des outils complémentaires tels que la reconnaissance de motifs, les techniques de prédiction/estimation, le calcul multi-taux et les systèmes de trafic intelligents sont intégrés aux méthodes de gestion de puissance de base [105] [123].

III.7. Quelques méthodes de gestions d'énergie connues et expérimentées

III.7.1. Méthodes heuristiques

Les méthodes basées sur les règles heuristiques dans lesquelles la loi de commande est définie comme un ensemble de règles "si-alors" pour déterminer l'action de contrôle. Dans les véhicules hybrides électriques (*HEV*), les méthodes heuristiques sont formulées à l'aide de l'expertise humaine, de l'intuition, des limites d'exploitation et des considérations de sécurité. L'avantage principal de ces méthodes est la faible exigence en termes de calcul, ce qui les rend largement utilisées dans plusieurs véhicules commerciaux tels que la *Toyota Prius* et la *Honda Insight*. Les méthodes heuristiques sont classées en algorithmes déterministes et flous [124].

III.7.2. Méthodes déterministes

Les méthodes déterministes sont formulées en termes de règles fixes. En bref, les commandes d'arrêt du moteur, de répartition de puissance ou de charge de la batterie sont régulées par des algorithmes dans lesquels les limites de fonctionnement sont déjà prescrites. On citera comme exemple la stratégie de contrôle du thermostat (marche/arrêt) est une méthode de contrôle classique basée sur la définition de limites de fonctionnement autorisées pour les composants du groupe motopropulseur. L'objectif principal du contrôle est de maintenir le moteur électrique et la batterie dans des plages de fonctionnement spécifiées. Cependant, l'efficacité globale du système n'est pas réalisable compte tenu de la demande de puissance imprévue. Cette méthode est largement utilisée en raison de ses faibles exigences en termes de calcul [126].

III.7.3. Méthodes floues

Les méthodes basées sur des règles floues (*Fuzzy Rule-Based Methods*) introduisent la logique floue dans la gestion de puissance des véhicules hybrides électriques (*HEV*), offrant ainsi les avantages d'une sortie proportionnelle aux différentes conditions de fonctionnement, d'une facilité de réglage des règles floues et d'une robustesse face aux erreurs de modélisation et aux mesures imprécises. Dans ces algorithmes, le contrôleur effectue les étapes fondamentales de la logique floue.

Tout d'abord, les entrées sont transformées en fonctions d'appartenance floues, où des règles basées sur l'expertise humaine sont utilisées pour calculer la sortie floue. Enfin, les valeurs de sortie sont déflouées pour obtenir des signaux de contrôle proportionnels. Cette méthode a été introduite dans la gestion de puissance des *HEV* en utilisant le principe de nivellement de charge [127] [128].

III.7.4. Méthode basée sur l'optimisation globale

Dans ces méthodes, l'objectif de la gestion de puissance est de minimiser le coût d'exploitation sur la durée considérée. De ce point de vue, ces méthodes se divisent en deux catégories : l'optimisation globale et l'optimisation en temps réel. Selon les recherches récentes, les méthodes basées sur l'optimisation suscitent davantage d'attention, avec un pourcentage de 56,7 %, par rapport aux méthodes « *Rules method* », qui représentent 32,9 %. Les méthodes d'optimisation globale sont conçues pour atteindre la solution optimale globale pour l'ensemble du trajet, en se basant sur des connaissances a priori des conditions de conduite à venir. Leur

application en temps réel est limitée en raison de la charge de calcul accrue, mais elles peuvent servir de solution de référence pour analyser, régler et évaluer d'autres méthodes [129].

III.7.5. Programmation dynamique (DP)

La programmation dynamique peut être utilisée pour résoudre différents problèmes d'optimisation sous une forme discrète, en se basant sur le principe d'optimalité de *Bellman*. La solution optimale est recherchée de manière séquentielle. La solution obtenue par *DP* est de niveau inférieur en termes d'optimalité en raison de la connaissance limitée des conditions de conduite à venir, ce qui conduit à des stratégies non optimales [130] [131].

III.7.6. Optimisation par essaim de particules (PSO)

Inspirée par le comportement intelligent des essaims, la *PSO* est introduite comme une méthode d'optimisation pour les systèmes dynamiques non linéaires. Avec cette méthode d'optimisation, les paramètres de solution sont définis dans un espace multidimensionnel. Dans cet espace, un essaim de particules (solutions) est généré en tant qu'ensemble initial de solutions. Le mouvement (changement de valeur) de chaque particule peut être caractérisé par deux variables : la position et la vitesse ; puis ajusté pour obtenir les meilleures valeurs pour les particules individuelles et l'ensemble de l'essaim en tant que groupe. Le mouvement de la particule est ensuite orienté pour suivre la meilleure direction par rapport au groupe [105].

III.7.7. Méthode de gestion d'énergie prédictives

Ces *EMS* sont composés d'une stratégie de contrôle pré calculée fixe et n'est pas modifiée tant que l'EMS n'est pas reprogrammé par une intervention humaine. L'EMS prend alors des décisions de contrôle presque instantanément en fonction des valeurs des entrées. Cette classe d'EMS effectue seulement quelques calculs pour prendre chaque décision de contrôle. Par conséquent, elle n'est pas encombrée par une complexité informatique. Les éléments principaux de cette classe d'EMS sont les états d'entrée, les décisions de contrôle de sortie et une stratégie de contrôle statique, comme le montre la *Figure III.7* [105].

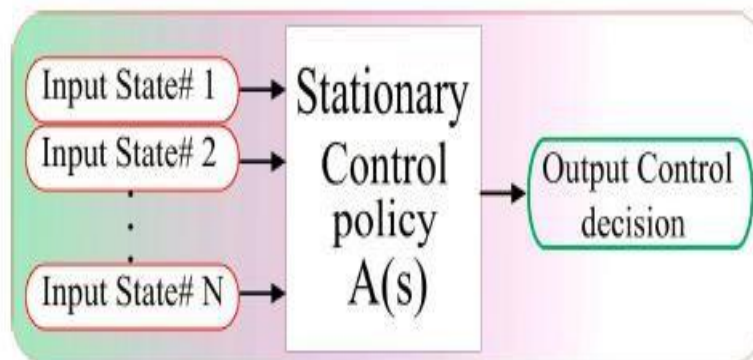


Figure III.6. synoptique de la stratégie de gestion prédictive.

En raison de leur facilité d'utilisation, la plupart des fabricants d'équipements d'origine (*OEM*) continuent de s'appuyer sur des *EMS* prémédités pour leurs groupes motopropulseurs électrifiés. Cependant, l'articulation de la politique de contrôle préméditée est une tâche complexe et rigoureuse.

III.7.8. Optimisation en temps réel

Les méthodes d'optimisation en temps réel appliquent des stratégies de gestion de puissance instantanée pour minimiser la fonction de coût en se basant sur des hypothèses d'équivalence futures de la consommation d'énergie. En général, la formulation mathématique de ces méthodes doit être adaptée à une application en temps réel en termes d'exigences de calcul et de ressources mémoire. Une brève revue de ces méthodes est présentée ci-après. Étant donné que l'estimation des facteurs d'équivalence influe directement sur les performances de l'*ECMS*, ce point est étudié plus en détail selon deux perspectives : trouver des valeurs statiques optimales ou mettre à jour dynamiquement la valeur estimée.

Le premier est un problème d'optimisation statique typique qui peut être résolu à l'aide de la programmation dynamique (DP).

Le second peut être classé en trois sous-catégories :

- a) Premièrement, utiliser un terme de correction pour le facteur optimisé hors ligne en utilisant un contrôle par rétroaction.
- b) Deuxièmement, considérer une fonction de facteur équivalent en termes de deux valeurs optimisées pour les cas de charge/décharge et un facteur de probabilité basé sur la déplétion actuelle et attendue de l'énergie électrique.
- c) Troisièmement, en mettant en œuvre une table de recherche multidimensionnelle en utilisant les informations actuelles sur la charge du véhicule, la position, la vitesse ou la distance du trajet [105], [123].

III.8. Développement d'une stratégie de gestion d'énergie

Le développement d'une stratégie de gestion d'énergie utilitaire passe par plusieurs étapes, de la simulation en boucle fermée à la validation sur banc d'essai avant les tests sur route. Voici un résumé des principales étapes [132], [133] :

III.8.1. Simulation en boucle fermée

Dans cette étape, la modélisation du véhicule et du contrôleur *EMS* est réalisée dans un environnement de simulation tel que MATLAB & Simulink. La performance de l'*EMS* est validée à l'aide de simulations *MIL* (*Model in Loop*), puis le contrôleur est testé en temps réel dans des simulations *SIL*.

III.8.2. Simulation en boucle matérielle (*HIL- Hardware-in-the-loop*)

Les calculateurs embarqués dans les véhicules modernes doivent être validés à l'aide de simulations *HIL* avant leur intégration réelle dans le véhicule. La simulation *HIL* présente des avantages tels que la répétabilité des scénarios de test et le coût moindre par rapport aux tests sur

route. La communication entre les calculateurs dans la simulation *HIL* est généralement réalisée via le protocole *CAN* (*Controller Area Network*).

III.8.3. Test sur banc d'essai (dynamomètre)

Avant les tests sur route, le contrôleur *EMS* est validé sur un banc d'essai (dynamomètre) où le véhicule complet est soumis à différentes conditions de charge simulées. Ce test permet de vérifier la performance du contrôleur dans des conditions contrôlées et reproductibles.

Une fois ces étapes de développement réalisées, le contrôleur *EMS* est prêt pour les tests sur route.

Les principaux inconvénients des méthodes classiques de gestion de l'énergie sont leur formulation fixe et leur faible flexibilité pour s'adapter à différentes conditions de conduite. D'autre part, les méthodes basées sur l'optimisation sont moins applicables en temps réel en raison de leur charge de calcul augmentée. Les outils d'adaptation subsidiaires sont intégrés aux deux méthodes pour remédier à ces inconvénients. L'analyse des méthodes en temps réel basées sur l'optimisation donne un aperçu selon lequel ces méthodes offrent des convergences de calculs en temps réel très intéressantes sans faire appel à des ressources matérielles excessives.

Selon la littérature présentée, et en se basant sur les prédictions et les orientations des industriels et de la recherche, on peut constater que la principale tendance des systèmes de gestion de l'énergie récents est d'acquiescer des solutions optimales en temps réel. Dans cette optique, les méthodes de base doivent être adaptées pour atténuer les calculs excessifs ou les solutions non optimales. Le principe d'orientation est de mettre en œuvre une méthode optimale en temps réel dont l'objectif est de se concentrer davantage sur les outils d'adaptation subsidiaires pour permettre une gestion optimale de l'énergie en temps réel [132].

Les méthodes d'optimisation en temps réel utilisant la logique floue appliquée aux méthodes de contrôle de la batterie (déterministes et floues) accroît la robustesse, de telle sorte qu'elle permettent de trouver les valeurs optimales des paramètres de contrôle (de manière quantitative) ou en définissant la structure optimale du vecteur de contrôle (de manière qualitative), c'est-à-dire l'ensemble optimal de paramètres de contrôle permettant d'obtenir des performances équilibrées dans différentes conditions de conduite [132].

Il est important de souligner que les tendances en matière de gestion de l'énergie évoluent rapidement mais il est clair que pour développer des méthodes de gestion de l'énergie optimales en temps réel, deux exigences principales doivent être remplies : réduction de la charge de calcul pour s'adapter aux plates-formes de contrôle des véhicules et capacité à rechercher et trouver une solution quasi-optimale. Dans cette optique, les outils d'adaptation expliqués ci-dessus sont intégrés à de nombreuses méthodes de gestion d'énergie en temps réel pour améliorer leur efficacité et leur flexibilité. Cependant, il convient de noter que l'utilisation de ces outils peut introduire une complexité supplémentaire dans la conception et la mise en œuvre des systèmes de gestion de l'énergie [105].

III.9. Conclusion

Le processus de développement d'un contrôleur *EMS* utilitaire pour un groupe motopropulseur électrifié, allant de la formulation mathématique de la stratégie de contrôle au module cible, est décrit dans ce chapitre. Les caractéristiques typiques des *EMS* correspondant aux principales classes d'architectures de groupe motopropulseur ont été discutées. L'évolution des *EMS* depuis 1993 jusqu'en 2018 a été discuté en donnant une orientation globale de la recherche et de l'industrie dans ce domaine.

Il est démontré qu'une politique de contrôle optimale ou quasi-optimale pour un *EMS* utilitaire peut être formulée sous la forme de règles préméditées, d'optimisation instantanée ou d'une combinaison des deux. Il est également indiqué que les contraintes matérielles jouent un rôle majeur dans toutes les phases du développement des *EMS*. L'accent principal est mis sur la catégorisation des *EMS* utilitaires en fonction de leur dépendance envers les ressources de calcul disponible et de l'objectif à atteindre.

Chapitre IV

Contrôle en temps réel d'une source hybride d'énergie :

**Application à une architecture
PEMFC - Batteries - Supercondensateurs**

IV.1. Introduction

Comme précédemment discuté, l'efficacité d'une stratégie de commande et de gestion d'une alimentation hybride dépend grandement de la nature des sous-systèmes qui la composent. Le système étudié, est constitué d'un émulateur de pile à combustible de type PEMFC de 500W, d'un rack de Batteries construit au laboratoire LATAGE avec des unités de piles de 4.2V/6A et d'un rack de Supercondensateurs construit lui aussi autour de cellules unitaires de 300F/2.5V chacune. L'émulateur de la pile à combustible est obtenu à partir d'une alimentation continue et contrôlée par un convertisseur statique dc dc Buck auquel nous avons injecté le modèle mathématique de la pile souhaitée. Cette pile est utilisée comme source primaire et sera chargée de produire l'énergie nécessaire au maintien du bon fonctionnement du Bus d'alimentation. La partie stockage est réalisée avec l'association des deux racks de Batteries et Supercondensateurs formant la source secondaire, qui sera chargée d'alimenter continuellement l'ensemble du système, dont la puissance cible est de 500W. Nous allons donc présenter chaque partie constituant le système.

Plusieurs stratégies pour plusieurs configurations s'offrent à nous et sont exposées dans la littérature ; notre contribution est d'offrir une stratégie économique en termes de coûts dans l'espoir de toucher le maximum de clients, écologique en termes d'efficacité énergétique afin de convaincre les éventuels réticents, et fiable sur le plan technique dans le but de donner une impulsion réelle à la généralisation de l'alternative véhicule tout électrique. La stratégie choisie s'inspire de la méthode déterministe avec un control en temps réel.

IV.2. Structure et stratégie proposées

Dans notre étude, nous avons proposé l'alternative montrée en *Figure IV.1*. La pile à combustible (*PAC*) se charge de fournir l'énergie disponible sur le bus d'alimentation. La tension de bus est obtenue grâce à un convertisseur dc/dc Boost qui constitue l'interface pile à combustible bus d'alimentation. La tension fournie par la *PAC* est de 42 Volts à vide ou à batteries pleine. Cette tension sert d'entrée au boost qui fournit à sa sortie la tension de 88 Volts disponible tout le temps sur le bus d'alimentation, connecté sur le rack des batteries permettant de les maintenir à pleine charge. Le bus d'alimentation est maintenu autour de ce niveau de tension grâce à un protocole de gestion en temps réel.

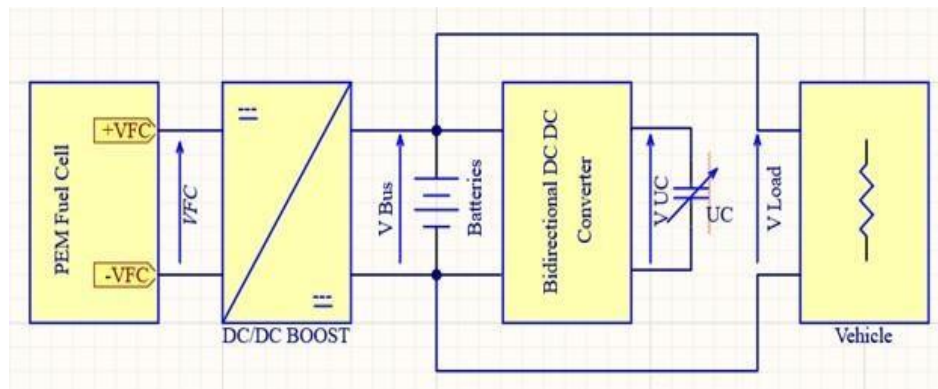


Figure IV.1. Structure du système proposé.

Chapitre IV : Contrôle en temps réel d'une source hybride d'énergie : application à une architecture PEMFC - Batteries - Supercondensateurs

Le premier défi qu'on se propose de relever est la mise en place de la pile à combustible. Le modèle de la PAC utilisé est de type *PEMFC* (*Proton Exchange Membrane Fuel Cell*), dont le modèle Simulink est illustré en *Figure IV.2*. Le modèle utilisé nous permet de modifier la plupart des paramètres dynamiques qui peuvent influencer la tension à la sortie de la pile. Dont la température de fonctionnement ainsi que les pressions des gaz d'Hydrogène à la l'anode et d'oxygène et à la cathode de la pile. On y distingue les différents paramètres qui interviennent dans la réponse de la pile.

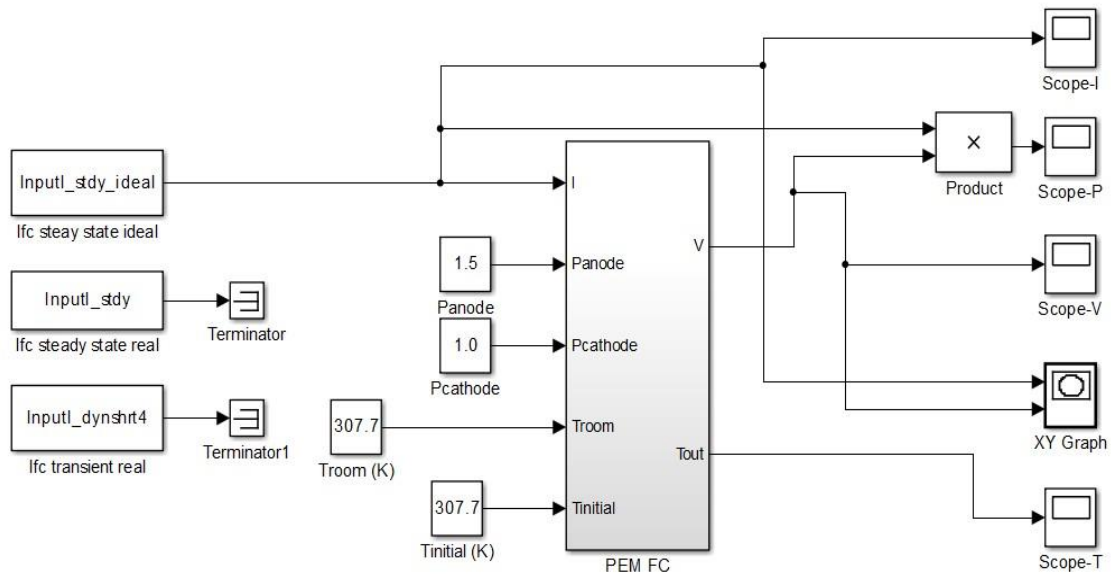


Figure IV.2. Modèle Simulink utilisé de la pile à combustible.

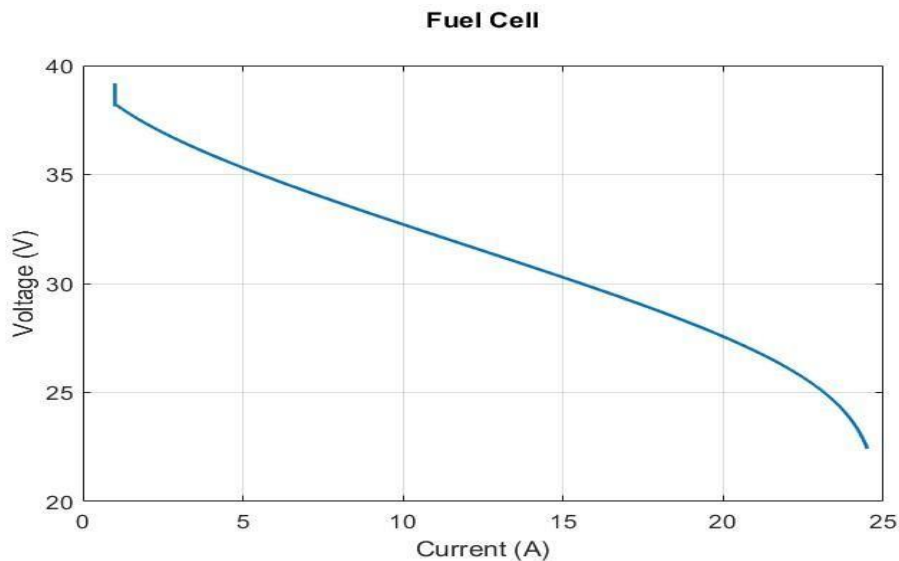


Figure IV.3. Réponse Tension/Courant de la pile.

La *Figure IV.3* donne la caractéristique Tension/Courant type d'une pile à combustible. On relèvera que dans les conditions de simulation ci-dessus, la tension à vide est de 42 Volts ; il s'en suit les trois (03) étapes de fonctionnement de la pile étudiées dans les chapitres précédents. La tension de la pile chute drastiquement pour un courant de 25 Ampères

La *Figure IV.4* donne l'allure de la puissance fournie par la pile dans les mêmes conditions de simulation. Elle avoisine les 600 Watts.

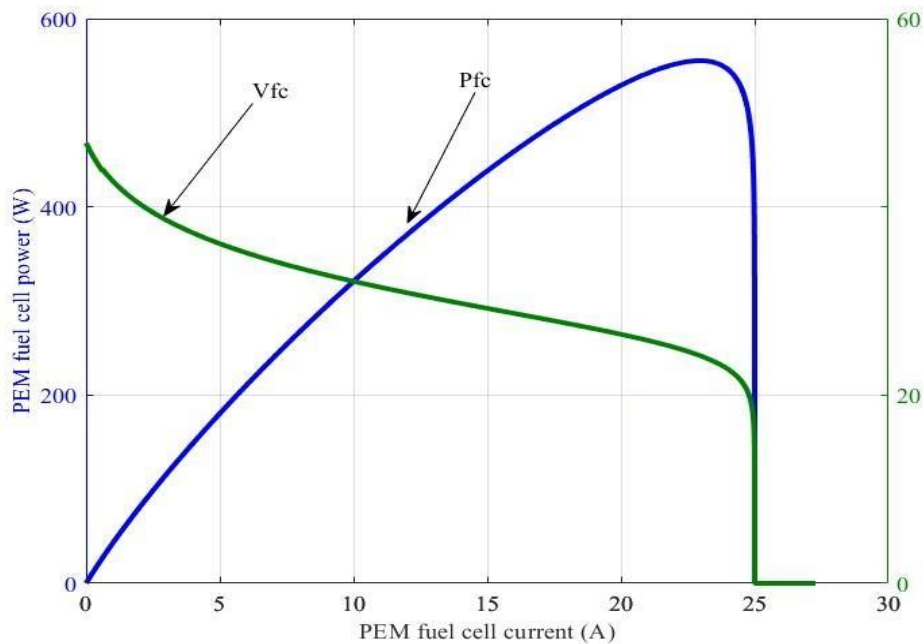


Figure IV.4. Puissance disponible et produite par la pile

IV.3. Réalisation de l'émulateur

La PAC utilisée pour réaliser notre source primaire est en réalité un émulateur de pile à combustible construit autour d'un convertisseur dc/dc Buck auquel nous avons injecté le modèle mathématique d'une pile à combustible de type *PEMFC* dont le schéma de principe est illustré en *Figure IV.5*.

Le but de l'utilisation d'un émulateur, est d'obtenir un comportement d'une pile à combustible sans avoir à se soucier des risques liés à la gestion des gaz d'hydrogène et d'oxygène et les dangers qui peuvent en découler. Comme nous l'avons mentionné dans les chapitres précédents, une gestion rigoureuse de la pile à combustible nécessite également une régulation d'une multitude de paramètres comme la température de fonctionnement, le flux de l'eau produite ou les phénomènes intrinsèques dus aux réactions chimiques elles-mêmes. De plus tous ces paramètres peuvent être ajustés par programmation. Le schéma synoptique de l'émulateur est donné en *Figure IV.6*. Pour les besoins de sa réalisation, nous avons procédé comme suit.

Chapitre IV : Contrôle en temps réel d'une source hybride d'énergie : application à une architecture PEMFC - Batteries - Supercondensateurs

L'énergie devant être fournie par la pile est obtenue en utilisant une source d'alimentation de laboratoire référencée EA-PS 9080-50T du constructeur Allemand *EA Elektro-Automatique* illustrée en *Figure IV.7*. Elle peut fournir un courant de 50 Ampères sous 80 Volts. Cette source est notée **BLOC1** sur la *Figure IV.5*.

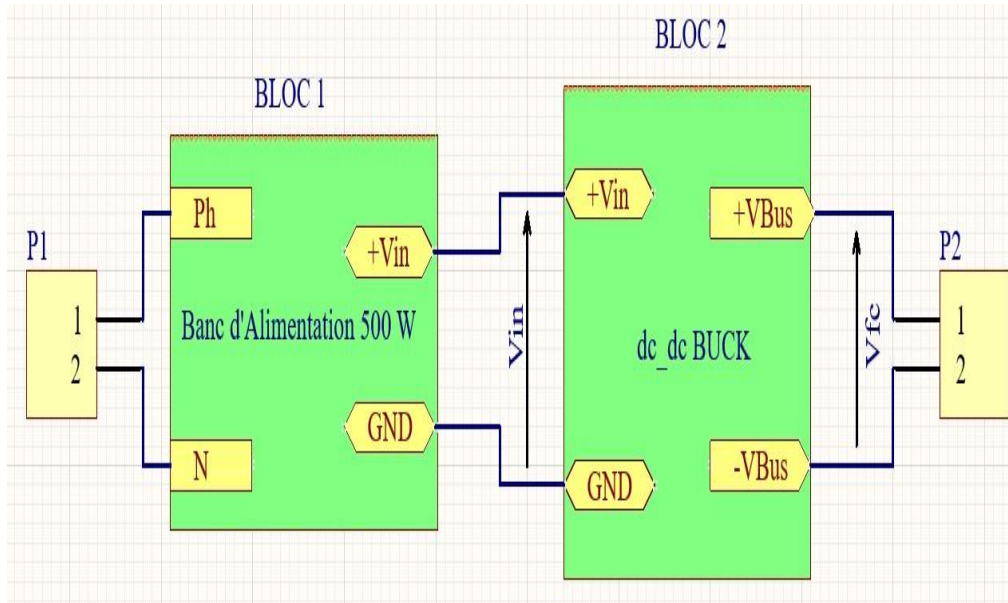


Figure IV.5. Schéma synoptique de l'émulateur de la PAC PEMFC.

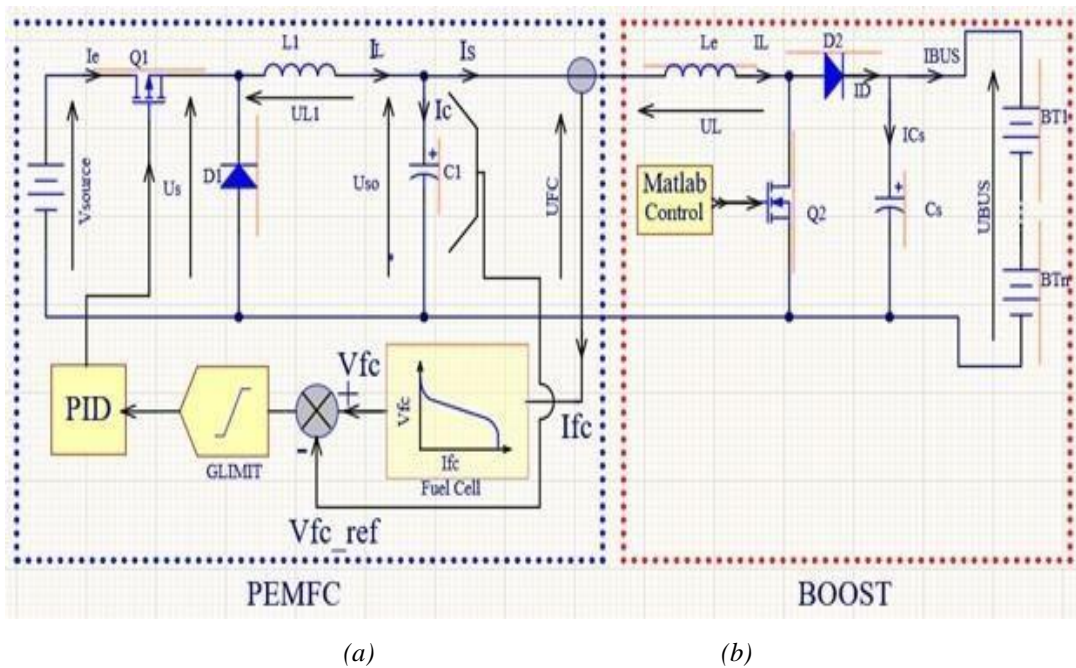


Figure IV.6. Schéma du circuit de principe de l'émulateur de la PAC PEMFC.



Figure IV.7. Source d'alimentation « EA-PS 9080-50T » utilisée pour l'émulateur de la PAC.

Le deuxième étage de l'émulateur est constitué d'un convertisseur de type Buck noté **BLOC2**, sur la *Figure IV.5*, contrôlé par le modèle de pile cible et précédemment illustré en *Figure IV.2*. Le circuit de principe est donné en *Figure IV.6*, ou un régulateur PI est utilisé afin d'imposer la dynamique correspondante au modèle ciblé, et adéquate et nécessaire au fonctionnement de la PAC. Le control est réalisé sous dSPACE 1103 via MATLAB Simulink., L'émulateur de PAC fournit en sortie une tension à vide de 42 Volts.

IV.3.1. Fonctionnement de l'émulateur

Comme indiqué en *Figure IV.6 (a)*, le courant demandé par la charge en aval de l'émulateur noté I_{fc} (*Fuel Cell Current*) est prélevé à la sortie de celui-ci. Une tension équivalente est calculée notée V_{fc} (*Fuel Cell Voltage*). Un rapport cyclique est généré grâce à un contrôleur PI puis injecté dans le convertisseur qui fournira la tension ciblée.

Le circuit électronique du convertisseur Buck qui constitue l'émulateur est donné en *Figure IV.8*. Les signaux issus du régulateur PI sont injectés à un bras IGBT de référence SKM120GB75, via un driver de référence IR2110 sur son étage supérieur, après une isolation galvanique assurée par un optocoupleur de types PC817. Le transistor Q1 assure l'adaptation des signaux de commandes sur l'entrée du driver. Le circuit PCB est donné en *Figure IV.9*. Les courants et tensions de l'entrée et sortie du Buck sont prélevés grâce à des capteurs à effet hall de courant et tension de références respectives : LA55A et LV25P. les résistances de polarisations et de mesures utilisées sont calculées en utilisant les documents du constructeur donnés en *ANNEXE 8*.

Chapitre IV : Contrôle en temps réel d'une source hybride d'énergie : application à une architecture PEMFC - Batteries - Supercondensateurs

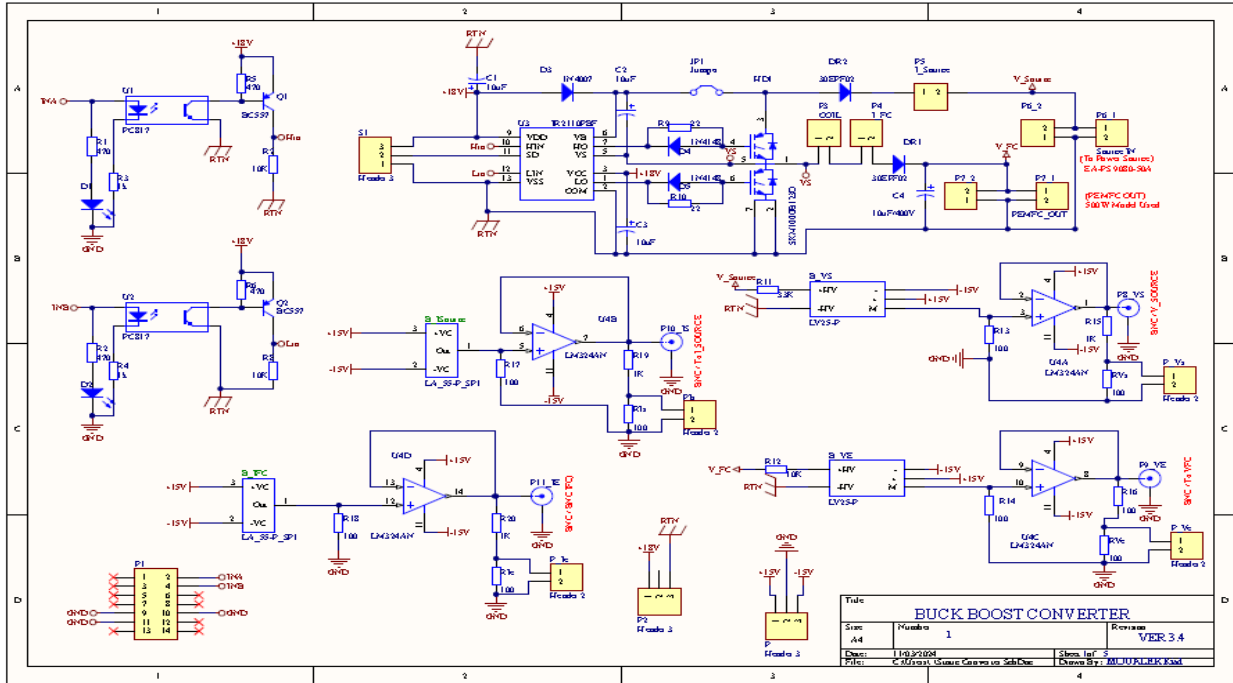


Figure IV.8. Circuit électronique de l'émulateur de la PAC

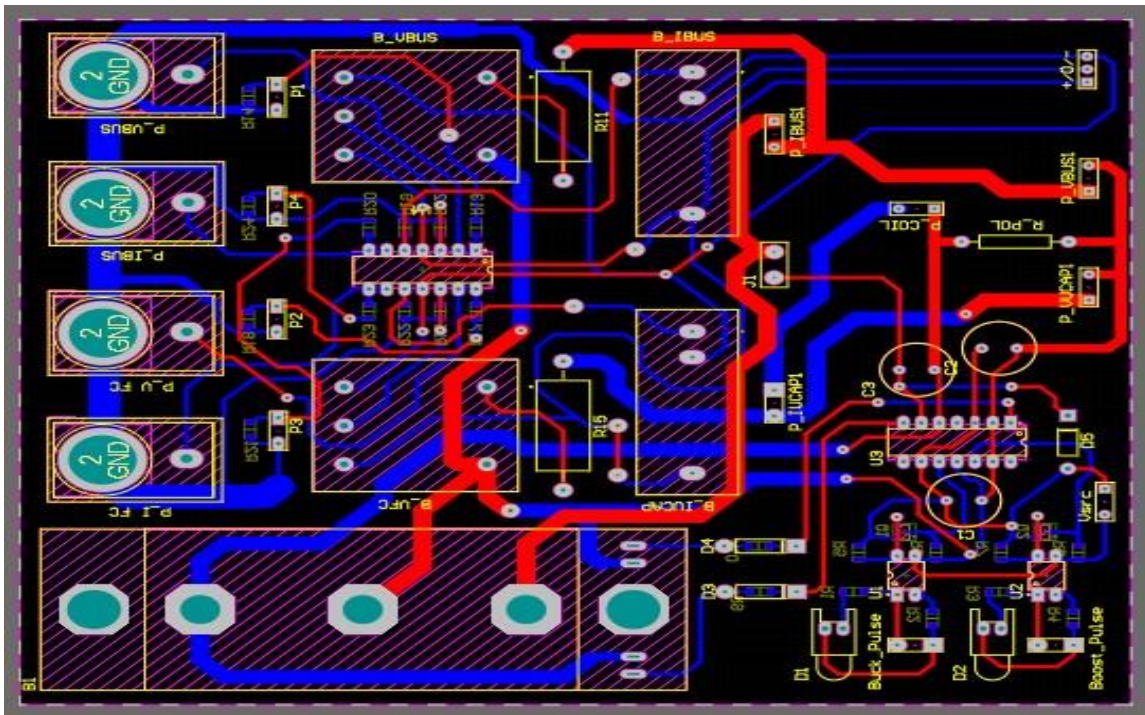


Figure IV.9. Circuit PCB de l'émulateur de la PAC

La fréquence de hachage du signal PWM de commande est de $f = 10 \text{ KHz}$. L'inductance et la capacité obtenues grâce au modèle mathématique du Buck étudié en Chapitre II sont

Chapitre IV : Contrôle en temps réel d'une source hybride d'énergie : application à une architecture PEMFC - Batteries - Supercondensateurs

respectivement $L=22\text{mH}$ et $C=100\mu\text{F}$. Ces valeurs nous ont permis de limiter les ondulations de la tension et du courant relativement faibles de l'ordre respectivement :

$$\frac{\Delta V}{V} = 5\%$$

$$\frac{\Delta I}{I} = 10\%$$

La caractéristique tension/courant ainsi que les signaux obtenus sur le banc d'essai expérimental sous une variation de la charge, sont donnés respectivement en *Figure IV.10 (a)* et *IV.10 (b)*.

Les résultats expérimentaux présentés en *Figure IV.10* constituent la réponse en temps réelle de l'émulateur de la PAC réalisé, alimentant une charge résistive variable comprise entre 37 ohms et 220 ohms. La *Figure IV.10 (a)* montre en (1), la tension de sortie V_{fc} de la pile à combustible. En (2) la tension de sortie, prélevée sur l'émetteur de Q1. Le courant à travers la bobine $L1$, en *courbe (3)*. Le signal de contrôle de Q1 issu de la dSPACE 1103 en (4). Le fonctionnement de l'émulateur PEMFC face à une variation brusque du courant de charge est illustré à la *Figure IV.10 (b)*, où la *courbe (1)* représente la tension de sortie de l'émulateur et la *courbe (2)* montre le courant de sortie. Cette fluctuation est typique et est conforme au fonctionnement d'une PAC et du modèle PEMFC que nous avons ciblé.

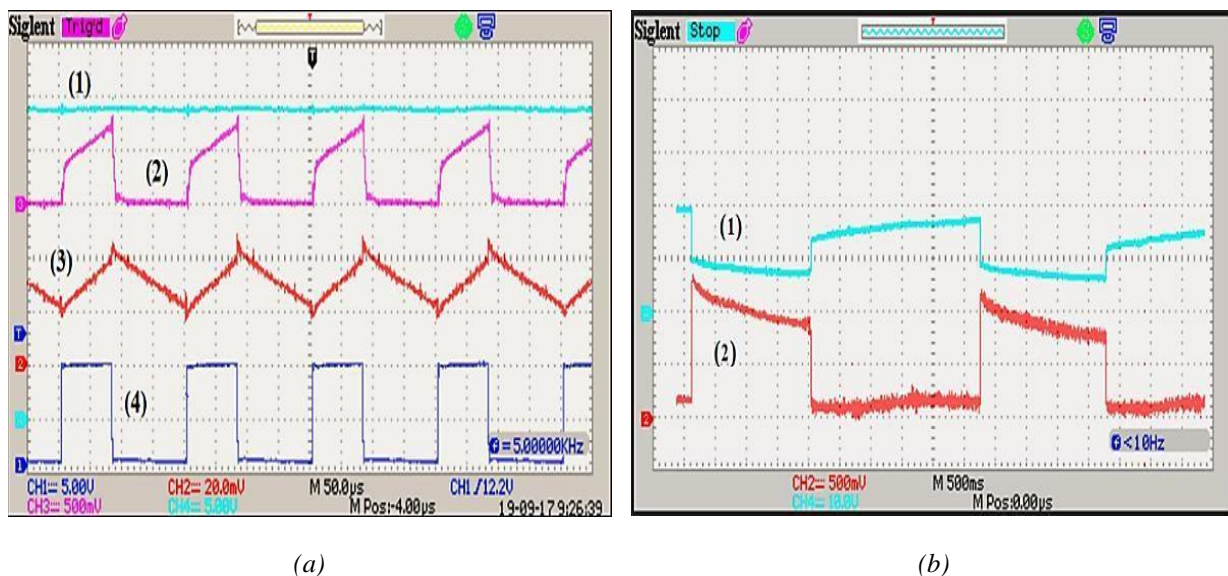


Figure IV.10. Résultats expérimentaux de l'émulateur de la PAC réalisé.

IV.4. Le bus continu

La tension de bus est obtenue, grâce à un deuxième convertisseur de type dc/dc Boost. Celui-ci est placé à la sortie de l'émulateur. Le schéma de principe est illustré sur la *Figure IV.6 (b)*. Le niveau de tension est maintenu dans un intervalle déterminé pour permettre la recharge du rack de batteries aux moments opportuns. Le circuit électronique de ce

Chapitre IV : Contrôle en temps réel d'une source hybride d'énergie : application à une architecture PEMFC - Batteries - Supercondensateurs

convertisseur est donné en *Figure IV.11*. Les signaux de commandes sont disponibles sur l'étage inférieur d'un driver de type IR2112 qui assure le contrôle d'un bras IGBT de référence SKM120GB75. L'étage de puissance est bien entendu isolé galvaniquement du circuit de commande. Le contrôle est assuré par l'interface dSPACE 1103 via Matlab Simulink.

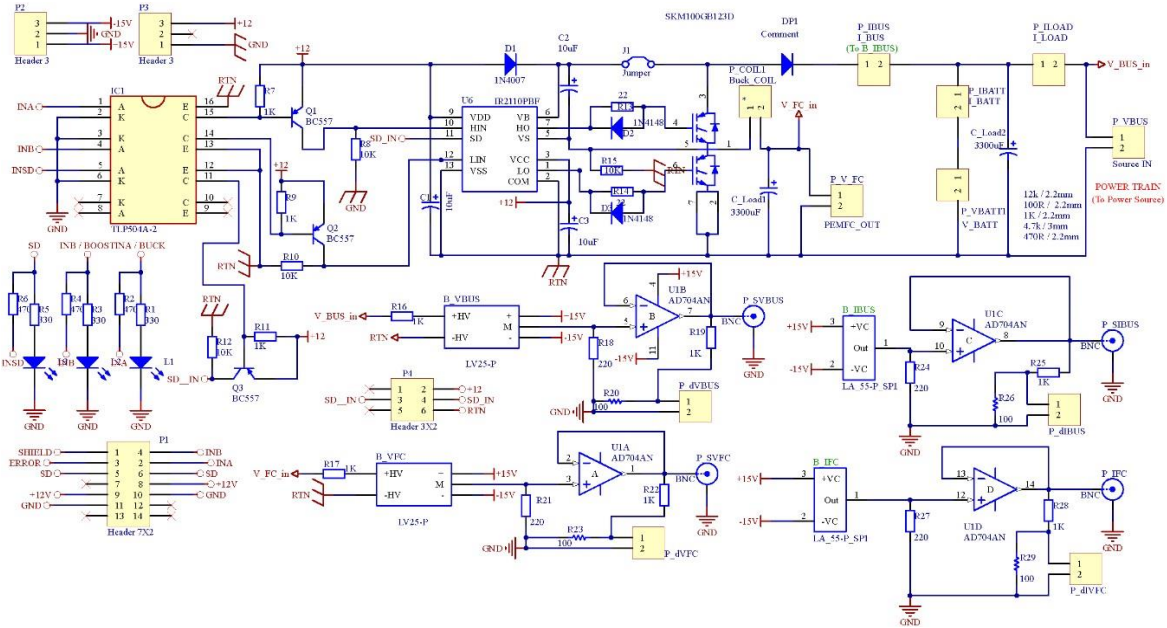


Figure IV.11. Schéma électronique du convertisseur Boost.

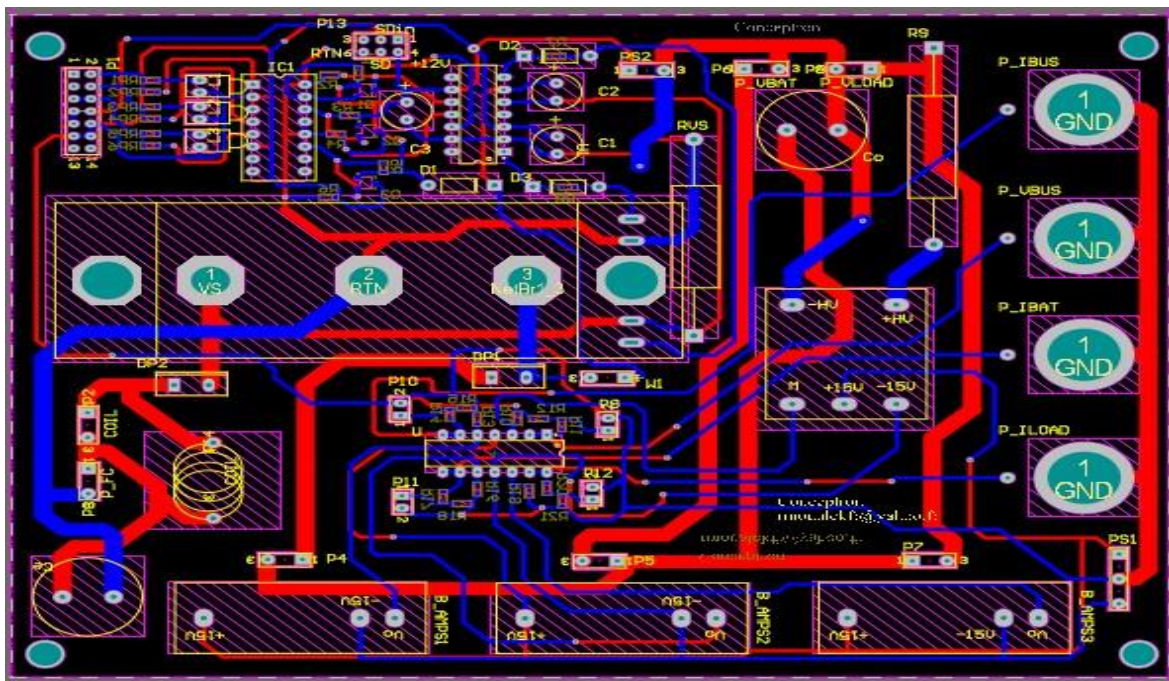


Figure IV.12. Circuit électronique PCB du convertisseur Boost.

Chapitre IV : Contrôle en temps réel d'une source hybride d'énergie : application à une architecture PEMFC - Batteries - Supercondensateurs

L'autre défi à surmonter est la connexion du double rack Batteries/Supercondensateur. La tension de bus étant fixée dans l'intervalle donné, ce double rack est connecté via un troisième convertisseur bidirectionnel en courant dont le schéma électrique est donné en *Figure IV.13*.

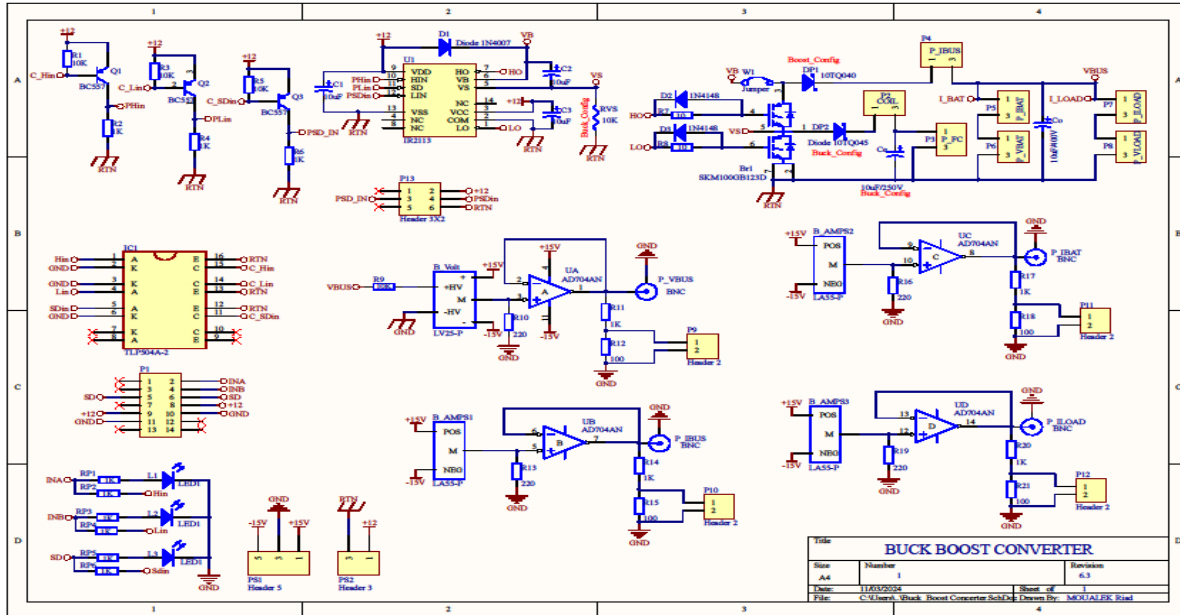


Figure IV.13. Schéma électrique du convertisseur Buck/Boost.

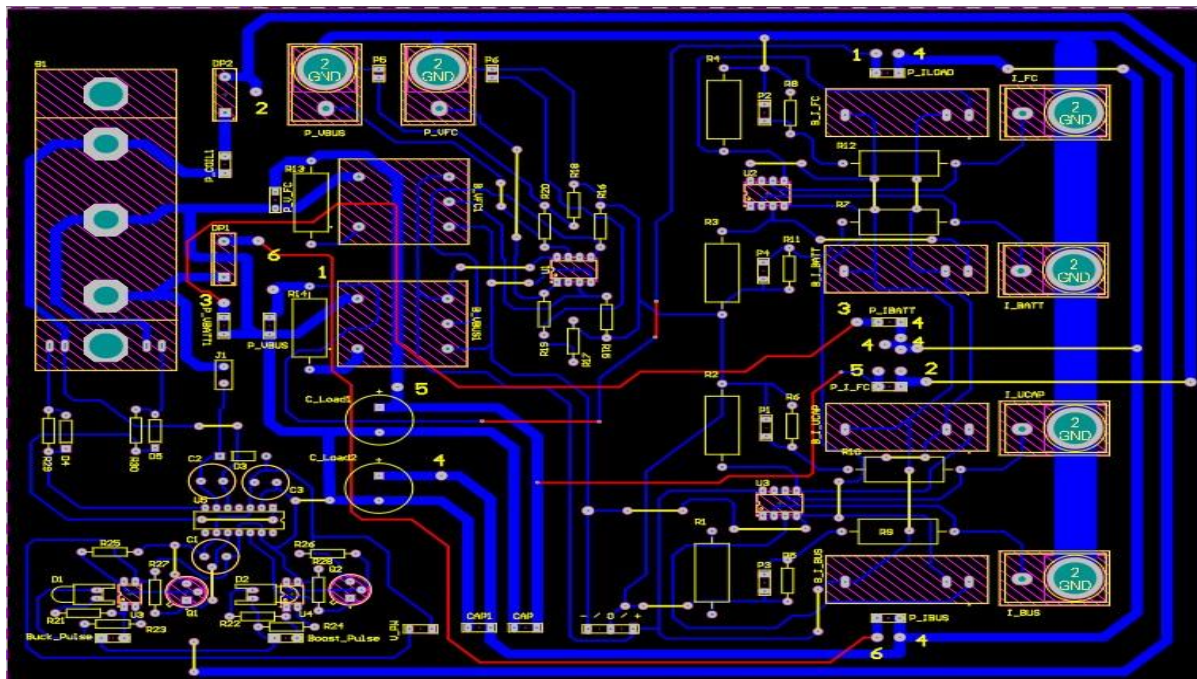


Figure IV.14. Schéma électrique du convertisseur Buck/Boost.

Chapitre IV : Contrôle en temps réel d'une source hybride d'énergie : application à une architecture PEMFC - Batteries - Supercondensateurs

La *Figure IV.14* illustre le circuit PCB réalisé. En fonction du niveau de tension présent sur le bus d'alimentation oscillant dans l'intervalle suscité, les signaux de commandes issus de la logique de contrôle sont injectés à travers un port RS232 sur l'étage supérieur ou inférieur du driver IR2112 chargé de générer les impulsions de commandes sur les gâchettes du bras IGBT noté Br1 sur la *Figure IV.13* référencé SKM100GB123D, faisant intervenir le coté Buck pour charger le rack du supercondensateur ou le coté Boost pour le décharger dans la charge à travers le bus quand le besoin se fait sentir.

IV.5. Résultats de simulation

Le circuit de simulation réalisé sous Matlab Simulink est donné en *Figure IV.15*. On aperçoit distinctement tous les blocs constituants précédemment décrits. Les résultats de simulation sont donnés en *Figure IV.16*.

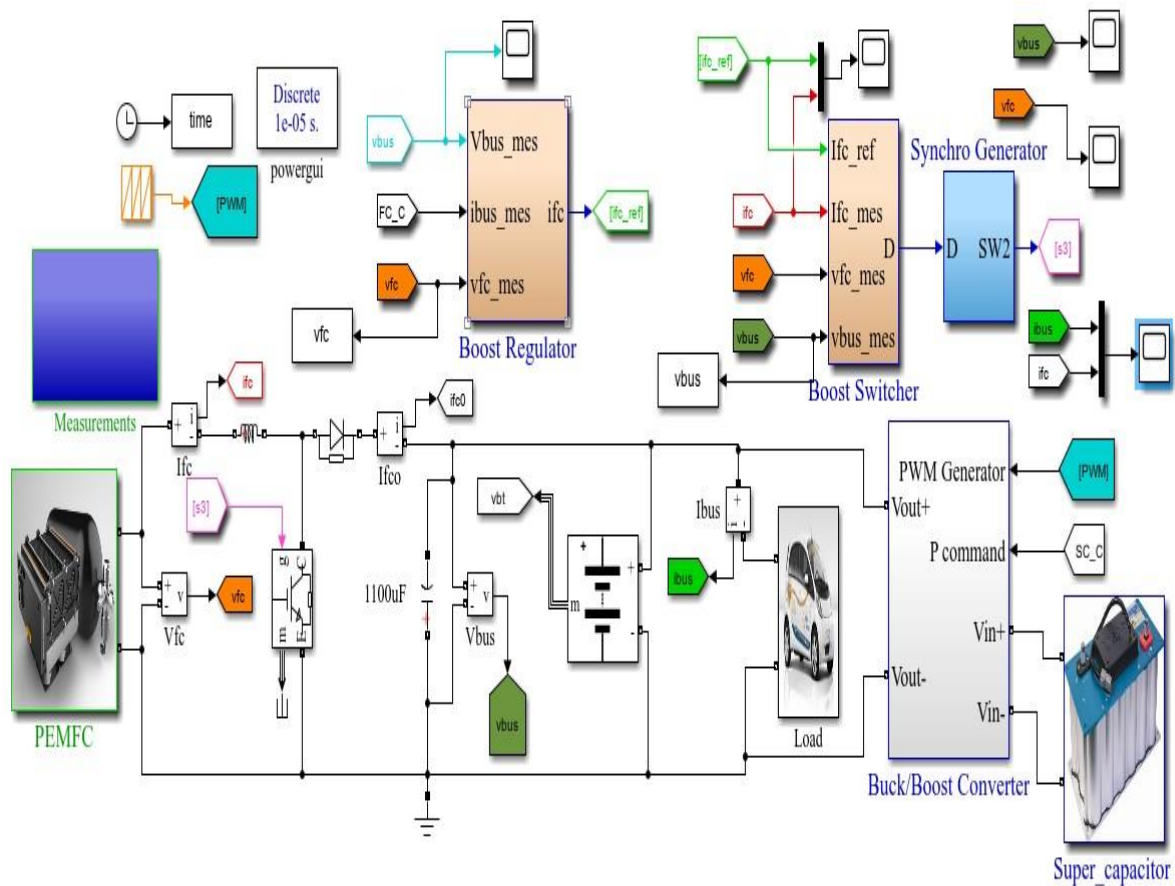


Figure IV.15. Circuit de simulation de la logique de contrôle en temps réel sous Matlab Simulink.

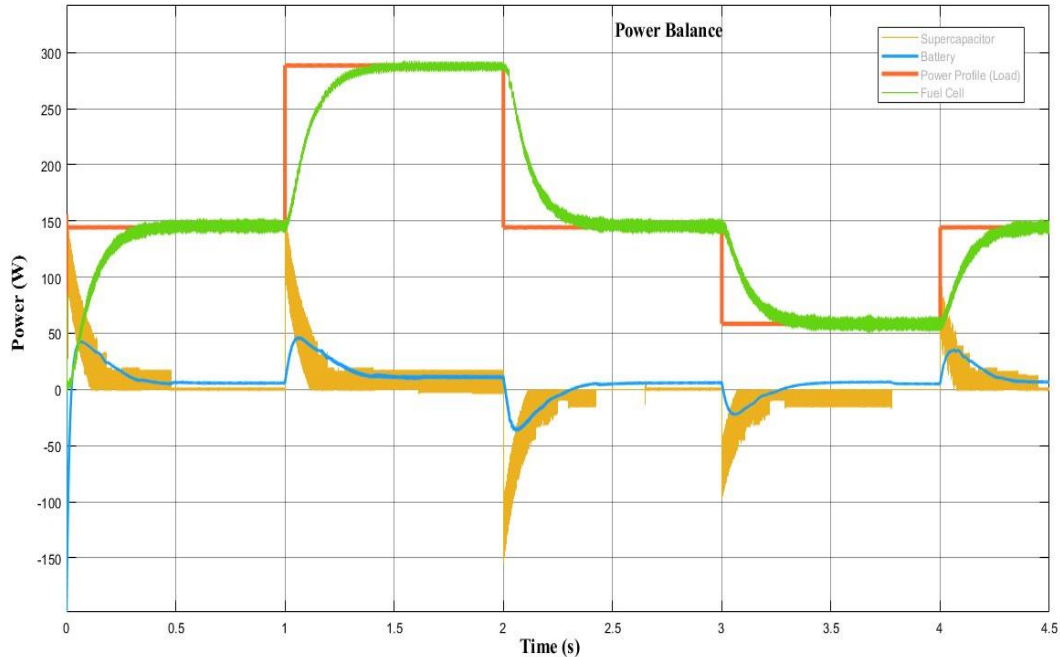


Figure IV.16. Résultats de simulation de la logique de commande en temps réel utilisée.

Sur la *Figure IV.16*, on relève en orange le profil de charge désirée. Il s'agit d'une succession d'étapes d'accélération et de freinage représentée ici par des appels de courant et d'étapes de relaxation. L'énergie issue de la batterie est représentée en bleue, on note que lors des appels de courants, l'énergie issue de la batterie est insuffisante, la logique de commande fait intervenir alors les supercondensateurs dont l'énergie est représentée en jaune. En même moment la pile à combustible intervient pour compléter le profil de charge demandé. On notera également que le système de gestion en temps réel ainsi réalisé, fait intervenir toutes les sources séparément chacune en fonction de son temps de réponse et en maintenant la charge tout le temps sous tension.

IV.6. Test sur banc d'essai

La *Figure IV.17* montre le schéma de commande adopté et proposé avec tous les sous-systèmes qui le constituent. Le circuit est réalisé en associant conjointement des modules Simulink et ControlDesk. La lecture des grandeurs analogiques courants et tensions sont acheminées de la carte électronique vers la dSPACE1103 par des câbles coaxiaux BNC. Les signaux PWM de commandes sont transmis par des fils torsadés isolés du connecteur RS232 de la dSPACE vers connecteurs DIN de l'interface de commande.

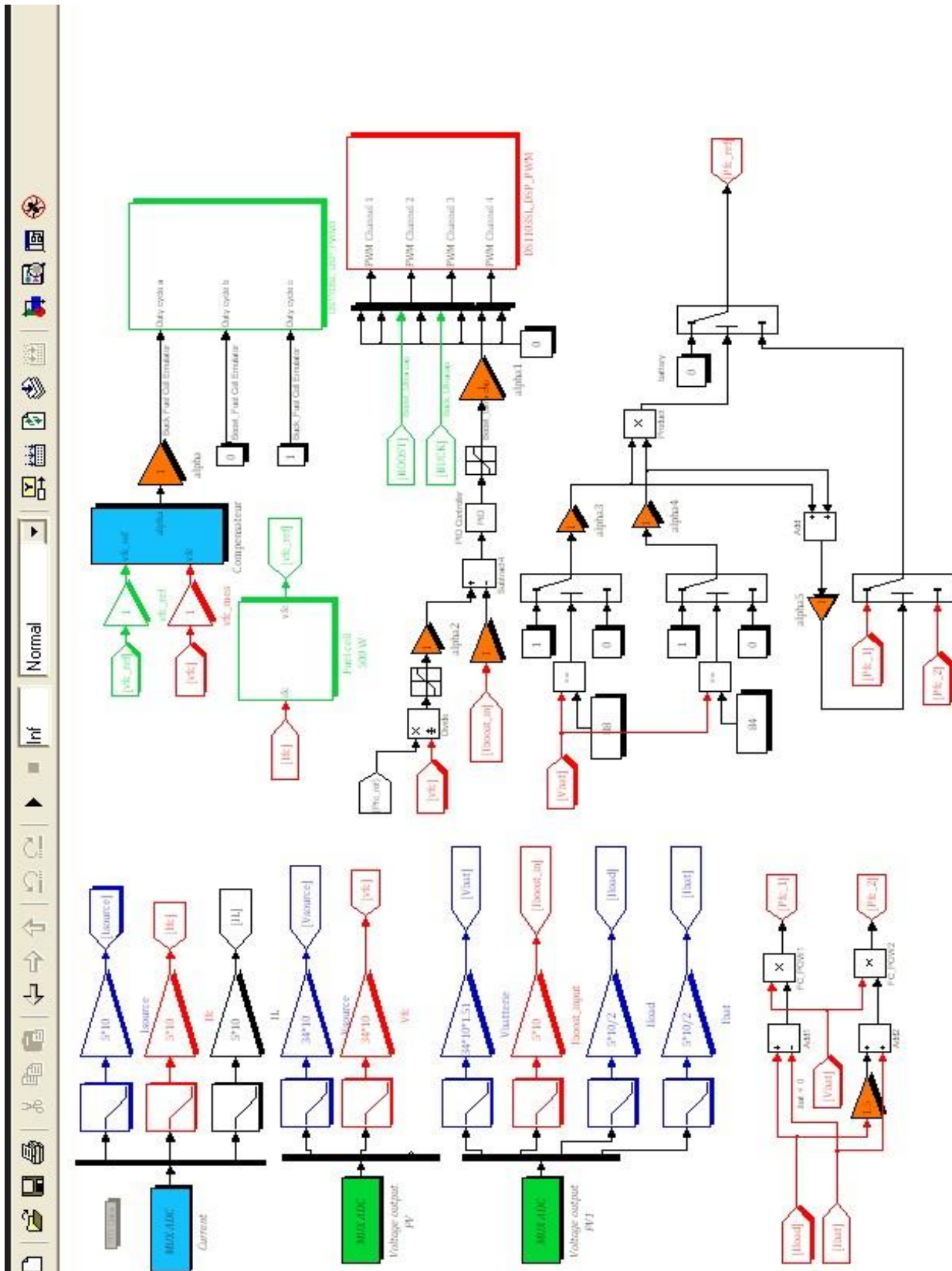


Figure IV.17. Circuit de commande Simulink/dSPACE 1103

Chapitre IV : Contrôle en temps réel d'une source hybride d'énergie : application à une architecture PEMFC - Batteries - Supercondensateurs

L'algorithme de contrôle est basé sur l'organigramme de la *Figure IV.18*. Le processus débute par la vérification et la lecture de la tension de Bus donc du rack de Batteries, V_{BUS} .

Si cette tension est inférieure à la tension de référence de 84 V, alors la pile à combustible est activée. Alimentant ainsi la charge et assurant la recharge des Batteries. Ce fonctionnement est maintenu jusqu'à ce que la tension de Bus atteigne la valeur de 88 V. Dès que la tension de Bus dépasse cette valeur, la pile à combustible est désactivée ; les Batteries assurent seules l'alimentation du système.

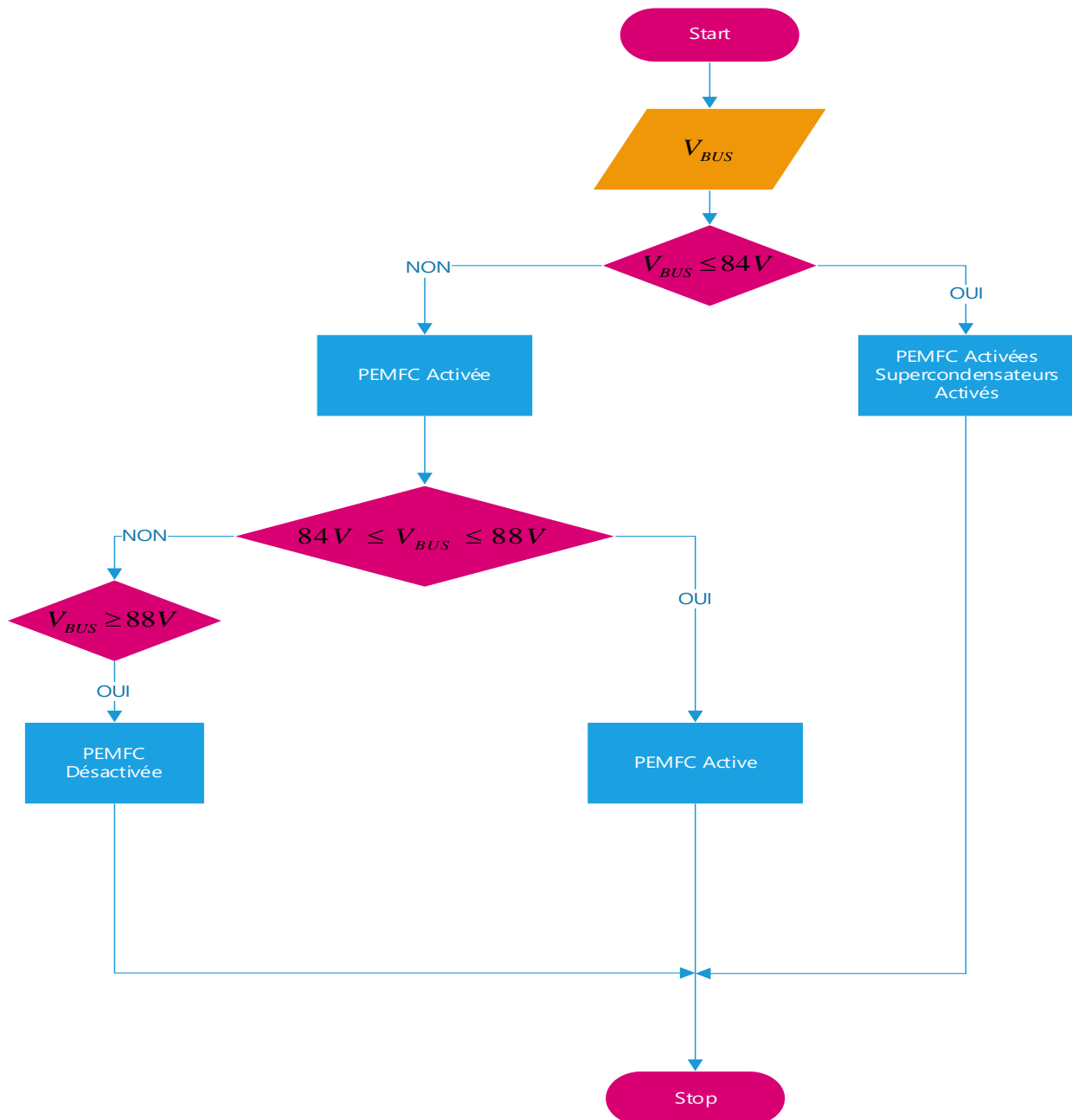


Figure IV.18. Organigramme de contrôl de la tension de Bus

Chapitre IV : Contrôle en temps réel d'une source hybride d'énergie : application à une architecture PEMFC - Batteries - Supercondensateurs

La stratégie de commande est exécutée de la manière suivante. Le courant de PAC noté I_{fc} fourni par l'émulateur est lu puis transmis à la logique de commande via la dSPACE. L'algorithme de control réagit et calcul en temps réel le rapport cyclique nécessaire puis le retransmet via la dSPACE au convertisseur Buck qui produit la nouvelle tension de pile V_{fc} correspondante au courant demandé en fonction du modèle de la PAC. En aval de la PAC se trouve le deuxième convertisseur de type Boost. La tension et le courant en sortie du Boost sont lus et transmis de la même manière que pour l'émulateur, vers la logique de contrôle. Celle-ci calcule le rapport cyclique permettant au Boost de produire la tension de Bus nécessaire pour atteindre le profil de puissance demandé par la charge. Au même moment les grandeurs de l'ESS sont lues et transmises via la dSPACE. L'algorithme de contrôle actionne alors le convertisseur bidirectionnel soit en faisant intervenir l'étage inférieur durant la période de stress et permettre la décharge du supercondensateur afin d'épauler les batteries, soit l'étage supérieur durant les périodes de relaxation afin de permettre la charge du supercondensateur pour les préparer à un futur appel de courant. Les trois phases de fonctionnement sont alors définies comme suit :

- a) Phase 1 : $V_{BUS} \leq 84V$: Dans cet état, les batteries partiellement déchargées ne sont pas en mesure de fournir seules l'énergie nécessaire à la charge. Par conséquent, la PEMFC est activée et fournit toute l'énergie pour alimenter le bus d'alimentation et assurer la recharge des batteries.
- b) Phase 2 : $84V < V_{BUS} \leq 88V$: Dans ce cas, la PEMFC alimente toujours l'ensemble du système, mais les batteries sont maintenues en mode de charge lente jusqu'à ce qu'elles atteignent leur état de charge complet.
- c) Phase 3 : $V_{BUS} > 88V$: La pile à combustible s'éteint lorsque les batteries atteignent leur état de charge complet. Les Batteries assure seules alors l'alimentation de la charge, jusqu'à ce que leurs niveaux de tension donc celle du bus baisse à 84 V.

Toutes les grandeurs mesurées sont gérées à l'aide de l'outil MATLAB/Simulink via l'interface de contrôle dSPACE pour réaliser l'algorithme de calcul. Les courbes présentées dans la *Figure IV.19, IV.20 et IV.21*, montrent les résultats obtenus pour différents fonctionnements du système opérationnel complet.

La *Figure IV.19* est obtenue pour un fonctionnement dit normal ou de croisière. La pile à combustible est activée sa tension montrée en *IV.19.a*, est aux alentours de 38V. la tension de Bus donnée en *IV.19.b*, est de 84V, ce qui explique le déclenchement de la PAC. La charge est alors alimentée respectivement par le courant de la PAC et le Courant de Batteries illustrés respectivement par les *Figures IV.19.c et IV.19.f*. ces deux courants forment ensemble le courant de Bus donné en *IV.19.e*. aucun stress n'est appliqué, le courant de supercondensateur est nul ; il est donné par I_{UC} en *Figure IV.19.f*.

Chapitre IV : Contrôle en temps réel d'une source hybride d'énergie : application à une architecture PEMFC - Batteries - Supercondensateurs

La *Figure IV.20* est obtenue après avoir appliqué un stress sur les Batteries. Ce fonctionnement est émulé par la connexion d'une résistance très faible comme charge. La tension de la Batterie est descendue aux alentours de 70V comme illustré en *IV.20.a*. la pile est activée et assure la recharge des Batteries et les besoins du Bus d'alimentation ; sa tension est de 37V. après le stress appliqué, les Batteries sont maintenues à l'état de charge lente. Les courants de Batterie et de Supercondensateurs montrés en *IV.20.f*, ont changé de signes démontrant l'inversion de sens. Ainsi les Batteries absorbent le courant de recharge après avoir fournies une partie du courant de Bus ; le courant de supercondensateur est devenu nul après avoir fourni l'essentiel du courant du Bus d'alimentation durant le stress subit par les Batteries.

La *Figure IV.21* est obtenue durant la phase de stress appliquée au dispositif. Durant ce fonctionnement la tension de la PAC est constante ; de l'ordre de 38V. un appel de courant est appliqué provoquant un stress sur les Batteries amenant la tension à ces bornes à chuter drastiquement jusqu'à atteindre 77V. le stress est alors levé. Le courant de source est donné en *IV.21.d* ; il est à l'origine du courant de la PAC donné en *IV.21.c*. ces deux courants varient dans les mêmes proportions. Le courant issu des Batteries donné en *IV.21.f*, augmente provoquant la décharge de celles-ci. Durant la même phase, le courant de supercondensateur augmente aussi. Son évolution dans le sens négatif donné en *IV.21.f*, renseigne sur l'état de décharge du rack de supercondensateurs. Le courant de Bus est donné en *IV.21.e*.

Les différents rapports cycliques des convertisseurs sont donnés par les afficheurs numériques du control desk de la dSPACE 1103. La *Figure IV.22* montre le système opérationnel complet du banc d'essai construit.

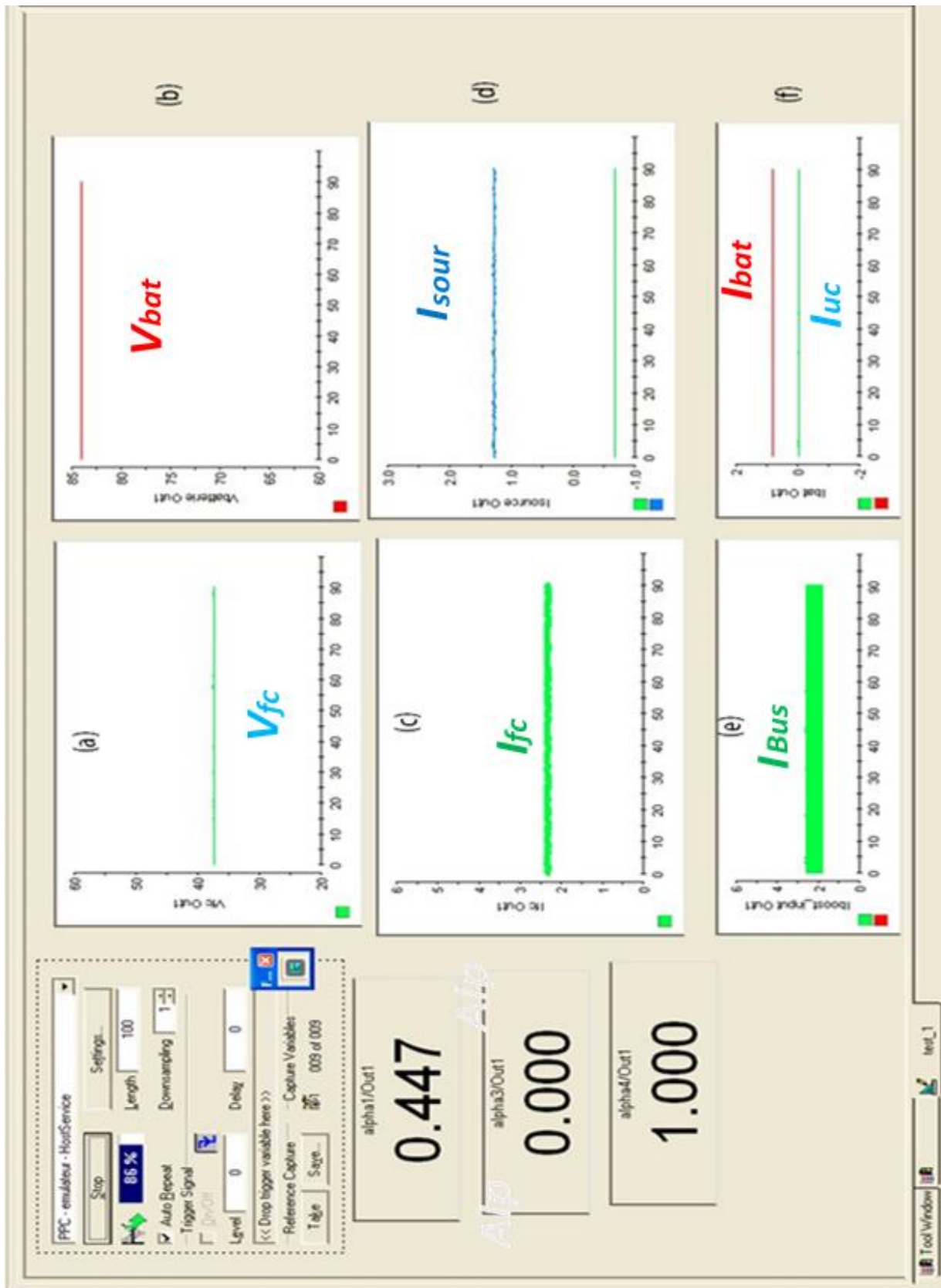


Figure IV.19. Résultats expérimentaux du banc d'essai de la logique de contrôle.

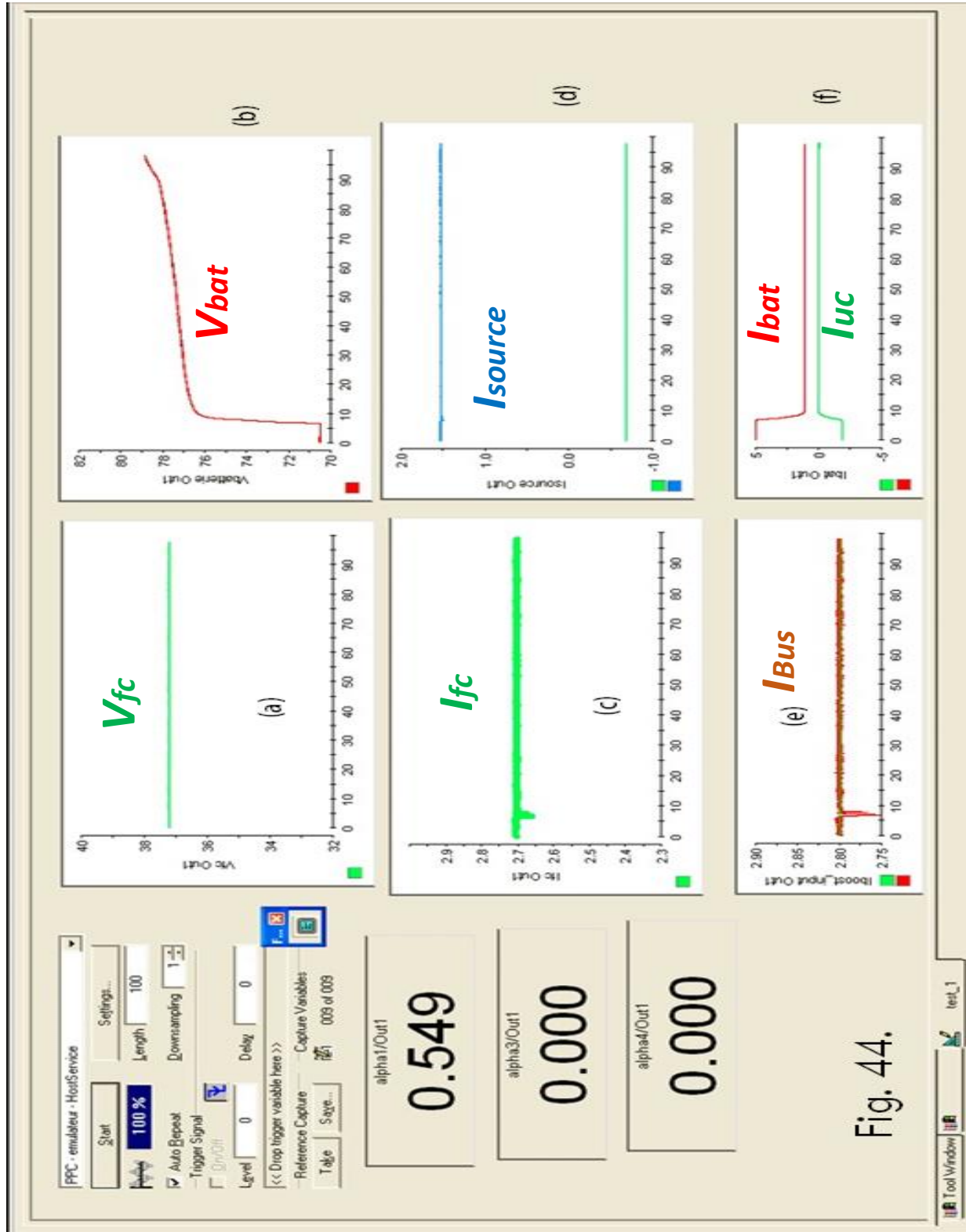


Fig. 44.

Figure IV.20. Résultats expérimentaux du banc d'essai de la logique de contrôle.

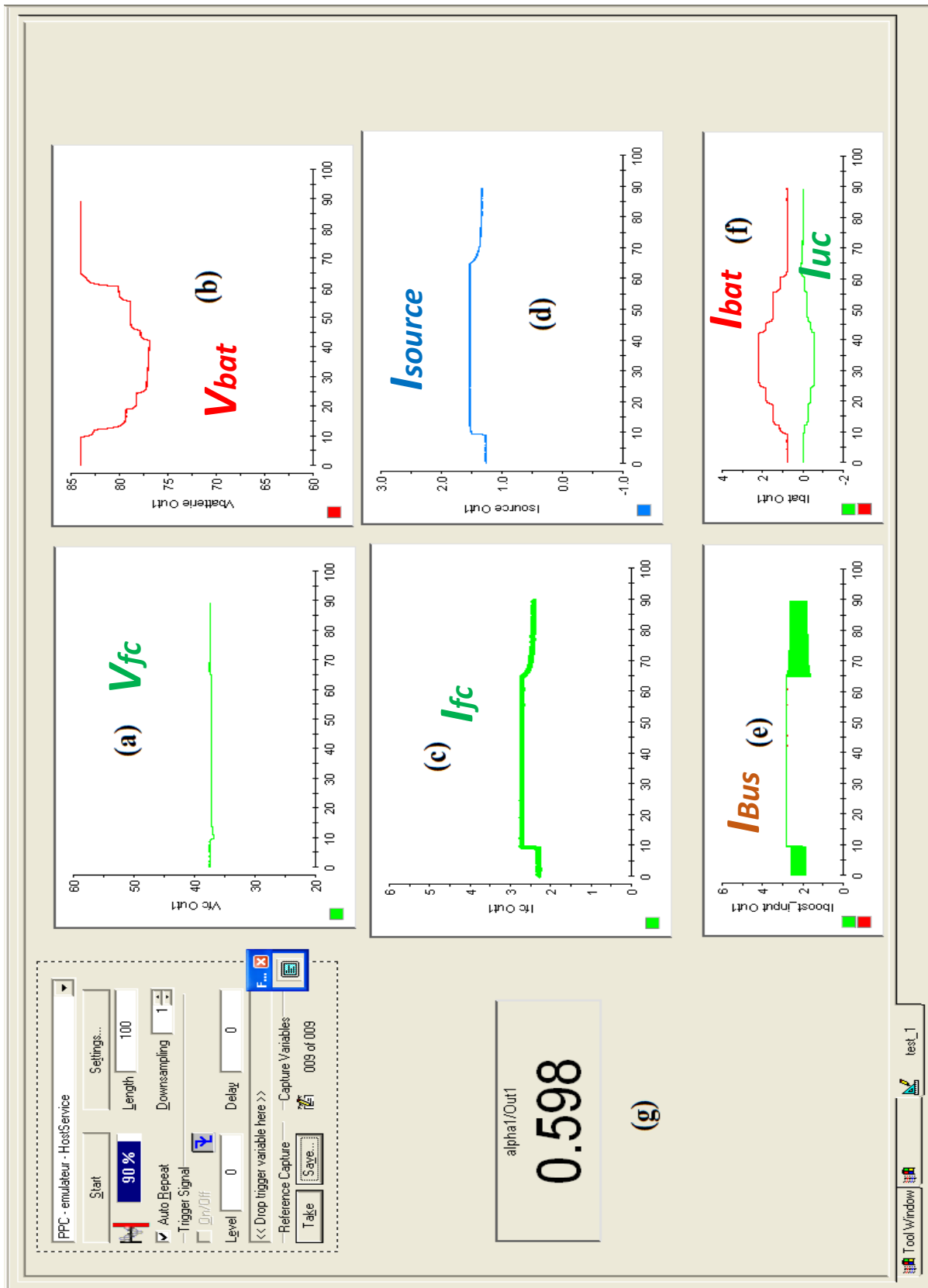


Figure IV.21. Résultats expérimentaux du banc d'essai de la logique de contrôle.

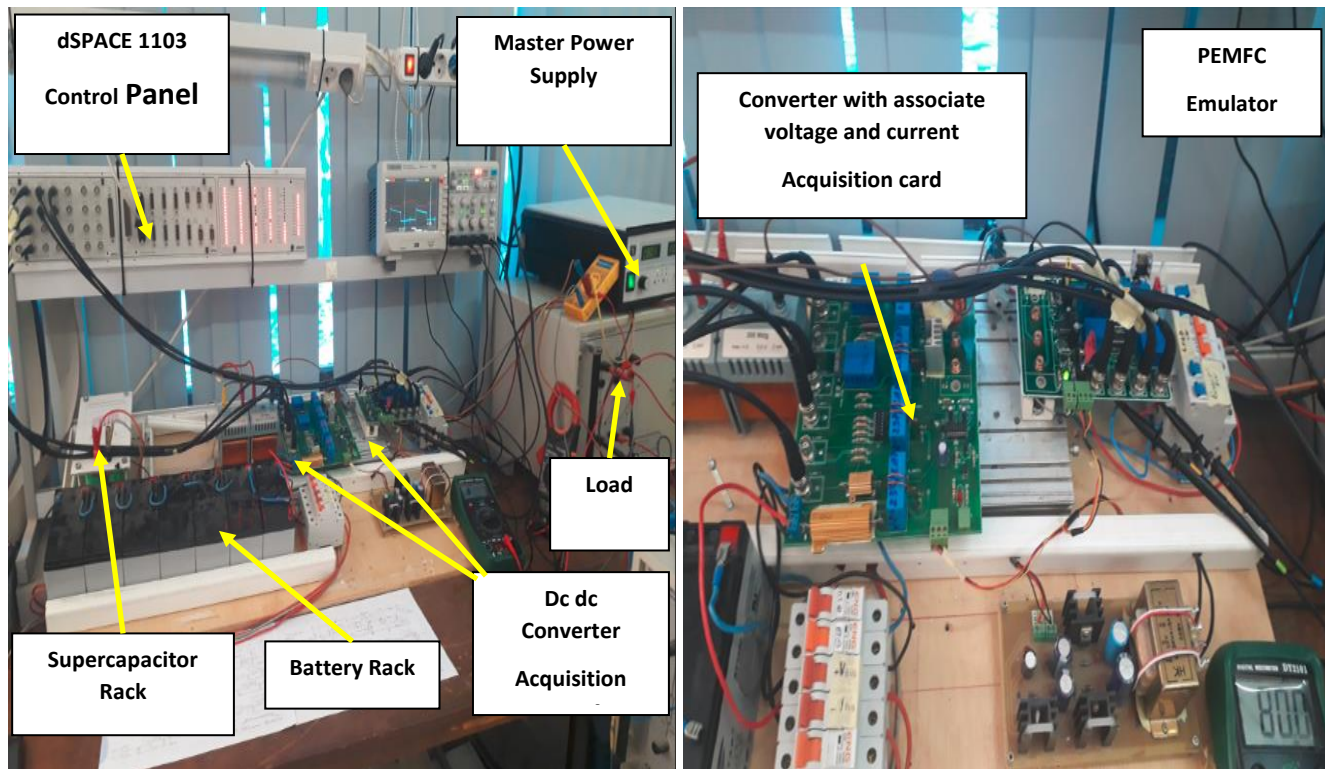


Figure IV.22. Banc d'essai du système de gestion d'énergie.

IV.7. Conclusion

L'émulateur de pile à combustible à membrane échangeuse de protons (*PEMFC*) utilisé pour alimenter en énergie le système de puissance du véhicule électrique présente un comportement similaire à celui d'une véritable pile à combustible malgré les nombreuses contraintes imposées lors des tests. La logique de contrôle en temps réel s'est avérée efficace pour satisfaire les différents stress imposés par la charge. L'émulateur a reproduit fidèlement les caractéristiques et le fonctionnement d'une pile à combustible réelle, ce qui permet d'évaluer de manière précise et réaliste les performances du système.

De plus, la topologie électronique et le protocole de gestion de l'énergie (EMSP) recommandés dans cette étude sont conçus de manière à répondre aux besoins énergétiques spécifiques du véhicule électrique. Ils prennent en compte les exigences de la source d'énergie primaire à savoir son temps de réponse, en particulier et donc l'adaptation à la dynamique de la PEMFC (telle que les variations de tension et de courant) et la gestion des besoins de charge grâce à l'ESS (système de stockage d'énergie) associé. Cela garantit une utilisation optimale de la pile à combustible et permet de répondre efficacement aux demandes de puissance du véhicule. Les résultats expérimentaux ont également traduit l'efficacité de la méthode de la gestion en temps

Chapitre IV : Contrôle en temps réel d'une source hybride d'énergie : application à une architecture PEMFC - Batteries - Supercondensateurs

réelle qui garantit la réponse du système ESS avec son convertisseur bidirectionnel pour satisfaire à la demande de la charge en besoins énergétiques.

Les résultats obtenus à la fin de ce travail démontrent que la configuration utilisée, comprenant l'émulateur de pile à combustible PEMFC et les autres composants du système, reste performante, fiable et simple à mettre en œuvre en termes de ressources matérielles. Même en présence d'un convertisseur supplémentaire, le système conserve ses qualités et sa robustesse. Il est capable de fournir des résultats en termes de disponibilité d'énergie, assurant ainsi une alimentation continue et fiable au véhicule électrique. De plus, grâce à une gestion efficace de l'énergie en temps réel, le système offre une autonomie accrue, ce qui est un critère essentiel pour les véhicules électriques.

En résumé, l'utilisation d'une source hybride pile à combustible PEMFC-Batteries-Supercondensateurs, associé à notre topologie électronique et au protocole de gestion de l'énergie mis en place est recommandés. Il permet de répondre de manière optimale aux besoins énergétiques des véhicules électriques. Les résultats obtenus confirment la performance, la fiabilité et la simplicité de la configuration utilisée, tout en offrant des avantages significatifs en termes de disponibilité d'énergie et d'autonomie.

Conclusion générale

Conclusion générale

La modélisation de la source d'énergie et les composants qui la constituent est une étape importante pour la définition d'une stratégie de gestion d'énergie efficace. Cela permet de mieux maîtriser le fonctionnement et la réaction de chaque composant. Ainsi la compréhension des phénomènes physico-chimiques au sein de la PEMFC et des batteries est une condition clés permettant de quantifier l'énergie disponible à tout instant afin de déterminer le composant à contrôler. Cela passe par l'identification des paramètres influents sur les performances de la source tel la température, la pression et la nature des gaz et les propriétés et la des matériaux la constituant. Ce-sont en tout évidence des leviers d'optimisation et de prédiction des performances dans différentes conditions de fonctionnement. La courbe de polarisation, le rendement et la densité de puissance en sont les principaux objectifs.

Dans le travail que nous avons présenté, nous avons conçu un système d'alimentation pour un véhicule purement électrique basé sur une pile à combustible PEMFC comme source principale. Cette réalisation s'est appuyée sur un modèle de simulation confirmé ; nous avons démontré que le système conçu se comporte typiquement comme une pile à combustible lors des variations de charge. Le convertisseur Boost destiné à produire la tension du bus remplit également sa fonction. Les courbes définies montrent que l'algorithme appliqué à ce convertisseur a assuré le bon fonctionnement du système, qui consiste à surveiller toute défaillance de l'alimentation électrique. Après plusieurs tests et expériences, nous avons réussi à concevoir un système d'alimentation pour un véhicule électrique pur dont le fonctionnement en laboratoire est resté efficace.

À juste titre, l'émulateur de pile à combustible PEMFC utilisé pour alimenter le système de puissance du véhicule électrique a montré un comportement réaliste de pile à combustible, même sous diverses contraintes imposées lors des tests. Cela confirme la robustesse et la fiabilité du modèle de simulation utilisé, ainsi que la pertinence de la PEMFC comme source d'énergie pour les applications de véhicules électriques.

La topologie électronique et le protocole de gestion de l'énergie recommandés dans cette étude ont démontré leur capacité à répondre aux besoins énergétiques du véhicule électrique tout en respectant les exigences spécifiques de la source d'énergie. En particulier, ils ont permis d'accommoder les dynamiques des différentes sources utilisées, et de gérer efficacement les besoins en charge grâce au système de stockage d'énergie (ESS) associé. Les courbes et les résultats obtenus montrent que l'algorithme appliqué au convertisseur Boost a assuré le bon fonctionnement du système, en surveillant toute défaillance potentielle de l'alimentation électrique.

L'utilisation de divers convertisseurs de l'électronique de puissance a été essentielle pour la réalisation de ce système. Un convertisseur Buck a été utilisé pour l'émulateur de la PEMFC, garantissant une régulation efficace de la tension délivrée par la PAC. Un convertisseur Boost a été employé pour générer la tension du bus, assurant ainsi une alimentation stable et conforme aux exigences du système du rack de Batteries. Enfin, un convertisseur bidirectionnel en courant a été intégré entre la batterie et les supercondensateurs, permettant une gestion dynamique de l'énergie

et optimisant les performances du système de stockage malgré les différentes dynamiques des deux sources. Les résultats expérimentaux ont confirmé l'efficacité et la fiabilité de ces convertisseurs, démontrant leur rôle crucial dans l'optimisation de l'ensemble du système d'alimentation.

Les tests et expériences réalisés ont confirmé que la configuration du système reste performante, fiable et simple, même avec l'ajout d'un convertisseur supplémentaire. En termes de disponibilité de puissance et d'autonomie, les résultats en temps réel obtenus sont suffisamment précis. Le système d'alimentation conçu a non seulement maintenu son intégrité en laboratoire, mais a également montré des perspectives prometteuses pour des applications réelles.

Les avancées réalisées dans cette étude ouvrent la voie à de nouvelles innovations dans le domaine des systèmes d'alimentation pour véhicules électriques. La compréhension approfondie des comportements dynamiques de la PEMFC et la mise en œuvre réussie des protocoles de gestion de l'énergie offrent des bases solides pour le développement futur de technologies de piles à combustible plus performantes et durables. Toutefois, des recherches supplémentaires seront nécessaires pour surmonter les défis restants, notamment en termes de coût des matériaux et de durabilité à long terme.

En conclusion, ce travail représente une contribution significative à la transition vers des systèmes de transport plus durables et efficaces. La modélisation et les résultats obtenus renforcent la position des piles à combustible PEMFC comme une solution clé pour l'avenir des véhicules électriques propres, tout en soulignant l'importance d'une gestion énergétique optimisée basée sur l'emploi de convertisseurs de l'électronique de puissance afin de maximiser les performances et la fiabilité des systèmes d'alimentation hybrides multi-sources.

En perspective de notre travail il serait pertinent d'explorer l'intégration d'un système de traction pour un véhicule tout électrique. Cette étude complémentaire, permettrait d'optimiser les performances globales du véhicule en tenant compte des interactions entre le système de gestion coté continu et le système de propulsion. Une telle approche holistique pourrait conduire à une amélioration significative de l'efficacité énergétique, de l'autonomie et des performances dynamiques du véhicule. De plus elle ouvrirait la voie à des stratégies de contrôle plus avancées prenant en compte non seulement la gestion de l'énergie, mais aussi les aspects liés à la traction, tels que la récupération d'énergie au freinage et l'optimisation du couple moteur en fonction des conditions de conduite.

Annexes

ANNEXES 1 :

P_{th} : Pertes thermiques.

P_e : Puissance de la PAC.

V_c : Tension par élément de pile

$$P_{th} = P_e \left(\frac{1.25}{V_c} - 1 \right) \text{ en Watts}$$

Seulement 40 % de cette chaleur est évacuée par l'air, avec une capacité thermique spécifique C_p circulant à un débit de $\dot{m} \text{ Kg} \cdot \text{s}^{-1}$, et soumis à une variation de température T . on peut donc écrire :

$$0.4 \cdot P_e \left(\frac{1.25}{V_c} - 1 \right) = \dot{m} \cdot C_p \cdot \Delta T$$

En substituant les valeurs connues, c'est-à-dire, $C_p = 1004 \text{ JKg}^{-1}\text{K}^{-1}$, $\Delta T = 30 \text{ K}$, et $V_c = 0.6 \text{ V}$, et en réarrangeant, on obtient l'équation suivante exprimant le refroidissement du débit d'air :

$$\dot{m} = 1.4 \cdot 10^{-5} \cdot P_e \quad \text{Kg s}^{-1}$$

En [18], à l'Annexe 2, et en section A2.2, il est montré que le débit d'air réactif est :


$$\dot{m} = 3.57 \cdot 10^{-7} \cdot \lambda \cdot \frac{P_e}{V_c} \quad \text{Kg s}^{-1}$$

Si l'air réactif et l'air de refroidissement sont identiques, alors ces deux quantités sont égales, et donc les deux équations peuvent être égalées. En simplifiant P_e , en remplaçant V_c et en résolvant pour λ , nous obtenons.

$$\lambda = \frac{14 \cdot 0.6}{0.357} \approx 24$$

ANNEXES 2 :

Choix industriels sur le type de batteries à utiliser en fonction de l'équipement à alimenter.

Application	Primary or secondary battery
Utility systems (load-leveling) Electric vehicle hybrid (HEV) Central telephone system Fork lifts Electric vehicles (EV) Golf carts Electric bikes Automotive SLI Spacecraft power Emergency lighting Portable tools Laptop computers Transceivers Cordless telephone Camcorders Portable equipment (e.g. Dustbuster, shaver) Cellular phone PDAs, Palm devices Radio Pagers Flashlight Toys Cameras Instruments Hearing aids Implants Smoke detectors Remote controllers Memory back-up	SECONDARY  PRIMARY

ANNEXES 3 :

1- Nomenclature du système IEC pour les Batteries primaires.

Nomenclature	Number of cells	System letter (Table 4.2c)	Shape (Table 4.2b)	Diameter, mm	Height, mm	Example
CR2025	1	C	R	20	2.5	A unit round battery having dimensions shown and electro-chemical system letter C of Table 4.2c (Li/MnO ₂)

2- Nomenclature du système IEC pour la forme des Batteries primaires.

Letter designation	Shape
R	Round-Cylindrical
P	Non-Round
F	Flat (layer built)
S	Square (or Rectangular)

Notes:

(1)	No suffix	Carbon-zinc
	C	Carbon-zinc industrial
	CD	Carbon-zinc industrial, heavy duty
	D	Carbon-zinc, heavy duty
	F	Carbon-zinc, general purpose
(2)	A	Alkaline
	AC	Alkaline industrial
	AP	Alkaline photographic
(3)	Z	Zinc/air
	ZD	Zinc/air, heavy duty
(4)	SO	Silver oxide
	SOP	Silver oxide photographic

3- Codes de lettres désignant le système électrochimique des batteries primaires.

TABLE 4.2c Letter Codes Denoting Electrochemical System of Primary Batteries

ANSI	IEC	Negative electrode	Electrolyte	Positive electrode	Nominal voltage (V)
(1)	—	Zinc	Ammonium chloride, Zinc chloride	Manganese dioxide	1.5
	A	Zinc	Ammonium chloride, Zinc chloride	Oxygen (air)	1.4
LB	B	Lithium	Organic	Carbon monofluoride	3
LC	C	Lithium	Organic	Manganese dioxide	3
	E	Lithium	Non-aqueous inorganic	Thionyl chloride	3.6
LF	F	Lithium	Organic	Iron sulfide	1.5
	G	Lithium	Organic	Copper dioxide	1.5
A ⁽²⁾	L	Zinc	Alkali metal hydroxide	Manganese dioxide	1.5
Z ⁽³⁾	P	Zinc	Alkali metal hydroxide	Oxygen (air)	1.4
SO ⁽⁴⁾	S	Zinc	Alkali metal hydroxide	Silver oxide	1.55

ANNEXES 4 :

1- *Nomenclature IEC pour les batteries primaires typiques rondes, plates et carrées.*

IEC designation	Nominal dimensions, mm					ANSI designation	Common designation
	Diameter	Height	Length	Width	Thickness		
Round batteries							
R03	10.5	44.5				24	AAA
R1	12.0	30.2				—	N
R6	14.5	50.5				15	AA
R14	26.2	50.0				14	C
R20	34.2	61.5				13	D
Flat cells							
F22			24	13.5	6.0		
Square batteries							
S4		125.0	57.0	57.0			

*Chart is not complete—only a sampling of sizes is shown. Dimensions are used for identification only: Complete dimensions can be found in the relevant specification sheets listed in IEC 60086-2.

2- *Exemples de nomenclature IEC pour les batteries primaires.*

IEC Nomenclature	Number of cells	System letter (Table 4.2c)	Shape (Table 4.2b)	Cell (Table 4.3a)	C, P, S, X, Y	Parallel	Groups in parallel	Example
R20	1	None	R	20	*			A unit round battery using basic R20 type cell and electrochemical system letter (none) of Table 4.2c
LR20	1	L	R	20	*			Same as above, except using electrochemical system letter L of Table 4.2c
6F22	6	None	F	22	*			A 6-series multicell battery using flat F22 cells and electrochemical system letter (none) of Table 4.2c
4LR25-2	4	L	R	25	*		2	A multicell battery consisting of two parallel groups, each group having four cells in series of the R25 type and electrochemical system, letter L, of Table 4.2c
CR17345	1	C	R	see Section 4.4.1				A unit round battery, with a diam. of 17 mm and height of 34.5 mm, and electrochemical system, letter C, of Table 4.2c

* If required, letters C, P, or S will indicate different performance characteristics and letters X and Y different terminal arrangements.

ANNEXES 5 :

1- Standards IEC internationaux des Batteries.

Publication	Title	Electrochemical systems
IEC 60086-1, IEC 60086-2	Primary Batteries; Part 1 General, and Part 2, Specification Sheets	Zinc-carbon Zinc/air Alkaline-manganese dioxide Mercuric oxide Silver oxide Lithium/carbon monofluoride Lithium/manganese dioxide Lithium/copper oxide Lithium/chromium oxide Lithium/thionyl chloride
IEC 60086-3	Watch Batteries	
IEC 60095	Lead-Acid Starter Batteries	Lead-acid
IEC 60254	Lead-Acid Traction Batteries	Lead-acid
IEC 60285	Sealed Nickel-Cadmium Cylindrical Rechargeable Single Cells	Nickel cadmium
IEC 60509	Sealed Nickel-Cadmium Button Rechargeable Single Cells	Nickel-cadmium
IEC 60622	Sealed Nickel-Cadmium Prismatic Rechargeable Single Cells	Nickel-cadmium
IEC 60623	Vented Nickel-Cadmium Prismatic Rechargeable Cells	Nickel-cadmium
IEC 60952	Aircraft Batteries	Nickel-cadmium Lead-acid
IEC 60986	Stationary Lead-Acid Batteries	Lead-acid
IEC 61056	Portable Lead-Acid Cells and Batteries	Lead-acid
IEC 61150	Sealed Nickel-Cadmium Rechargeable Monobloc Batteries in Button Cell Design	Nickel-cadmium
IEC 61436	Sealed Nickel-Metal Hydride Rechargeable Cells	Nickel-metal hydride
IEC 61440	Sealed Nickel-Cadmium Small Prismatic Rechargeable Single Cells	Nickel-cadmium

Note: See Table 4.11a for IEC Safety Standards.

2- Standard National ANSI des Batteries.

Publication	Title	Electrochemical systems
ANSI C18.1M, Part 1	Standard for Portable Primary Cells and Batteries with Aqueous Electrolyte	Zinc-carbon Alkaline-manganese dioxide Silver oxide Zinc/air
ANSI C18.2M, Part 1	Standard for Portable Rechargeable Cells and Batteries	Nickel-cadmium Nickel-metal hydride Lithium-ion
ANSI C18.3M, Part 1	Standard for Portable Lithium Primary Cells and Batteries	Lithium/carbon monofluoride Lithium/manganese dioxide

Note: see Table 4.11a for ANSI Safety Standards.

ANNEXES 5 (Suite) :

3- Standard Militaire Américain (MIL : Us Military Standards).

Publication	Title	Electrochemical systems
MIL-B-18	Batteries Non-Rechargeable	Zinc-carbon, mercury
MIL-B-8565	Aircraft Batteries	Various
MIL-B-11188	Vehicle Batteries	Lead-acid
MIL-B-49030	Batteries, Dry, Alkaline (Non-Rechargeable)	Alkaline-manganese dioxide
MIL-B-55252	Batteries, Magnesium	Magnesium
MIL-B-49430	Batteries, Non-Rechargeable	Lithium/sulfur dioxide
MIL-B-49436	Batteries, Rechargeable, Sealed Nickel-Cadium	Nickel-cadmium
MIL-B-49450	Vented Aircraft Batteries	Nickel-cadmium
MIL-B-49458	Batteries, Non-Rechargeable	Lithium/manganese dioxide
MIL-B-49461	Batteries, Non-Rechargeable	Lithium/thionyl chloride
MIL-B-55130	Batteries, Rechargeable, Sealed Nickel-Cadmium	Nickel-cadmium
MIL-B-81757	Aircraft Batteries	Nickel-cadmium
MIL-PRF-49471	Batteries, Non-Rechargeable, High Performance	Various

4- Standard de l'Association des Industriels et Professionnels Américains.

TABLE 4.1d Manufacturers' and Professional Associations

Publication	Title	Battery type covered
Society of Automotive Engineers		
SAE AS 8033	Aircraft Batteries	Nickel-cadmium
SAE J 537	Storage Batteries	Lead-acid
Battery Council International	Battery Replacement Data Book	Lead-acid

ANNEXES 6 :

1- Compilation des performances en énergie et en puissance des supercapacitors commercialement disponibles.

Company	Capacitance (F)	Voltage (V)	ESR (mΩ)
Apowercap	55	2.70	—
Apowercap	450	2.70	—
Asahi Glass	1375	2.70	2.50
Fuji	1800	3.80	1.50
BatScap	2680	2.70	2.50
JSR Micro	1100	3.80	1.15
JSR Micro	2300	3.80	0.54
LS Mtron	3200	2.80	0.25
Loxus	3000	2.70	0.45
Loxus	2000	2.70	0.54
Nesscap	1800	2.70	0.55
Nesscap	3640	2.70	0.30
Nesscap	3160	2.70	0.40
Powerstor	2.20	2.50	4.57
Powerstor	65	16.20	7.00
Panasonic	0.10	2.30	0.08
Panasonic	50	5.50	0.08
Maxwell	2885	2.70	0.38
Maxwell	605	2.70	0.90
Yunasko	510	2.70	0.90
Yunasko	480	2.70	0.25
Yunasko	1275	2.75	0.11
Yunasko	7200	2.70	1.40
Yunasko	5200	2.70	1.50
Skeleton	3200	3.40	0.47
Skeleton	850	3.40	0.80
Vinatech	336	2.70	3.50
Vinatech	342	3.00	6.60

ANNEXES 7 :

1- Caractéristiques des matériaux d'électrode typiques.

Material	Atomic or molecular weight, g	Standard reduction potential at 25°C, V	Valence change	Melting point, °C	Density, g/cm ³	Electrochemical equivalents		
						Ah/g	g/Ah	Ah/cm ³
Anode materials								
H ₂	2.01	0 -0.83 [†]	2	—	—	26.59	0.037	—
Li	6.94	-3.01	1	180	0.54	3.86	0.259	2.06
Na	23.0	-2.71	1	98	0.97	1.16	0.858	1.14
Mg	24.3	-2.38 -2.69 [†]	2	650	1.74	2.20	0.454	3.8
Al	26.9	-1.66	3	659	2.69	2.98	0.335	8.1
Ca	40.1	-2.84 -2.35 [†]	2	851	1.54	1.34	0.748	2.06
Fe	55.8	-0.44 -0.88 [†]	2	1528	7.85	0.96	1.04	7.5
Zn	65.4	-0.76 -1.25 [†]	2	419	7.14	0.82	1.22	5.8
Cd	112.4	-0.40 -0.81 [†]	2	321	8.65	0.48	2.10	4.1
Pb	207.2	-0.13	2	327	11.34	0.26	3.87	2.9
(Li)C ₆ [§]	72.06	~-2.8	1	—	2.25	0.372	2.69	0.837
MH [†]		-0.83 [†]	2	—	—	0.305	3.28	—
CH ₃ OH	32.04	—	6	—	—	5.02	0.20	—
Cathode materials								
CuF ₂	101.5	3.55	2	—	—	0.528	1.89	—
O ₂	32.0	1.23 0.40 [†]	4	—	—	3.35	0.30	—
Cl ₂	71.0	1.36	2	—	—	0.756	1.32	—
SO ₂	64.0	—	1	—	—	0.419	2.38	—
MnO ₂	86.9	1.28 [‡]	1	—	5.0	0.308	3.24	1.54
NiOOH	91.7	0.49	1	—	7.4	0.292	3.42	2.16
CuCl	99.0	0.14	1	—	3.5	0.270	3.69	0.95
FeS ₂	119.9	—	4	—	—	0.89	1.12	4.35
AgO	123.8	0.57 [†]	2	—	7.4	0.432	2.31	3.20
Br ₂	159.8	1.07	2	—	—	0.335	2.98	—
HgO	216.6	0.10 [†]	2	—	11.1	0.247	4.05	2.74
Ag ₂ O	231.7	0.35 [†]	2	—	7.1	0.231	4.33	1.64
PbO ₂	239.2	1.69	2	—	9.4	0.224	4.45	2.11
LiFePO ₄	163.8	~-0.42	1	—	3.44	0.160	6.25	0.554
LiMn ₂ O ₄ (spinel)	148.8	~-1.2	1	—	4.1	0.120	8.33	0.492
Li _x CoO ₂	98	~-1.25	0.5	—	5.05	0.155	6.45	0.782
I ₂	253.8	0.54	2	—	4.94	0.211	4.73	1.04

^{*}See also Apps. B and C.

[†]Basic electrolyte; all others, aqueous acid or nonaqueous electrolytes.

[‡]Based on density values shown.

[§]Calculations based only on weight of carbon.

[¶]Based on type AB₃ alloy.

ANNEXES 7 (Suite):

2- *Données de référence comparatives pour la technologie des batteries rechargeables.*

Technology	Open-circuit voltage, V	Approx. closed-circuit, voltage, ^a V	Theoretical specific capacity, ^b Ah/kg	Theoretical specific energy, ^b Wh/kg	Operating temperature, °C	Recharge time, h	Self-discharge, % per month @ 20°C
Lead-acid	2.1	1.98	120	252	-20-50	8-24	3
Nickel-cadmium	1.35	1.20	181	244	-40-60	1-16	10
Nickel-iron	1.4	1.20	224	314	-10-60	5	25
Nickel-hydrogen	1.5	1.20	289	434	-10-30	1-24	60
Nickel-metal hydride	1.35	1.20	178	240	-30-65	1-2	30
Nickel-zinc	1.73	1.60	215	372	-20-50	8	15
Zinc/silver oxide	1.85	1.55	283	524	-20-60	8-18	5
Zinc/bromine	1.83	1.60	238	429	10-50	-	12-15 ^c
Regenesys (polysulfide/bromine)	1.5	1.2	27	41	10-50	8-12	5-10
Vanadium-redox	1.4	1.25	21	29	10-50	6-10	5-10
Zinc/air	1.6	1.1	825 ^d	1320 ^e	0-45	-	-
Aluminum/air	2.73	1.4	2980 ^d	8135 ^e	10-60	-	-
Iron/air	1.3	1.0	960 ^d	1250 ^e	-20-45	-	15
Sodium/sulfur	2.08	2.0	375	755	300-350	5-6	-
Sodium/nickel chloride	2.58	2.47	305	787	250-350	3-6	-
Lithium-aluminum/iron monosulfide	1.33	1.30	345	459	375-500	5-8	-
Lithium-aluminum/iron disulfide	1.73	1.73	285	490	375-450	5-8	-
Li-C/LiCoO ₂	3-4	3-4	100	360	-20-60	-	-
Li-C/LiNi _{1-x} Co _x O ₂	3-4	3-4	-	-	-20-45	2.5	<3.5
Li-C/LiMn ₂ O ₄ -polymer elect.	3-4	3-4	105	400	-20-60	3	<2.5

^a At C/5 rate.

^b Calculated values based on the electrochemical cell reactions and the mass of active material.

^c Finite self-discharge. This value applies if electrolyte is not circulating. Self-discharge is limited to that due to the amount of bromine in the cell stacks.

^d Based on metal negative electrode only.

^e See Ref. 10.

3- *Critères USABC pour la performance des batteries de véhicules électriques.*

	Mid-term	Long-term
Specific energy, Wh/kg (C/3 discharge rate)	80 (100 desired)	200
Energy density, Wh/L (C/3 discharge rate)	137	300
Specific power, W/kg (80% DOD/30 s)	150 (200 desired)	400
Power density, W/L	250	600
Life, years	5	10
Cycle life, cycles (80% DOD)	600	1000
Ultimate price, \$/kWh	<\$150	<\$100
Operating environment	-30-65°C	-40-85°C
Recharge time, h	<6	3-6
Continuous discharge in 1 h, % (no failure)	75 (of rated energy capacity)	75
Power and capacity degradation, % of rated specifications	20	20
Efficiency, % C/3 discharge, 6-h charge	75	80
Self-discharge	<15%/48 h	<15%/month
Maintenance	No maintenance (service by qualified personnel only)	No maintenance (as mid-term)
Thermal loss at 3.2 W/kWh (for high-temperature batteries)	15% of capacity per 48-h period	15% of capacity per 48-h period
Abuse resistance	Tolerant (minimized by on-board controls)	Tolerant (minimized by on-board controls)
Specified by contractor: packaging constraints; environmental impact; safety; recyclability; reliability; overcharge/overcharge tolerance		

ANNEXES 7 (Suite):

4- Données comparatives pour les technologies de batteries rechargeables pour les applications actuelles et émergentes.

Technology	Cycle life, ^a cycles	Configuration	Specific energy, ^b Wh/kg	Energy density, ^b Wh/L	Specific power, ^c W/kg	Advantages/disadvantages
Nickel-zinc	200	Battery	60	120	300	High specific energy/high cost, short life
Aluminum/air	Mechanically rechargeable	Battery	200–250	150–200	–	High specific energy/low specific power, not electrically rechargeable
Iron/air	300	Battery	65	100	–	Good life, low cost/low voltage per cell, low coulombic efficiency on charge
Sodium/nickel chloride	2500	Cell	115	190	260	High specific energy/high temperature
Lithium/iron monosulfide	1000	Battery	95	150	170	High energy density/low specific power, high temperature
Lithium/iron disulfide	1000	Cell	130	220	240	High specific energy and power/high temperature

^a At C/5 rate to 80% of rated capacity.

^b At C/5 rate.

^c Short-duration pulse, fully charged to half-charged, except lithium/iron monosulfide, and lithium/iron disulfide, which are 50–80% charged. The values listed do not reflect the maximum that is achievable if batteries are purposely designed for maximum specific power.

Technology	Cycle life, ^a cycles	Configuration	Specific energy, ^b Wh/kg	Energy density, ^b Wh/L	Specific power, ^c W/kg	Applications	Advantages/disadvantages
Lead-acid	800	Cell	35	80	200	Electric/hybrid vehicles, utility energy storage, consumer	Commercially available, no maintenance/low specific energy
Nickel-cadmium	1000	Cell	35	80	260	Electric/hybrid vehicles, aerospace, consumer	Commercially available/low energy, high cost
Nickel-metal hydride	900	Cell	65	220	850	Electric/hybrid vehicles, aerospace, consumer	High specific power/high cost
Nickel-iron	1000	Cell	30	60	100	Industrial	Commercially available/high maintenance, significant H ₂ evolution
Nickel-hydrogen	2000	Cell	55	60	100	Aerospace, military	Long life/very high cost, high self-discharge
Zinc/silver oxide	40–50	Cell	90	180	500	Aerospace, military, consumer	High specific energy and power/high cost, very short life
Zinc/bromine	1250	Battery	65	60	90	Utility energy storage	Low cost/low specific energy density
Zinc/air	Mech. Rech.	Battery	150	160	95	Industrial	Mod. specific energy/short life, low sp. power
Regenesys (polysulfide/bromine)	2000	Battery	20	20	–	Utility energy storage	Very large scale
Vanadium-redox	3000	Battery	10	10	–	Utility energy storage	Very large scale
Sodium/sulfur	1500	Cell	170	345	250	Utility energy storage	High specific energy and energy density/high temperature
	1000	Battery	115	170	240		
Li-C/LiCoO ₂	600	Cell	155	410	–	Consumer, electric/hybrid vehicles, utility storage	High specific energy/uncertain cost
Li-C/LiNi _{1-x} Co _x O ₂	400	Cell	150	400	–	Consumer, electric/hybrid vehicles	High specific energy
Li-C/LiMn ₂ O ₄ (polymer electrolyte)	600	Cell	140	300	–	Consumer, electric/hybrid vehicles	High specific energy/development needed
Li/MnO ₂ (liquid electrolyte)	300	Cell	120	265	–	Consumer	High specific energy safety concern

^a At approximately the C/5 rate to 80% of rated capacity.

^b At approximately the C/5 rate.

^c Short-duration pulse, fully charged to half-charged except sodium/sulfur, which is 50–80% charged. The values listed do not reflect the maximum that is achievable if batteries are purposely designed for high specific power.



Voltage Transducer LV 25-P

For the electronic measurement of voltages : DC, AC, pulsed..., with a galvanic isolation between the primary circuit (high voltage) and the secondary circuit (electronic circuit).



$$I_{PN} = 10 \text{ mA}$$

$$V_{PN} = 10 \dots 500 \text{ V}$$



Electrical data

I_{PN}	Primary nominal r.m.s. current	10	mA			
I_p	Primary current, measuring range	0 .. ± 14	mA			
R_m	Measuring resistance	R_{Mmin}	R_{Mmax}			
				with $\pm 12 \text{ V}$	@ $\pm 10 \text{ mA}_{max}$	30
			@ $\pm 14 \text{ mA}_{max}$	30	100	Ω
		with $\pm 15 \text{ V}$	@ $\pm 10 \text{ mA}_{max}$	100	350	Ω
			@ $\pm 14 \text{ mA}_{max}$	100	190	Ω
I_{SN}	Secondary nominal r.m.s. current	25	mA			
K_m	Conversion ratio	2500 : 1000				
V_c	Supply voltage ($\pm 5 \%$)	$\pm 12 \dots 15$	V			
I_c	Current consumption	10 (@ $\pm 15 \text{ V}$) + I_o	mA			
V_d	R.m.s. voltage for AC isolation test ¹⁾ , 50 Hz, 1 mn	2.5	kV			

Accuracy - Dynamic performance data

X_G	Overall Accuracy @ I_{PN} , $T_A = 25^\circ\text{C}$	@ $\pm 12 \dots 15 \text{ V}$	± 0.9	%
		@ $\pm 15 \text{ V} (\pm 5 \%)$	± 0.8	%
ϵ_L	Linearity		< 0.2	%
I_o	Offset current @ $I_p = 0$, $T_A = 25^\circ\text{C}$	Typ	± 0.15	mA
		Max	± 0.25	mA
I_{OT}	Thermal drift of I_o	0 $^\circ\text{C}$.. +25 $^\circ\text{C}$	± 0.06	mA
		+25 $^\circ\text{C}$.. +70 $^\circ\text{C}$	± 0.10	mA
t_r	Response time ²⁾ @ 90 % of V_{pmax}	40	μs	

General data

T_A	Ambient operating temperature	0 .. +70	$^\circ\text{C}$
T_S	Ambient storage temperature	-25 .. +85	$^\circ\text{C}$
R_p	Primary coil resistance @ $T_A = 70^\circ\text{C}$	250	Ω
R_s	Secondary coil resistance @ $T_A = 70^\circ\text{C}$	110	Ω
m	Mass	22	g
	Standards ³⁾	EN 50178	

Notes : ¹⁾ Between primary and secondary

²⁾ $R_1 = 25 \text{ k}\Omega$ (L/R constant, produced by the resistance and inductance of the primary circuit)

³⁾ A list of corresponding tests is available

Features

- Closed loop (compensated) voltage transducer using the Hall effect
- Insulated plastic case recognized according to UL 94-V0.

Principle of use

- For voltage measurements, a current proportional to the measured voltage must be passed through an external resistor R_1 , which is selected by the user and installed in series with the primary circuit of the transducer.

Advantages

- Excellent accuracy
- Very good linearity
- Low thermal drift
- Low response time
- High bandwidth
- High immunity to external interference
- Low disturbance in common mode.

Applications

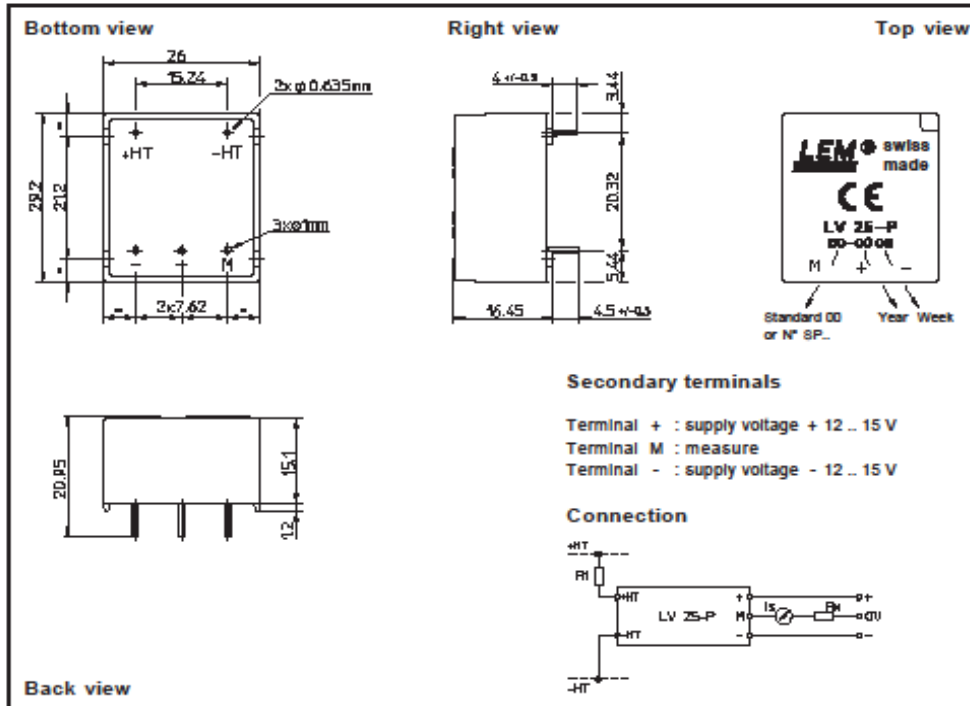
- AC variable speed drives and servo motor drives
- Static converters for DC motor drives
- Battery supplied applications
- Uninterruptible Power Supplies (UPS)
- Power supplies for welding applications.

981125/14

ANNEXES 8 (Suite) :



Dimensions LV 25-P (In mm. 1 mm = 0.0394 inch)



Mechanical characteristics

- General tolerance ± 0.2 mm
- Fastening & connection of primary 2 pins
0.635 x 0.635 mm
- Fastening & connection of secondary 3 pins ϕ 1 mm
- Recommended PCB hole 1.2 mm

Remarks

- I_s is positive when V_p is applied on terminal +HT.
- This is a standard model. For different versions (supply voltages, turns ratios, unidirectional measurements...), please contact us.

Instructions for use of the voltage transducer model LV 25-P

Primary resistor R_1 : the transducer's optimum accuracy is obtained at the nominal primary current. As far as possible, R_1 should be calculated so that the nominal voltage to be measured corresponds to a primary current of 10 mA.

Example: Voltage to be measured $V_{pn} = 250$ V

a) $R_1 = 25$ k Ω /2.5 W, $I_p = 10$ mA	Accuracy = ± 0.8 % of V_{pn} (@ $T_A = +25^\circ\text{C}$)
b) $R_1 = 50$ k Ω /1.25 W, $I_p = 5$ mA	Accuracy = ± 1.6 % of V_{pn} (@ $T_A = +25^\circ\text{C}$)

Operating range (recommended) : taking into account the resistance of the primary windings (which must remain low compared to R_1 in order to keep thermal deviation as low as possible) and the isolation, this transducer is suitable for measuring nominal voltages from 10 to 500 V.

LEM reserves the right to carry out modifications on its transducers, in order to improve them, without previous notice.



Current Transducer LA 55-P

For the electronic measurement of currents : DC, AC, pulsed..., with a galvanic isolation between the primary circuit (high power) and the secondary circuit (electronic circuit).



$$I_{PN} = 50 \text{ A}$$



Electrical data						
I_{PN}	Primary nominal r.m.s. current	50	A			
I_P	Primary current, measuring range	0 .. ± 70	A			
R_M	Measuring resistance @	$T_A = 70^\circ\text{C}$	R_{Mmin} R_{Mmax}	$T_A = 85^\circ\text{C}$	R_{Mmin} R_{Mmax}	
			with ± 12 V	@ ± 50 A _{max}	10 100	60 95
			@ ± 70 A _{max}	10 50	60 ¹⁾ 60 ¹⁾	Ω
		with ± 15 V	@ ± 50 A _{max}	50 160	135 155	Ω
	@ ± 70 A _{max}	50 90	135 ²⁾ 135 ²⁾	Ω		
I_{SN}	Secondary nominal r.m.s. current	50	mA			
K_M	Conversion ratio	1 : 1000				
V_C	Supply voltage (± 5 %)	± 12 .. 15	V			
I_C	Current consumption	10 (@ ± 15 V) + I_D	mA			
V_D	R.m.s. voltage for AC isolation test, 50 Hz, 1 mn	2.5	kV			

Accuracy - Dynamic performance data			
X	Accuracy @ I_{PN} , $T_A = 25^\circ\text{C}$	@ ± 15 V (± 5 %)	± 0.65 %
		@ ± 12 .. 15 V (± 5 %)	± 0.90 %
ϵ_L	Linearity		< 0.15 %
I_O	Offset current @ $I_P = 0$, $T_A = 25^\circ\text{C}$	Typ	Max
I_{OM}	Residual current ³⁾ @ $I_P = 0$, after an overload of 3 x I_{PN}		± 0.2 mA
I_{OT}	Thermal drift of I_O	0°C .. + 70°C	± 0.1 ± 0.5 mA
		- 25°C .. + 85°C	± 0.1 ± 0.6 mA
t_m	Reaction time @ 10 % of I_{Pmax}	< 500	ns
t_r	Response time @ 90 % of I_{Pmax}	< 1	µs
di/dt	di/dt accurately followed	> 200	A/µs
f	Frequency bandwidth (- 1 dB)	DC .. 200	kHz

General data			
T_A	Ambient operating temperature	-25 .. + 85	°C
T_S	Ambient storage temperature	-40 .. + 90	°C
R_S	Secondary coil resistance @	$T_A = 70^\circ\text{C}$	80 Ω
		$T_A = 85^\circ\text{C}$	85 Ω
m	Mass	18	g
	Standards ⁴⁾	EN 50178	

Notes : ¹⁾ Measuring range limited to ± 60 A_{max}
²⁾ Measuring range limited to ± 55 A_{max}
³⁾ Result of the coercive field of the magnetic circuit
⁴⁾ A list of corresponding tests is available

Features

- Closed loop (compensated) current transducer using the Hall effect
- Printed circuit board mounting
- Insulated plastic case recognized according to UL 94-V0.

Advantages

- Excellent accuracy
- Very good linearity
- Low temperature drift
- Optimized response time
- Wide frequency bandwidth
- No insertion losses
- High immunity to external interference
- Current overload capability.

Applications

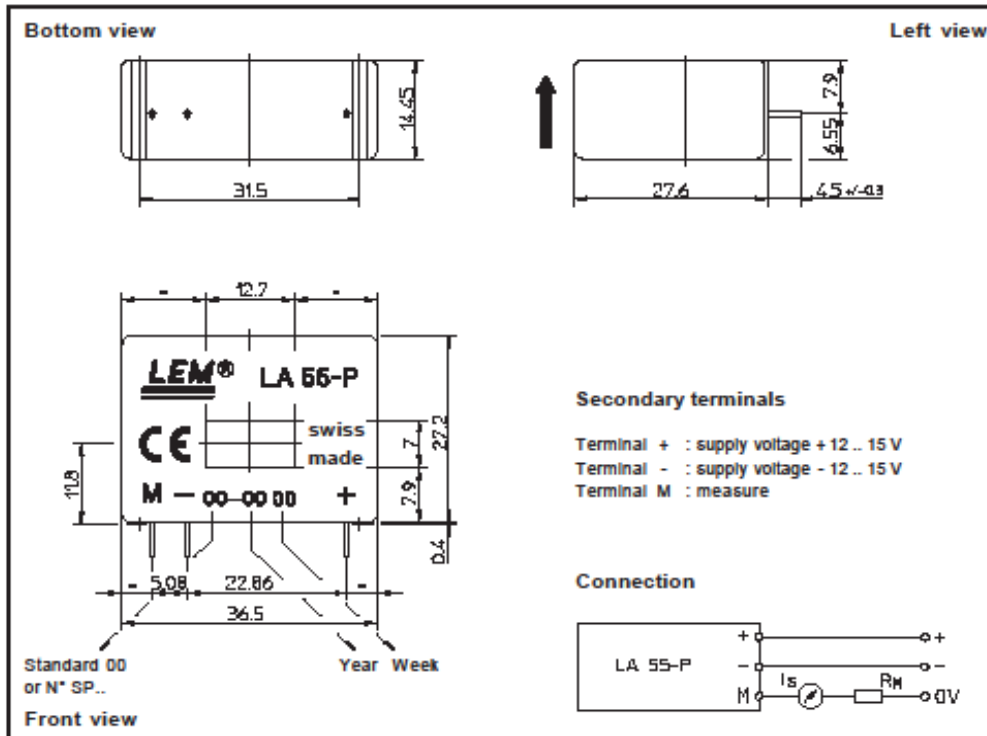
- AC variable speed drives and servo motor drives
- Static converters for DC motor drives
- Battery supplied applications
- Uninterruptible Power Supplies (UPS)
- Switched Mode Power Supplies (SMPS)
- Power supplies for welding applications.

080706/8

ANNEXES 8 (Suite) :



Dimensions LA 55-P (In mm. 1 mm = 0.0394 Inch)



Mechanical characteristics

- General tolerance ± 0.2 mm
 - Primary through-hole 12.7 x 7 mm
 - Fastening & connection of secondary 3 pins
- Recommended PCB hole 0.63 x 0.56mm
0.9 mm

Remarks

- I_p is positive when I_p flows in the direction of the arrow.
- Temperature of the primary conductor should not exceed 90°C.
- Dynamic performances (di/dt and response time) are best with a single bar completely filling the primary hole.
- In order to achieve the best magnetic coupling, the primary windings have to be wound over the top edge of the device.
- This is a standard model. For different versions (supply voltages, turns ratios, unidirectional measurements...), please contact us.

LEM reserves the right to carry out modifications on its transducers, in order to improve them, without previous notice.

Bibliographie

Bibliographie

- [1] Ehsani, M., Singh, K. V., Bansal, H. O., & Mehrjardi, R. T. (2021). State of the art and trends in electric and hybrid electric vehicles. *Proceedings of the IEEE*, 109(6), 967-984.
- [2] Maggetto, G., & Van Mierlo, J. (2001, July). Electric vehicles, hybrid electric vehicles and fuel cell electric vehicles: state of the art and perspectives. In *Annales de Chimie Science des Materiaux* (Vol. 26, No. 4, pp. 9-26).
- [3] Tran, D. D., Vafaeipour, M., El Baghdadi, M., Barrero, R., Van Mierlo, J., & Hegazy, O. (2020). Thorough state-of-the-art analysis of electric and hybrid vehicle powertrains: Topologies and integrated energy management strategies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 119, 109596.
- [4] Sabri, M., Danapalasingam, K. A., & Rahmat, M. F. (2016). A review on hybrid electric vehicles architecture and energy management strategies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 53, 1433-1442.
- [5] Anselma, P. G., Huo, Y., Roeleveld, J., Emadi, A., & Belingardi, G. (2019). Rapid optimal design of a multimode power split hybrid electric vehicle transmission. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 233(3), 740-762.
- [6] Appleby, A. J. (1990). From Sir William Grove to today: fuel cells and the future. *Journal of Power Sources*, 29(1-2), 3-11.
- [7] Hua, T., Ahluwalia, R., Eudy, L., Singer, G., Jermer, B., Asselin-Miller, Marcinkoski, J. (2014). Status of hydrogen fuel cell electric buses worldwide. *Journal of Power Sources*, 269, 975-993.
- [8] Tao, L. E. I., Zhou, Y. A. N. G., Zicun, L. I. N., & Zhang, X. (2019). State of art on energy management strategy for hybrid-powered unmanned aerial vehicle. *Chinese Journal of Aeronautics*, 32(6), 1488-1503.
- [9] Skouras, T. A., Gkonis, P. K., Ilias, C. N., Trakadas, P. T., Tsampasis, E. G., & Zahariadis, T. V. (2019). Electrical vehicles: Current state of the art, future challenges, and perspectives. *Clean Technologies*, 2(1), 1-16.
- [10] Van Mierlo, J., Bercibar, M., El Baghdadi, M., De Cauwer, C., Messagie, M., Coosemans, T., ... & Hegazy, O. (2021). Beyond the state of the art of electric vehicles: A fact-based paper of the current and prospective electric vehicle technologies. *World Electric Vehicle Journal*, 12(1), 20.
- [11] Tao, L. E. I., Zhou, Y. A. N. G., Zicun, L. I. N., & Zhang, X. (2019). State of art on energy management strategy for hybrid-powered unmanned aerial vehicle. *Chinese Journal of Aeronautics*, 32(6), 1488-1503.
- [12] Chan, C. C. (2002). The state of the art of electric and hybrid vehicles. *Proceedings of the IEEE*, 90(2), 247-275.
- [13] Marzougui, H., Kadri, A., Amari, M., & Bacha, F. (2019, April). Energy management of fuel cell vehicle with hybrid storage system: a frequency based distribution. In *2019 6th International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT)* (pp. 1853-1858). IEEE.

- [14] Li, Q., Chen, W., Li, Y., Liu, S., & Huang, J. (2012). Energy management strategy for fuel cell/battery/ultracapacitor hybrid vehicle based on fuzzy logic. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 43(1), 514-525.
- [15] Zandi, M., Payman, A., Martin, J. P., Pierfederici, S., Davat, B., & Meibody-Tabar, F. (2010). Energy management of a fuel cell/supercapacitor/battery power source for electric vehicular applications. *IEEE transactions on vehicular technology*, 60(2), 433-443.
- [16] Martinez, C. M., Hu, X., Cao, D., Velenis, E., Gao, B., & Wellers, M. (2016). Energy management in plug-in hybrid electric vehicles: Recent progress and a connected vehicles perspective. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 66(6), 4534-4549.
- [17] Dicks, A. L., & Rand, D. A. (2018). *Fuel cell systems explained*. John Wiley & Sons.
- [18] Larminie, J., Dicks, A., & McDonald, M. S. (2003). *Fuel cell systems explained* (Vol. 2, pp. 207-225). Chichester, UK: J. Wiley.
- [19] Park, J. Y., Park, Y. K., & Park, J. H. (2008). Optimal power distribution strategy for series—Parallel hybrid electric vehicles. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 222(6), 989-1000.
- [20] Dusmez, S., & Khaligh, A. (2014). A supervisory power-splitting approach for a new ultracapacitor–battery vehicle deploying two propulsion machines. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 10(3), 1960-1971.
- [21] Wang, H., Li, H., & Yuan, X. Z. (Eds.). (2019). *PEM Fuel Cell Durability Handbook, Two-Volume Set*. CRC Press.
- [22] Appleby, A., & Foulkes, F. (1993). *A Fuel Cell Handbook*, 2nd.
- [23] Gülzow, E. (1996). Alkaline fuel cells: a critical view. *Journal of power sources*, 61(1-2), 99-104.
- [24] Ahuja, V., & Green, R. (1998). Carbon dioxide removal from air for alkaline fuel cells operating with liquid hydrogen—a synergistic advantage. *International journal of hydrogen energy*, 23(2), 131-137.
- [25] Warshay, M., Prokopius, P., Le, M., & Voecks, G. (1997, July). The NASA fuel cell upgrade program for the space shuttle orbiter. In *IECEC-97 Proceedings of the Thirty-Second Intersociety Energy Conversion Engineering Conference* (Cat. No. 97CH6203) (Vol. 1, pp. 228-231). IEEE.
- [26] Hamnett, A., & Kennedy, B. J. (1988). Bimetallic carbon supported anodes for the direct methanol-air fuel cell. *Electrochimica Acta*, 33(11), 1613-1618.
- [27] Hamelinck, C. N., & Faaij, A. P. (2002). Future prospects for production of methanol and hydrogen from biomass. *Journal of Power sources*, 111(1), 1-22.
- [29] Da Silva, F. S., & de Souza, T. M. (2017). Novel materials for solid oxide fuel cell technologies: A literature review. *International journal of hydrogen energy*, 42(41), 26020-26036.
- [30] Mori, T., Wepf, R., & Jiang, S. P. (2020). Future prospects for the design of 'state-of-the-art' solid oxide fuel cells. *JPhys Energy*, 2(3).

- [31] Warshay, M., Prokopius, P., Le, M., & Voecks, G. (1997, July). The NASA fuel cell upgrade program for the space shuttle orbiter. In *IECEC-97 Proceedings of the Thirty-Second Intersociety Energy Conversion Engineering Conference* (Cat. No. 97CH6203) (Vol. 1, pp. 228-231). IEEE.
- [32] Dohle, H., Schmitz, H., Bewer, T., Mergel, J., & Stolten, D. (2002). Development of a compact 500 W class direct methanol fuel cell stack. *Journal of Power Sources*, 106(1-2), 313-322.
- [33] Wang, H., Li, H., & Yuan, X. Z. (Eds.). (2019). *PEM Fuel Cell Durability Handbook, Two-Volume Set*. CRC Press.
- [34] Moslemi, M., Javaherdeh, K., & Ashorynejad, H. R. (2022). Effect of compression of microporous and gas diffusion layers on liquid water transport of PEMFC with interdigitated flow field by Lattice Boltzmann method. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 642, 128623.
- [35] Ren, X., & Gottesfeld, S. (2001). Electro-osmotic drag of water in poly (perfluorosulfonic acid) membranes. *Journal of the Electrochemical Society*, 148(1), A87.
- [36] Floyd, I. I., & Donald, E. (2001). A simplified air humidifier using a porous metal membrane.
- [37] Cano, M. H., Mousli, M. I. A., Kelouwani, S., Agbossou, K., Hammoudi, M., & Dubé, Y. (2017). Improving a free air breathing proton exchange membrane fuel cell through the Maximum Efficiency Point Tracking method. *Journal of Power Sources*, 345, 264-274.
- [38] Pukrushpan, J. T., Stefanopoulou, A. G., & Peng, H. (2004). Control of fuel cell breathing. *IEEE Control Systems Magazine*, 24(2), 30-46.
- [39] Li, Q., Chen, W., Liu, Z., Guo, A., & Liu, S. (2013). Control of proton exchange membrane fuel cell system breathing based on maximum net power control strategy. *Journal of power sources*, 241, 212-218.
- [40] Reddy, T. B., & Linden, D. (2011). *Linden's handbook of batteries*.
- [41] Selim, R., & Bro, P. (1971). Performance domain analysis of primary batteries. *Journal of The Electrochemical Society*, 118(5), 829.
- [42] Gummow, R. J., Vamvounis, G., Kannan, M. B., & He, Y. (2018). Calcium-ion batteries: current state-of-the-art and future perspectives. *Advanced Materials*, 30(39), 1801702.
- [43] Chian, T. Y., Wei, W., Ze, E., Ren, L., Ping, Y., Bakar, N. A., ... & Sivakumar, S. (2019). A review on recent progress of batteries for electric vehicles. *Int. J. Appl. Eng. Res*, 14(24), 4441-4461.
- [44] Zhang, R., Xia, B., Li, B., Cao, L., Lai, Y., Zheng, W., ... & Wang, W. (2018). State of the art of lithium-ion battery SOC estimation for electrical vehicles. *Energies*, 11(7), 1820.
- [45] Chian, T. Y., Wei, W., Ze, E., Ren, L., Ping, Y., Bakar, N. A., ... & Sivakumar, S. (2019). A review on recent progress of batteries for electric vehicles. *Int. J. Appl. Eng. Res*, 14(24), 4441-4461.

- [46] Hasan, M. K., Mahmud, M., Habib, A. A., Motakabber, S. M. A., & Islam, S. (2021). Review of electric vehicle energy storage and management system: Standards, issues, and challenges. *Journal of energy storage*, 41, 102940.
- [47] Chen, G. Z. (2017). Supercapacitor and supercapattery as emerging electrochemical energy stores. *International Materials Reviews*, 62(4), 173-202.
- [48] Numan, A., Zhan, Y., Khalid, M., & Hatamvand, M. (2021). Introduction to supercapattery. In *Advances in Supercapacitor and Supercapattery* (pp. 45-61). Elsevier.
- [49] Iqbal, M. Z., & Aziz, U. (2022). Supercapattery: Merging of battery-supercapacitor electrodes for hybrid energy storage devices. *Journal of Energy Storage*, 46, 103823.
- [50] Lufrano, F., Baglio, V., Staiti, P., & Antonucci, V. (2013). Performance analysis of polymer electrolyte membranes for direct methanol fuel cells. *Journal of Power Sources*, 243, 519-534.
- [51] Blal, M., Benatallah, A., NeÇaibia, A., Lachtar, S., Sahouane, N., & Belasri, A. (2019). Contribution and investigation to compare models parameters of (PEMFC), comprehensives review of fuel cell models and their degradation. *Energy*, 168, 182-199.
- [52] Benchouia, N., Hadjadj, A. E., Derghal, A., Khochemane, L., & Mahmah, B. (2013). Modeling and validation of fuel cell PEMFC. *Journal of Renewable Energies*, 16(2), 365-377.
- [53] Khan, S. S., Shareef, H., Kandidayeni, M., Boulon, L., & Amine, A. (2021). Dynamic semiempirical PEMFC model for prognostics and fault diagnosis. *IEEE Access*, 9, 10217-10227.
- [54] Chugh, S., Chaudhari, C., Sonkar, K., Sharma, A., Kapur, G. S., & Ramakumar, S. S. V. (2020). Experimental and modelling studies of low temperature PEMFC performance. *international journal of hydrogen energy*, 45(15), 8866-8874.
- [55] Tian, Y., Zou, Q., & Lin, Z. (2020). Hydrogen leakage diagnosis for proton exchange membrane fuel cell systems: Methods and suggestions on its application in fuel cell vehicles. *IEEE Access*, 8, 224895-224910.
- [56] Tian, Y., Zou, Q., & Lin, Z. (2020). Hydrogen leakage diagnosis for proton exchange membrane fuel cell systems: Methods and suggestions on its application in fuel cell vehicles. *IEEE Access*, 8, 224895-224910.
- [57] Rashapov, R. R., Unno, J., & Gostick, J. T. (2015). Characterization of PEMFC gas diffusion layer porosity. *Journal of The Electrochemical Society*, 162(6), F603.
- [58] Toghiani, S., Afshari, E., & Baniasadi, E. (2019). A parametric comparison of three fuel recirculation system in the closed loop fuel supply system of PEM fuel cell. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(14), 7518-7530.
- [59] Meegoda, J., Charbel, G., & Watts, D. (2024). Second Life of Used Lithium-Ion Batteries from Electric Vehicles in the USA. *Environments*, 11(5), 97.
- [60] Faraz, A., Ambikapathy, A., Thangavel, S., Logavani, K., & Arun Prasad, G. (2021). Battery electric vehicles (BEVs). *Electric Vehicles: Modern Technologies and Trends*, 137-160.

- [61] Iclodean, C., Varga, B., Burnete, N., Cimerdean, D., & Jurchiș, B. (2017, October). Comparison of different battery types for electric vehicles. In IOP conference series: materials science and engineering (Vol. 252, No. 1, p. 012058). IOP Publishing.
- [62] Kroeze, R. C., & Krein, P. T. (2008, June). Electrical battery model for use in dynamic electric vehicle simulations. In 2008 IEEE Power Electronics Specialists Conference (pp. 1336-1342). IEEE.
- [63] Enache, B., Lefter, E., & Stoica, C. (2013, May). Comparative study for generic battery models used for electric vehicles. In 2013 8TH INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ADVANCED TOPICS IN ELECTRICAL ENGINEERING (ATEE) (pp. 1-6). IEEE.
- [64] Liu, W., Placke, T., & Chau, K. T. (2022). Overview of batteries and battery management for electric vehicles. *Energy Reports*, 8, 4058-4084.
- [65] Liu, S., & Gong, D. (2014). Modelling and simulation on recycling of electric vehicle batteries—using agent approach. *Int. J. Simul. Model*, 13(1), 79-92.
- [66] Wu, H., Pang, G. K. H., Choy, K. L., & Lam, H. Y. (2017). An optimization model for electric vehicle battery charging at a battery swapping station. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 67(2), 881-895.
- [67] Wu, H., Pang, G. K. H., Choy, K. L., & Lam, H. Y. (2017). An optimization model for electric vehicle battery charging at a battery swapping station. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 67(2), 881-895.
- [68] Amal, S., Chacko, R. V., Sreedevi, M. L., Mineeshma, G. R., & Vishnu, V. (2016, December). Modelling of ultracapacitor and Power Management strategy for the parallel operation of Ultracapacitor and Battery in Electric Vehicle Configuration. In 2016 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES) (pp. 1-6). IEEE.
- [69] Naresh, P. (2021). Mathematical modeling and stability analysis of an ultracapacitor based energy storage system considering non-idealities. *Journal of Energy Storage*, 33, 102112.
- [70] Zhang, L. (2016). Modelling and state-of-charge estimation for ultracapacitors in electric vehicles (Doctoral dissertation).
- [71] Kachhwaha, A., Rashed, G. I., Garg, A. R., Mahela, O. P., Khan, B., Shafik, M. B., & Hussien, M. G. (2022). Design and performance analysis of hybrid battery and ultracapacitor energy storage system for electrical vehicle active power management. *Sustainability*, 14(2), 776.
- [72] Tseng, K. C., Chang, Y. C., & Cheng, C. A. (2020). Implementation and analysis of ultracapacitor charger in hybrid energy-storage system for electric-vehicle applications. *IET Power Electronics*, 13(9), 1858-1864.
- [73] Verbrugge, M. W., & Liu, P. (2005). Microstructural analysis and mathematical modeling of electric double-layer supercapacitors. *Journal of the Electrochemical Society*, 152(5), D79.
- [74] Nguyen, B. H., German, R., Trovão, J. P. F., & Bouscayrol, A. (2018). Real-time energy management of battery/supercapacitor electric vehicles based on an adaptation of Pontryagin's minimum principle. *IEEE transactions on Vehicular Technology*, 68(1), 203-212.

- [75] Pozo, B., Garate, J. I., Ferreiro, S., Fernandez, I., & Fernandez de Gorostiza, E. (2018). Supercapacitor electro-mathematical and machine learning modelling for low power applications. *Electronics*, 7(4), 44.
- [76] Zhang, G., Li, Z., Zhang, B., & Halang, W. A. (2018). Power electronics converters: Past, present and future. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81, 2028-2044.
- [77] Kotb, R., Chakraborty, S., Tran, D. D., Abramushkina, E., El Baghdadi, M., & Hegazy, O. (2023). Power electronics converters for electric vehicle auxiliaries: State of the art and future trends. *Energies*, 16(4), 1753.
- [78] Dokić, B. L., & Blanuša, B. (2015). *Power Electronics* (pp. 559-592). Springer.
- [79] Ejury, J. (2013). Buck converter design. Infineon Technologies North America (TFNA) Core Design Note, 1(2013).
- [80] Grigore, V., Hatonen, J., Kyyra, J., & Suntio, T. (1998, May). Dynamics of a buck converter with a constant power load. In *PESC 98 Record. 29th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference* (Cat. No. 98CH36196) (Vol. 1, pp. 72-78). IEEE.
- [81] Shrud, M. A., Kharaz, A., Ashur, A. S., Shater, M., & Benyoussef, I. (2010, February). A study of modeling and simulation for interleaved buck converter. In *2010 1st Power Electronic & Drive Systems & Technologies Conference (PEDSTC)* (pp. 28-35). IEEE.
- [82] Venkatramanan, D., & John, V. (2019). Dynamic modeling and analysis of buck converter based solar PV charge controller for improved MPPT performance. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 55(6), 6234-6246.
- [83] Wu, T. F., & Chen, Y. K. (1998). Modeling PWM DC/DC converters out of basic converter units. *IEEE transactions on Power Electronics*, 13(5), 870-881.
- [84] Qiu, Y. (2005). High-frequency modeling and analyses for buck and multiphase buck converters (Doctoral dissertation, Virginia Polytechnic Institute and State University).
- [85] Gragger, J. V., Haumer, A., & Einhorn, M. (2010). Averaged Model of a Buck Converter for Efficiency Analysis. *Engineering letters*, 18(1).
- [86] Brown, J. (2006). Modeling the switching performance of a MOSFET in the high side of a non-isolated buck converter. *IEEE transactions on power electronics*, 21(1), 3-10.
- [87] Abaali, H. (2016). Design modelling control and simulation of DC/DC power buck converter. *International Journal of Energy and Power Engineering*, 9(10), 1229-1235.
- [88] Shrud, M. A., Bonsbaine, A., Ashur, A. S., Thorn, R., & Benmusa, T. (2009, September). Modeling and simulation of automotive interleaved buck converter. In *2009 44th International Universities Power Engineering Conference (UPEC)* (pp. 1-5). IEEE.
- [89] Suntio, T. (2018). Dynamic modeling and analysis of PCM-controlled DCM-operating buck converters—A reexamination. *Energies*, 11(5), 1267.

- [90] El Aroudi, A., Robert, B. G. M., Cid-Pastor, A., & Martínez-Salamero, L. (2008). Modeling and design rules of a two-cell buck converter under a digital PWM controller. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 23(2), 859-870.
- [91] Yan, D., Yang, C., Hang, L., He, Y., Luo, P., Shen, L., & Zeng, P. (2021). Review of general modeling approaches of power converters. *Chinese Journal of Electrical Engineering*, 7(1), 27-36.
- [92] Elangovan, M., Yuvaraj, R., Sathishkumar, S., & Nagarajan, R. (2017). Modelling and Simulation of High Gain Hybrid Boost Converter. *power*, 10, 11.
- [93] Waseem, M., Sherwani, A. F., & Suhaib, M. (2019). Simscape modelling and analysis of photovoltaic modules with boost converter for solar electric vehicles. In *Applications of Computing, Automation and Wireless Systems in Electrical Engineering: Proceedings of MARC 2018* (pp. 181-191). Springer Singapore.
- [94] Vempalli, S. K., Ramprabhakar, J., Shankar, S., & Prabhakar, G. (2018, October). Electric vehicle designing, modelling and simulation. In *2018 4th International Conference for Convergence in Technology (I2CT)* (pp. 1-6). IEEE.
- [95] Joseph, P. K., & Devaraj, E. (2019). Design of hybrid forward boost converter for renewable energy powered electric vehicle charging applications. *IET Power Electronics*, 12(8), 2015-2021.
- [96] Al Sakka, M., Van Mierlo, J., Gualous, H., & Brussel, U. (2011). DC/DC converters for electric vehicles. *Electric Vehicles-Modelling and Simulations*, 100, 466.
- [97] Butler, K. L., Ehsani, M., & Kamath, P. (1999). A Matlab-based modeling and simulation package for electric and hybrid electric vehicle design. *IEEE Transactions on vehicular technology*, 48(6), 1770-1778.
- [98] Ellabban, O., Van Mierlo, J., & Lataire, P. (2011). A DSP-based dual loop digital controller design and implementation of a high power boost converter for hybrid electric vehicles applications. *Journal of power electronics*, 11(2), 113-119.
- [99] Navarro, F. J. G., Yebra, L. J., Medina, F. J. G., & Giménez-Fernandez, A. (2020). DC-DC linearized converter model for faster simulation of lightweight urban electric vehicles. *IEEE Access*, 8, 85380-85394.
- [100] Waseem, M., Sherwani, A. F., & Suhaib, M. (2019, November). Designing and modelling of power converter for renewable powered hybrid vehicle. In *2019 International Conference on Power Electronics, Control and Automation (ICPECA)* (pp. 1-6). IEEE.
- [101] Albiol-Tendillo, L., Vidal-Idiarte, E., Maixé-Altés, J., Bosque-Moncusí, J. M., & Valderrama-Blaví, H. (2012, September). Design and control of a bidirectional DC/DC converter for an Electric Vehicle. In *2012 15th International Power Electronics and Motion Control Conference (EPE/PEMC)* (pp. LS4d-2). IEEE.
- [102] Keerthika, C., Ramprasath, S., Rameshbabu, P., & Krishnakumar, C. (2021, May). Simulation And Steady State Analysis Of Simo Boost Converter For Electric Vehicles. In *2021 2nd International Conference for Emerging Technology (INCET)* (pp. 1-5). IEEE.

- [103] Babu, S. S., Chary, S. S. K., Abdullah, S. M., Elangovan, D., & Karuppa, R. R. T. (2019, September). Design and analysis of power convertors for electric vehicle applications. In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (Vol. 312, No. 1, p. 012026). IOP Publishing.
- [104] Uthirasamy, R., Karpagam, J., Subramaniam, U., & Vijayalakshmi, V. J. (2020, September). Extended Boost DC-DC-AC converter for electric vehicle applications. In IOP conference series: materials science and engineering (Vol. 937, No. 1, p. 012045). IOP Publishing.
- [105] Biswas, A., & Emadi, A. (2019). Energy management systems for electrified powertrains: State-of-the-art review and future trends. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 68(7), 6453-6467.
- [106] Yang, Y., Arshad-Ali, K., Roeleveld, J., & Emadi, A. (2016). State-of-the-art electrified powertrains-hybrid, plug-in, and electric vehicles. *International journal of powertrains*, 5(1), 1-29.
- [107] Liu, J., & Peng, H. (2010). A systematic design approach for two planetary gear split hybrid vehicles. *Vehicle System Dynamics*, 48(11), 1395-1412.
- [108] Tran, D. D., Vafaeipour, M., El Baghdadi, M., Barrero, R., Van Mierlo, J., & Hegazy, O. (2020). Thorough state-of-the-art analysis of electric and hybrid vehicle powertrains: Topologies and integrated energy management strategies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 119, 109596.
- [109] Stockar, S., Marano, V., Canova, M., Rizzoni, G., & Guzzella, L. (2011). Energy-optimal control of plug-in hybrid electric vehicles for real-world driving cycles. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 60(7), 2949-2962.
- [110] Chemali, E., Preindl, M., Malysz, P., & Emadi, A. (2016). Electrochemical and electrostatic energy storage and management systems for electric drive vehicles: State-of-the-art review and future trends. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 4(3), 1117-1134.
- [111] Gu, B., & Rizzoni, G. (2006, January). An adaptive algorithm for hybrid electric vehicle energy management based on driving pattern recognition. In *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition* (Vol. 47683, pp. 249-258).
- [112] Long, V. T., & Nhan, N. V. (2012). Bees-algorithm-based optimization of component size and control strategy parameters for parallel hybrid electric vehicles. *International journal of automotive technology*, 13, 1177-1183.
- [113] Van Mierlo, J., Berecibar, M., El Baghdadi, M., De Cauwer, C., Messagie, M., Coosemans, T., ... & Hegazy, O. (2021). Beyond the state of the art of electric vehicles: A fact-based paper of the current and prospective electric vehicle technologies. *World Electric Vehicle Journal*, 12(1), 20.
- [114] Suntharalingam, P., Emadi, A., & Zhang, M. (2014). Hybrid electric powertrains: current status, future trends, and electro-mechanical integration methods. *International Journal of Powertrains*, 3(3), 319-349.
- [115] Ali, A. M., & Söffker, D. (2018). Towards optimal power management of hybrid electric vehicles in real-time: A review on methods, challenges, and state-of-the-art solutions. *Energies*, 11(3), 476.

- [116] Zhang, F., Wang, L., Coskun, S., Pang, H., Cui, Y., & Xi, J. (2020). Energy management strategies for hybrid electric vehicles: Review, classification, comparison, and outlook. *Energies*, 13(13), 3352.
- [117] Narayanaswamy, S., Kauer, M., Steinhorst, S., Lukaszewicz, M., & Chakraborty, S. (2016). Modular active charge balancing for scalable battery packs. *IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems*, 25(3), 974-987.
- [118] Ehsani, M., Gao, Y., & Miller, J. M. (2007). Hybrid electric vehicles: Architecture and motor drives. *Proceedings of the IEEE*, 95(4), 719-728.
- [119] Rind, S. J., Ren, Y., Hu, Y., Wang, J., & Jiang, L. (2017). Configurations and control of traction motors for electric vehicles: A review. *Chinese Journal of Electrical Engineering*, 3(3), 1-17.
- [120] Hartoyo, J. K., & Li, P. Y. (2021, May). Optimal Control and Architecture Design Optimization for Hydraulic Drive Train of a Compact Track Loader. In *2021 American Control Conference (ACC)* (pp. 628-633). IEEE.
- [121] Opila, D. F., Wang, X., McGee, R., Gillespie, R. B., Cook, J. A., & Grizzle, J. W. (2011). An energy management controller to optimally trade off fuel economy and drivability for hybrid vehicles. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 20(6), 1490-1505.
- [122] Park, J., & Park, J. H. (2012). Development of equivalent fuel consumption minimization strategy for hybrid electric vehicles. *International journal of automotive technology*, 13, 835-843.
- [123] Ali, A. M., & Söffker, D. (2018). Towards optimal power management of hybrid electric vehicles in real-time: A review on methods, challenges, and state-of-the-art solutions. *Energies*, 11(3), 476.
- [124] Nüesch, T., Cerofolini, A., Mancini, G., Cavina, N., Onder, C., & Guzzella, L. (2014). Equivalent consumption minimization strategy for the control of real driving NO_x emissions of a diesel hybrid electric vehicle. *Energies*, 7(5), 3148-3178.
- [125] Tie, S. F., & Tan, C. W. (2012, June). A review of power and energy management strategies in electric vehicles. In *2012 4th International Conference on Intelligent and Advanced Systems (ICIAS2012)* (Vol. 1, pp. 412-417). IEEE.
- [126] Cui, H., Ruan, J., Wu, C., Zhang, K., & Li, T. (2023). Advanced deep deterministic policy gradient based energy management strategy design for dual-motor four-wheel-drive electric vehicle. *Mechanism and Machine Theory*, 179, 105119.
- [127] Liang, J., Zhang, J., Zhang, H., & Yin, C. (2015). Fuzzy energy management optimization for a parallel hybrid electric vehicle using chaotic non-dominated sorting genetic algorithm. *automatika*, 56(2), 149-163.
- [128] Khoucha, F., Benbouzid, M. E. H., & Kheloui, A. (2010, September). An optimal fuzzy logic power sharing strategy for parallel hybrid electric vehicles. In *2010 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference* (pp. 1-5). IEEE.
- [129] Tang, L., Rizzoni, G., & Onori, S. (2015). Energy management strategy for HEVs including battery life optimization. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 1(3), 211-222.

- [130] Vagg, C., Akehurst, S., Brace, C. J., & Ash, L. (2015). Stochastic dynamic programming in the real-world control of hybrid electric vehicles. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 24(3), 853-866.
- [131] Sieniutycz, S. (2009). Dynamic programming and Lagrange multipliers for active relaxation of resources in nonlinear non-equilibrium systems. *Applied mathematical modelling*, 33(3), 1457-1478.
- [132] Arefifar, S. A., Ordonez, M., & Mohamed, Y. A. R. I. (2016). Energy management in multi-microgrid systems—Development and assessment. *IEEE Transactions on Power Systems*, 32(2), 910-922.
- [133] Li, Q., Chen, W., Liu, Z., Li, M., & Ma, L. (2015). Development of energy management system based on a power sharing strategy for a fuel cell-battery-supercapacitor hybrid tramway. *Journal of Power Sources*, 279, 267-280.