

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

---

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

---

Université de RELIZANE  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département : Electrotechnique et d'automatique



**MEMOIRE**

En vue de l'obtention du diplôme de MASTER en :  
**Electrotechnique industrielle**

**Intitulé**

**Commande Par Réseaux de Neurones d'un Véhicule Electrique à Pile à Combustible**

**Présenté par :**

Mlle : HABCHAOUI Maroua

Mlle : LARBAOUI Khadidja

**Devant les membres de jury :**

**Président :** Mr MOSTEFA TOUNSI Mahmoud

Maître de conférences (A) (U. Relizane)

**Encadrant :** Mr MELIANI Bouziane

Professeur (U. Relizane)

**Examineur :** Mme RERIBALLAH Hafida  
Relizane

Maître de conférences (B) (U.

اهداء

...نحن، لعرباوي خديجة وحبشاوي مروى، نقف في نهاية هذا المشوار، وقلوبنا لا تزال تنبض بذكرى كل لحظة مررنا بها واليوم، بين هذه الصفحات، لا تجدون فقط بحث تخرج، بل تجدون ذاكرة عمر، وحكاية... تعبنا، تألمنا، بكينا، لكننا واصلنا إلى والدينا، الذين منحونا الحياة، ثم منحونا الحلم، ثم ساروا معنا إليه،... نهدي هذا التخرج إرادة، ونبض صداقة لا يذبل إلى أمي، خديجة (رحمها الله)، التي غابت عن شكرنا لأنكم كنتم النور، والدعاء، والدافع الصامت في كل لحظة ضعف هذا التخرج... وعد أوفيت به لك،... عيني، ولم تغب عن قلبي، إلى من علمتني كيف أنهض، ثم رحلت وأنا لا أزال أتعلم إلى إخوتنا وأخواتنا، أنتم الجدار الذي احتمينا به حين انهار التعب فوق فادعي لي من حيث أنت، أن أواصل كما أردت لي إلى أصدقائنا، الذين شاركونا الصمت، والمزاح، والانهيارات. أكتافنا، أنتم الدعاء الذي سبقنا، واليد التي رفعتنا دون أن نطلب إلى أستاذنا الفاضل بوزيان ملياني، الذي لم يكن فقط. الخفيفة بين فصول الدراسة، لولا وجودكم، لما كان المشوار بهذا الطعم مُعلماً، بل كان إنساناً نبيلاً، صدقت كلماته، وهادت بها قلوبنا، كل حرف في هذه الصفحات، يحمل من صبرك علينا جزءاً من وأخيراً... إلينا نحن، أنا خديجة، وأنا مروى، لأننا لم نخذل أحلامنا، ولم نخذل بعضنا، هذا التخرج لنا، بقدر ما هو نجاحنا. هنا نبدأ، لا نُنهي 🌸 لكل من نحب

**Résumé:** Dans un contexte marqué par la transition énergétique, les véhicules à hydrogène apparaissent comme une solution prometteuse aux limites des véhicules électriques à batterie. En combinant une pile à combustible et une batterie, ils assurent une propulsion propre, efficace et réactive. Ce travail vise à modéliser, simuler et commander un véhicule électrique hybride à hydrogène, en mettant l'accent sur la gestion énergétique et le contrôle des convertisseurs. Les simulations sont réalisées sous MATLAB/Simulink pour évaluer la performance dynamique du système. Diverses stratégies de commande sont testées, incluant les régulateurs PI/PID et les réseaux de neurones NARX. L'étude compare leurs performances face aux variations de charge et de puissance. La commande vectorielle du moteur PMSM est également intégrée pour améliorer le rendement. Le mémoire est structuré en quatre chapitres abordant les généralités, la pile à combustible, la modélisation et la simulation du système. L'objectif est de proposer une solution de mobilité fiable, performante et durable.

**Mots clés :** Véhicule à hydrogène, pile à combustible, batterie, convertisseur DC-DC, , réseau de neurones NARX, commande vectorielle, moteur PMSM.

**المخلص :** في سياق يتميز بالتحول الطاقوي، تظهر المركبات الهيدروجينية كحل واعد لتجاوز حدود المركبات الكهربائية المعتمدة على البطاريات. من خلال الجمع بين خلية وقود وبطارية، توفر هذه المركبات دفعاً نظيفاً وفعالاً وسريع الاستجابة. يهدف هذا العمل إلى نمذجة ومحاكاة والتحكم في مركبة كهربائية هجينة تعمل بالهيدروجين، مع التركيز على إدارة الطاقة والتحكم في المحولات. تم إجراء المحاكاة باستخدام برنامج MATLAB/Simulink لتقييم الأداء الديناميكي للنظام. تم اختبار استراتيجيات تحكم متعددة، بما في ذلك المنظمات PI/PID والشبكات العصبية NARX. كما تم مقارنة أدائها في مواجهة تغيرات الحمل والطاقة. كما تم دمج التحكم الشعاعي لمحرك PMSM بهدف تحسين الكفاءة.

**الكلمات المفتاحية:** مركبة تعمل بالهيدروجين، خلية وقود، بطارية، محول DC-DC ، شبكة عصبية NARX ، التحكم الشعاعي، محرك PMSM.

**Abstract:** In the context of the energy transition, hydrogen vehicles are emerging as a promising solution to the limitations of battery electric vehicles. By combining a fuel cell and a battery, they provide clean, efficient, and responsive propulsion. This work aims to model, simulate, and control a hydrogen hybrid electric vehicle, with a focus on energy management and converter control. Simulations are carried out using MATLAB/Simulink to evaluate the system's dynamic performance. Various control strategies are tested, including PI/PID controllers and NARX neural networks. The study compares their performance under different load and power conditions. Vector control of the PMSM motor is also implemented to enhance efficiency. The thesis is structured into four chapters covering general concepts, the fuel cell, system modeling, and simulation. The objective is to propose a reliable, high-performance, and sustainable mobility solution.

**Keywords:** Hydrogen vehicle, fuel cell, battery, DC-DC converter, NARX neural network, vector control, PMSM motor.

## Sommaire

Dédicace	
Résumé	
Sommaire	
Liste des figures	
Introduction générale.....	03
Chapitre I : Généralités sur les véhicules électriques	
I-1. Introduction.....	06
I-2. Définition d'un véhicule électrique :.....	06
I-3. Histoire des véhicules électriques :.....	07
I-4. Les architectures du véhicule à pile à combustible :.....	08
I-4.1. Le véhicule ayant l'hydrogène comme source d'énergie .....	09
I-4.2. Le véhicule à hydrogène équipé d'une batterie rechargeable :.....	10
I-4.3. Le véhicule qui utilise l'hydrogène en prolongateur d'autonomie.....	12
I-5. Fonctionnement d'un véhicule électrique :.....	13
I-5.1. La batterie :.....	13
I-5.2. Transmission et simplicité mécanique :.....	14
I-5.3. Le freinage régénératif :.....	14
I-5.4. Gestion de la panne d'énergie :.....	15
I-6. Les différents types de véhicules électriques :.....	15
I-6.1. Véhicules 100 % électriques à batterie (BEV) :.....	16
I-6.2. Véhicules à autonomie étendue (REEV) :.....	16
I-6.3. Véhicules à pile à combustible (FCEV) :.....	16
I-6.4. Véhicules hybrides non rechargeables (HEV).....	16
I-6.5. Véhicules hybrides rechargeables (PHEV).....	17
I-6.6. Véhicules hybrides légers (MHEV) :.....	17
I-6.7. Hybrides classiques ou hybrides purs (SHEV) :.....	17
I-7. Les différentes architectures de traction :.....	17
I-7.1. Véhicules électriques mono-moteur (DC) :.....	18
I-7.2. Véhicules électriques bi-moteur (AC) :.....	18
I-8. Types de moteurs électriques :.....	18
I-8.1. Moteurs à courant continu (CC) :.....	18
I-8.2. Moteurs à courant alternatif (AC) :.....	19
I-8.2.1. Moteurs à induction :.....	19
I-8.2.2. Moteurs synchrones :.....	19
I-8.3. Moteurs sans balais (Brushless) :.....	19
I-9. Les convertisseurs statiques :.....	19
I-9.1. Redresseurs (AC/DC) :.....	19
I-9.2. Hacheurs (DC/DC) :.....	19
I-9.3. Onduleurs (DC/AC) :.....	20
I-10. Durée de vie d'un moteur de voiture électrique :.....	20
I-11. Durée de vie d'une batterie de voiture électrique :.....	20
I-12. Puissance d'une voiture électrique :.....	20
I-13. Supercondensateurs :.....	20
I-14. Avantages des véhicules électriques :.....	20
I-15. Inconvénients des véhicules électriques :.....	21
I-16. La pile à combustible :.....	22
I-17. Conclusion :.....	22

Chapitre II : La pile à combustible	
II-1.Introduction	23
II-2.Définition	23
II-3.Historique	23
II-4.Généralités	24
II-5.Le principe de fonctionnement	25
II-6.Structure générale	26
II-7.Les types de piles à combustible	27
II-7.1.Pile à électrolyte polymère (PEMFC)	28
II-7.2.Pile alcaline (AFC)	29
II-7.3.Pile à acide phosphorique (PAFC)	30
II-7.4.Pile à carbonate fondu (MCFC)	31
II-8.Système de piles à combustible	33
II-8.1.Processeur de combustible	33
II-8.2.Conditionneurs d'alimentation	34
II-8.3.Compresseurs d'air	35
II-8.4.Humidificateurs	35
II-9.Production d'hydrogène	36
II-9.1.À partir des combustibles fossiles	36
II-9.2.Vaporeformage	37
II-9.3.Oxydation partielle	37
II-9.4.Par énergies renouvelables	38
II-9.5. Domaines d'application de l'hydrogène	41
II-10. Conclusion	43
Chapitre III : Modélisation de la chaîne à véhicule électrique	
III-1.Introduction	45
III-2.Convertisseurs DC/DC	45
III-3.Les types de hacheurs	46
III.3.1. Hacheur « BUCK »	46
III.3.2. Hacheur « BOOST »	49
III.3.3.Hacheur « BUCK-BOOST » Bidirectionnel	52
III.4. Modélisation d'une batterie lithium ion	57
III.5.Modélisation de l'onduleur à deux niveaux de tension	59
III.5.1.Commande par MLI (Stratégie triangulo – sinusoïdale)	60
III.5.2.Caractéristiques de la MLI	61
III.6. Modélisation de la machine synchrone à aimants permanents	64
III.6.1.Introduction	64
III.6.2.Avantages et inconvénients de la MSAP	64
III.6.3.Hypothèses simplificatrices	64
III.6.4.Modélisation triphasée de la machine MSAP	65
III.7.Modélisation d'un véhicule hybride	68
III.7.1.Force de résistance au roulement Froul	69
III.8.Conclusion	72
Chapitre IV : Simulation de la commande du véhicule à hydrogène	
IV-1. Introduction	74
IV.2. ConvertisseurDC	74
IV.3. Application de la commande PI en mode tension	75
IV.4.Application de la commande réseau NARX en mode tension	76
IV.5.Principe de la commande vectorielle	78
IV.6. Commande vectorielle directe	80

IV.6.1	Structure d'orientation .....	82
IV.6.2	Calcul des régulateurs .....	82
IV.7.	Resultats de simulation et discussion .....	85
IV.8.	Conclusion.....	93
	Conclusion générale .....	94
	Annexe.....	95
	Bibliographie.....	96

## Liste des figures

N° Figure	Titre de la figure	Page
I.1	Exemples des voitures électriques du début du 20 <sup>e</sup> siècle	08
I.2	Schéma général d'un véhicule à pile à combustible	09
I.3	Le véhicule ayant l'hydrogène	10
I.4	Composition et fonctionnement du système hybride	11
	Station hydrogène	12
I.5		
I.6	Batterie	13
I.7	Transmission et simplicité mécanique	14
I.8	Le freinage régénératif	15
I.9	Moteurs à courant continu	19
I.10	Supercondensateurs	21
II.1	la pile à combustible	25
II.2	Fonctionnement d'une pile à combustible	26
II.3	Structure d'un empilement des cellules PEMFC (Électro Encyclo)	28
II.4	l'ectrolyse de l'eau	40
II.5	Principe de la réaction de photo-décomposition de l'eau	41
III.1	Schéma de principe d'un « Buck »	46
III.2	.forme de tension dans la bobine « buck ».	48
III.3	Schéma de principe d'un « boost ».	49
III.4	Forme de tension dans la bobine « boost ».	50
III.5	Schéma de principe d'un « buck-boost » bidirectionnel.	54
III.6	. Schéma de principe d'un « buck-boost » bidirectionnel en mode « boost ».	55
III.7	.Forme d'onde de tension et de courant dans l'inductance en mode « boost ».	56
III.8	.forme d'onde de tension (U1,U2) aux bornes des mosfets « mode boost ».	57
III.9	Modèle d'une batterie lithium ion	58
III.10	Schéma de l'onduleur associé à une charge triphasée.	60
III.11	Principe de la commande à MLI (stratégie triangulo -sinusoïdale)	60
III.12	. Schéma de principe d'un onduleur à MLI.	62

III.13	Représentation électrique de la MSAP.	65
III.14	L'ensemble des forces	69
III.15	L'action de ces force sur le véhicule	69
III.16	Définition d'une pente	71
IV.1	Commande PI en mode tension d'un convertisseur Buck-Boost bidirectionnel.	75
IV.2	Diagramme de structure du NARXNN	77
IV.3	Erreur quadratique moyenne	77
IV.4	Commande par réseaux de neurone en mode tension d'un convertisseur Buck-Boost bidirectionnel.	78
IV.5	Schéma équivalent de la MSAP à courant direct nul	79
IV.6	Modèle en tension avec ( $v_d = 0$ )	80
IV.7	<i>Schéma de principe de la commande vectorielle directe d'une MSAP</i>	81
IV.8	Schéma bloc " DFOC" (à gauche) et synoptique (à droite)	82
IV.9	Boucle de régulation de la vitesse	83
IV.10	placement des pôles choisi	83
IV.11	Boucle de courant $i_d$	84
IV.12	Modèle Simulink du véhicule électrique alimenté par pile à combustible avec commande vectorielle.	86
IV.13	Modèle Simulink de la pile à combustible PEM	86
IV.14	Répartition et évolution des puissances dans un système hybride Fuel Cell – Batterie – Moteur"	87
IV.15	Comportement dynamique du courant, de la tension et de l'état de charge dans un véhicule électrique hybride PEM-batterie	89
IV.16	Analyse temporelle des grandeurs électriques et mécaniques dans une PMSM pilotée par commande vectorielle	90
IV.17	Évolution temporelle du signal d'accélérateur, vitesse du véhicule, couple moteur et puissance dans un VE hybride	92

# **Introduction Générale**

## **Introduction Générale**

La raréfaction des énergies fossiles, l'augmentation des besoins énergétiques mondiaux et les préoccupations croissantes liées au changement climatique ont conduit les chercheurs et les industriels à s'intéresser à des solutions de transport plus respectueuses de l'environnement. Dans ce contexte, les véhicules électriques se sont progressivement imposés comme une alternative viable aux véhicules thermiques traditionnels. Toutefois, malgré leurs nombreux avantages, notamment en matière d'émissions locales nulles et de rendement élevé, les véhicules électriques à batterie présentent encore certaines limites, notamment en termes d'autonomie, de temps de recharge et d'impact environnemental lié à la fabrication et au recyclage des batteries [1].

C'est dans ce cadre que les véhicules à hydrogène, utilisant une pile à combustible (Fuel Cell) comme source d'énergie, représentent une solution innovante et prometteuse. En combinant l'hydrogène – un vecteur énergétique propre – et l'oxygène de l'air, la pile à combustible produit de l'électricité sans émission directe de gaz à effet de serre, ne rejetant que de la vapeur d'eau. Ce système permet d'alimenter un moteur électrique, offrant ainsi les avantages de l'électromobilité tout en répondant aux exigences d'autonomie et de flexibilité. En parallèle, la combinaison de la pile à combustible avec une batterie forme une architecture hybride capable d'optimiser la gestion de l'énergie, d'assurer une meilleure réactivité du système et d'alléger la charge imposée à chaque composant. [2].

Le pilotage et la commande des composants de cette chaîne énergétique sont cependant d'une grande complexité. La diversité des sources d'énergie (pile à combustible, batterie) et la variabilité des conditions de fonctionnement (accélérations, décélérations, pentes, etc.) nécessitent des stratégies de commande robustes et adaptatives. Par ailleurs, l'intégration de convertisseurs DC/DC, la commande vectorielle des moteurs PMSM (Permanent Magnet Synchronous Motor) et la stabilité des tensions et courants dans un environnement dynamique sont autant de défis à relever [3].

Ce travail s'inscrit dans cette problématique et vise à modéliser, simuler et analyser un véhicule électrique hybride à hydrogène, en se concentrant particulièrement sur la commande

des convertisseurs de puissance et sur l'optimisation de la gestion énergétique entre la pile à combustible et la batterie. L'environnement de simulation MATLAB/Simulink est utilisé pour concevoir des modèles dynamiques précis du système global, permettant de tester différentes stratégies de régulation.

Plus spécifiquement, ce mémoire propose :

- d'étudier le fonctionnement des véhicules électriques et hybrides avec une attention particulière portée à l'architecture à pile à combustible ;
- de modéliser la chaîne de traction complète, depuis la source d'énergie (hydrogène) jusqu'au moteur électrique, en passant par les convertisseurs de puissance ;
- d'implémenter et de comparer différentes stratégies de commande, notamment les régulateurs PI/PID classiques et les approches avancées comme les réseaux de neurones NARX (Nonlinear AutoRegressive eXogenous) ;
- d'évaluer le comportement dynamique du véhicule lors de scénarios de conduite réalistes, en analysant les courbes de puissance, de courant, de couple et de vitesse ;
- et enfin, de dégager des perspectives d'amélioration et de recherche futures autour des architectures hybrides et intelligentes.

Le contenu de ce mémoire est structuré en quatre chapitres principaux, chacun abordant une étape fondamentale du développement du système étudié :

Le premier chapitre introductif présente les fondements technologiques des véhicules électriques et de leurs différentes catégories. Il revient sur les enjeux environnementaux et technico-économiques liés à l'usage des VE, en mettant en évidence les avantages et limites des différentes technologies (batterie seule, hybride, hydrogène). L'architecture typique d'un véhicule électrique est détaillée, ainsi que ses composants majeurs : batterie, moteur électrique, convertisseurs, système de commande.

Le deuxième chapitre est consacré à l'étude des piles à combustible, et plus précisément des PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cell), particulièrement adaptées aux applications de mobilité. Le principe de fonctionnement, la structure interne, les réactions électrochimiques et les paramètres de modélisation sont présentés. Les avantages, contraintes et exigences d'exploitation sont également abordés. Ce chapitre constitue la base pour la modélisation énergétique du système hybride.

Dans le troisième chapitre , l'accent est mis sur la modélisation des différents composants du système de propulsion hybride. La pile à combustible, la batterie, le convertisseur DC/DC, l'onduleur, et la machine synchrone à aimants permanents sont modélisés avec précision dans l'environnement MATLAB/Simulink. Le couplage entre les éléments, les équations de fonctionnement et les hypothèses retenues sont présentés. Ce chapitre pose les bases techniques nécessaires à l'implémentation des stratégies de commande.

Le dernier chapitre représente le cœur de l'étude. Il s'agit d'implémenter et de tester différentes stratégies de commande sur le modèle complet du système. Une première approche repose sur un régulateur PI en mode tension, appliqué à un convertisseur Buck-Boost bidirectionnel. Puis, une commande intelligente à base de réseau de neurones NARXNN est introduite et comparée aux méthodes classiques. La commande vectorielle du moteur PMSM est également intégrée et analysée en conditions dynamiques. Les résultats de simulation sont interprétés à travers des courbes temporelles illustrant l'évolution de la puissance, du courant, du couple moteur et de la vitesse du véhicule. Une analyse des performances, de la stabilité et du comportement dynamique est réalisée.

**Chapitre I :**  
**Généralités sur les véhicules électriques**

## **I.1 Introduction**

Un véhicule électrique (VE) est un moyen terrestre de transport actionné par un ou plusieurs moteurs électriques. Ces moteurs sont généralement alimentés par une batterie rechargeable, qui peut être rechargée via une source d'électricité externe. Certains modèles utilisent également une pile à combustible à hydrogène pour produire de l'électricité à bord. Contrairement aux véhicules thermiques, les véhicules électriques ne rejettent pas de gaz d'échappement lors de leur utilisation, ce qui en fait une alternative plus respectueuse de l'environnement[4].

Au contraire des véhicules à motorisation thermique qui s'alimentent en carburants fossiles (essence, diesel), le véhicule électrique puise son énergie d'une source embarquée, habituellement une batterie rechargeable, apte à stocker l'électricité requise à sa mise en route. Ce type de véhicule ne produit aucune émission polluante directe (gaz à effet de serre ou particules fines) lors de son utilisation, ce qui en fait une solution privilégiée pour réduire l'empreinte carbone du secteur des transports. Il se distingue également par son rendement énergétique élevé, son fonctionnement silencieux et ses coûts d'entretien réduits, en raison de la simplification de la chaîne de traction (moins de pièces mécaniques en mouvement). Le véhicule électrique peut être chargé à partir d'une prise ménagère, d'un poste de charge de station ou, dans certains dispositifs, à partir d'infrastructures plus avancées comme les stations de recharge rapide et des systèmes de recharge sans fil [5].

## **I.2 Définition d'un véhicule électrique**

Un véhicule électrique est un moyen terrestre de transport actionné par un ou plusieurs moteurs électriques. Ces moteurs sont généralement alimentés par une batterie rechargeable, qui peut être rechargée via une source d'électricité externe. Certains modèles utilisent également une pile à combustible à hydrogène pour produire de l'électricité à bord. Contrairement aux véhicules thermiques, les véhicules électriques ne rejettent pas de gaz d'échappement lors de leur utilisation, ce qui en fait une alternative plus respectueuse de l'environnement [6].

### **I.3 Histoire des véhicules électriques**

L'histoire des véhicules électriques remonte au XIX<sup>e</sup> siècle, bien avant l'invention des moteurs à combustion interne. Déjà au début des années 1830, des inventeurs comme Robert Anderson ont conçu les premiers prototypes équipés de sources d'électricité rudimentaires. Lors de la découverte, en 1859, de la batterie rechargeable au plomb-acide par Gaston Planté, les premiers véhicules électriques fonctionnels sont apparus à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle. À cette époque, ils étaient même plus populaires que les véhicules thermiques, notamment en milieu urbain, en raison de leur simplicité d'utilisation, de leur silence et de l'absence d'émissions polluantes. Cependant, cette popularité déclina très vite au début du XX<sup>e</sup> siècle, avec notamment l'apparition du démarreur électrique, la réduction du coût du pétrole, et les améliorations des performances des véhicules à essence en vitesse et en autonomie[7]. On attendra les années 1970, avec les premiers chocs pétroliers, pour revoir apparaître l'intérêt autour des véhicules électriques, bien qu'ils soient encore contraints par des limitations techniques, principalement au niveau des batteries. C'est seulement à partir des années 2010 que l'automobile électrique connaît un véritable essor, soutenu par les progrès technologiques en matière d'électronique de puissance, l'amélioration des niveaux de performance des batteries au lithium-ion, ainsi que par la conscience des enjeux environnementaux. Les constructeurs tels que Tesla ont largement contribué à populariser ce moyen de transport, en le rendant à la fois performant, sûr et désirable. Aujourd'hui, la voiture électrique est au centre de la politique de transition énergétique à l'échelle mondiale, et son évolution ne cesse d'accélérer grâce à l'innovation permanente et à l'appui des politiques publiques[8].

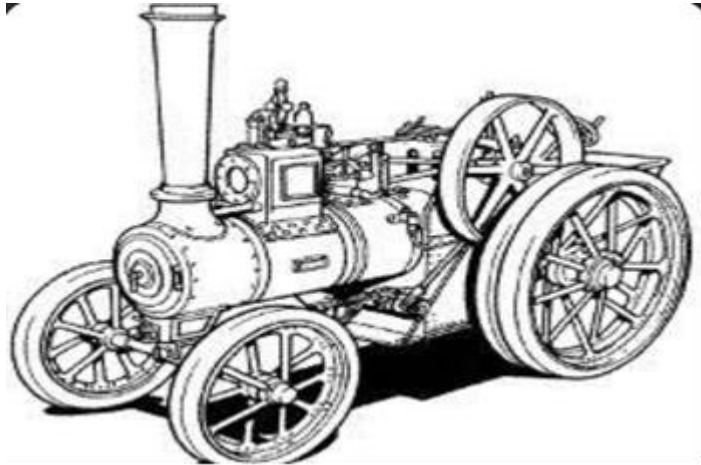






Figure.I.1.Exemples des voitures électriques du début du 20ème siècle

Table I .1 Détails sur quelques modèles de véhicules électriques

constructeur	véhicule	Pile à combustible	Source secondaire d'énergie	Stockage de l'hydrogène	Auto-nomie	Motorisation
Honda /Honda/	FCX 	86KW (Honda)	Super-condensateur	Réservoir haute pression (156,1,350bar)	430 km	80 kw
PSA /PSA/	Partner Taxi-PAC 	5,5 kw	Batteries Ni-MH	Réservoir haute pression (300bar)	250 km	22 kw
Nissan /Nissan/	X-Trail FCHV* 	90 KW (Nissan)	Batterie Li-ion	Réservoir haute pression (700 bar)	500 km	90 kw
Dailmer-Chrysler /AFH2/	Class A F-Cell 	85 kw (Ballard)	Batteries Ni-MH	Réservoir haute pression (350 bar)	150 km	65 kw

#### I.4 Les architectures du véhicule à pile à combustible

Il existe trois architectures principales pour ce type d'énergie :

- Le véhicule ayant l'hydrogène comme source d'énergie principale
- Le véhicule à hydrogène équipé d'une batterie rechargeable

- Le véhicule qui utilise l'hydrogène en prolongateur d'autonomie

Nous allons les développer ci-dessous

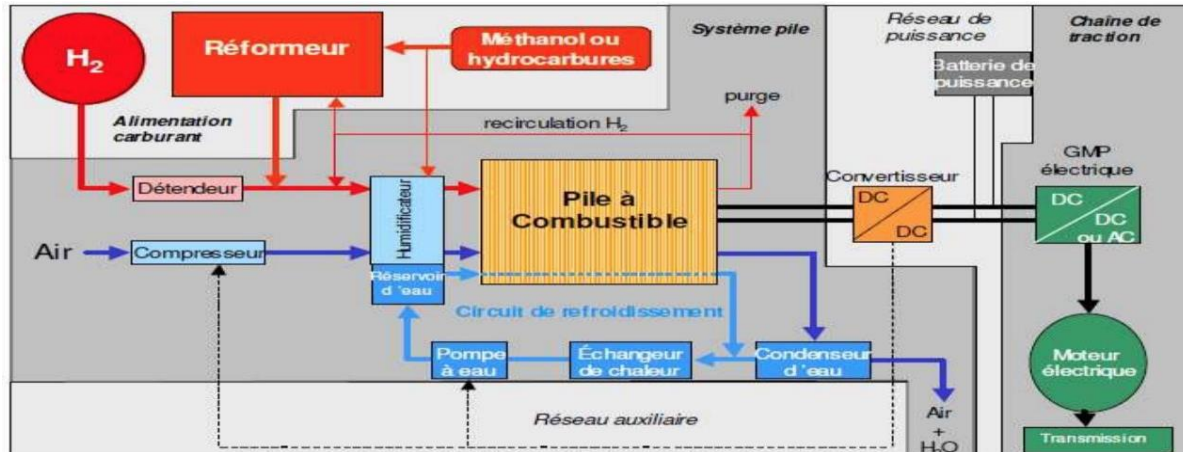


Figure.I.2.Schéma général d'un véhicule à pile à combustible - Source Renault – PSA, 1998

#### I.4.1 Le véhicule ayant l'hydrogène comme source d'énergie principale

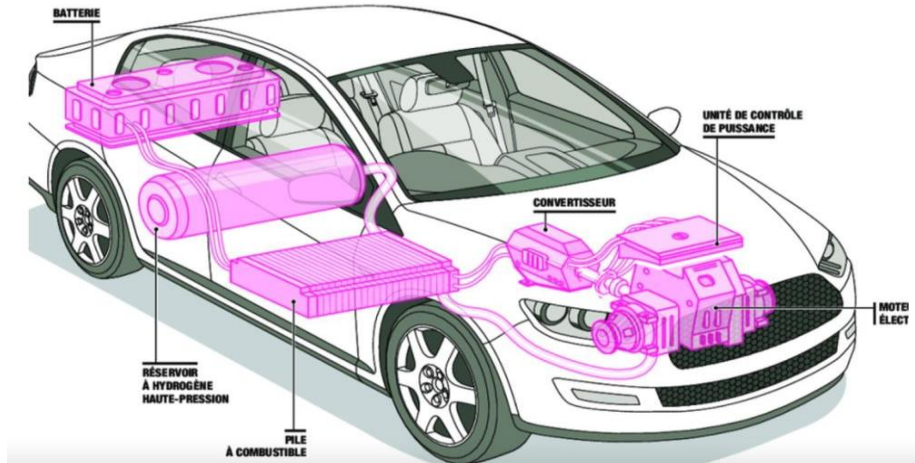
Dans cette architecture, la pile à combustible fournit l'essentiel de la puissance nécessaire à la propulsion du véhicule. Elle est dimensionnée pour délivrer une puissance équivalente à celle du moteur électrique, permettant ainsi de répondre à tous les besoins énergétiques, en toutes circonstances. La batterie, de faible capacité (1 à 2 kWh), n'est pas rechargeable par une prise externe. Elle joue uniquement un rôle de tampon énergétique, en absorbant l'énergie récupérée lors des phases de décélération ou de freinage régénératif et en restituant cette énergie lors des accélérations ou des demandes de puissance instantanée. Ce système est très proche de l'architecture d'un véhicule hybride non rechargeable (HEV), à la différence que l'énergie provient ici d'une pile à combustible alimentée en hydrogène, et non d'un moteur thermique [9].

#### Exemple type : Toyota Mirai

La Toyota Mirai [4] est un exemple emblématique de cette architecture :

- Puissance du moteur électrique : 100 kW
- Puissance de la pile à combustible : 100 kW
- Capacité de la batterie : entre 1 et 2 kWh

Ce type de véhicule se distingue par une autonomie élevée (généralement autour de 500 à 650 km) et un temps de ravitaillement très court (environ 3 à 5 minutes) .



**Figure.I.3. Le véhicule ayant l'hydrogène**

#### **I.4.2 Le véhicule à hydrogène équipé d'une batterie rechargeable**

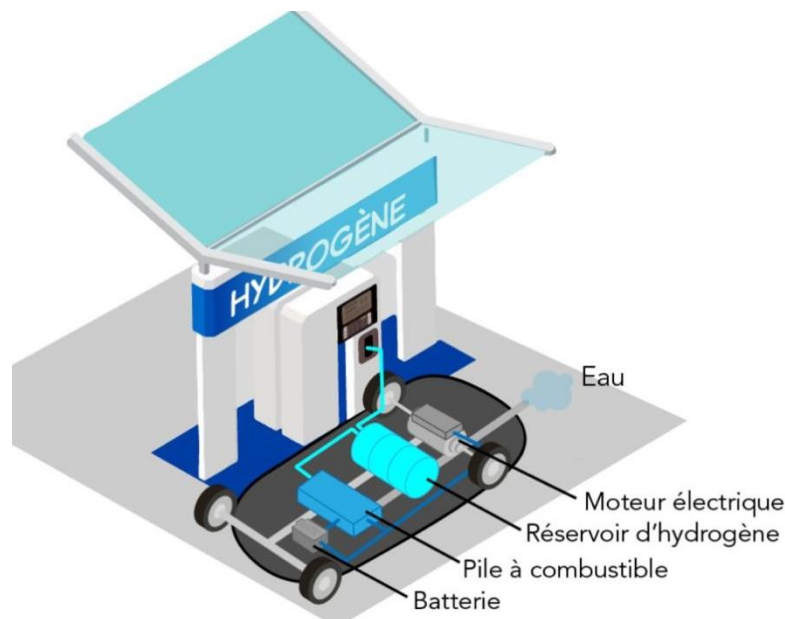
Dans cette configuration, le véhicule combine deux sources d'énergie : une batterie de traction rechargeable via une IRVE (Infrastructure de Recharge pour Véhicule Électrique) et une pile à combustible alimentée par de l'hydrogène. La puissance du moteur électrique (par exemple 100 kW) est supérieure à celle de la pile à combustible, qui varie généralement entre 40 et 100 kW. Cela implique que la pile à combustible ne peut pas, à elle seule, couvrir l'ensemble des besoins énergétiques du véhicule, notamment lors des phases de forte sollicitation telles que les accélérations, les montées ou la conduite à vitesse élevée, où la batterie intervient en complément. Par conséquent, la capacité de la batterie est plus importante que dans les architectures hybrides classiques, se situant typiquement entre 10 et 15 kWh. Cette capacité accrue permet une conduite entièrement électrique sur de courtes distances, contribue à la réduction de la consommation d'hydrogène, et optimise la récupération d'énergie lors des phases de freinage. Le mode d'exploitation des deux sources d'énergie — pile à combustible et batterie — varie selon les conditions de conduite : en milieu urbain ou pour les trajets courts, la priorité est donnée à l'usage de la batterie, tandis que sur les longs trajets ou lorsque le niveau de charge de la batterie devient faible, c'est la pile à combustible qui assure l'alimentation principale du

moteur électrique . Cette architecture est comparable à celle d'un véhicule hybride rechargeable (PHEV), mais ici, l'énergie supplémentaire provient de l'hydrogène au lieu d'un moteur thermique.

Le Citroën ë-Jumpy Hydrogen illustre bien cette architecture :

- Puissance du moteur électrique : 100 kW
- Puissance de la pile à combustible : 45 kW
- Capacité de la batterie : 10,5 kWh

Ce système hybride permet une grande flexibilité d'usage tout en assurant des émissions nulles à l'usage [10].



**Figure.I.4.Composition et fonctionnement du système hybride**

### **I.4.3. Le véhicule qui utilise l'hydrogène en prolongateur d'autonomie**

Dans cette architecture, le véhicule est avant tout un véhicule électrique, équipé d'une batterie de grande capacité (entre 30 et 50 kWh), qui assure la majorité des trajets quotidiens. La pile à combustible ne sert pas de source principale d'énergie, mais joue un rôle de prolongateur d'autonomie.

Elle entre en action uniquement lorsque la batterie atteint un seuil de décharge défini, afin : d'alimenter directement le moteur électrique, ou de recharger la batterie en roulant, prolongeant ainsi l'autonomie sans s'arrêter. La puissance de la pile à combustible est donc bien plus faible que celle du moteur électrique, souvent comprise entre 5 et 40 kW, car elle n'a pas besoin de répondre aux demandes de puissance instantanée. [11].

- En mode électrique pur (batterie pleine), le véhicule roule comme un VE classique,
- Lorsque la batterie est faible, la pile prend le relais en mode générateur.

Comparaison:

Ce système s'apparente à un véhicule électrique à prolongateur d'autonomie thermique (comme certaines versions de la BMW i3 REx), mais ici, le moteur thermique est remplacé par une pile à combustible, sans aucune émission polluante .



**Figure .I.5.station hydrogen**

Exemple type :

Ce type d'architecture est encore rare mais en cours de développement, notamment dans les véhicules utilitaires ou les flottes professionnelles nécessitant grande autonomie et recharge flexible.

## I.5. Fonctionnement d'un véhicule électrique

### I.5.1 La batterie

La batterie d'un véhicule électrique est composée de milliers de cellules regroupées sous forme de petits modules cylindriques ou de poches (pouch cells), assemblées pour former un bloc complet. Ces cellules stockent l'énergie électrique, exprimée en kilowattheures (kWh), une unité comparable au "litre" d'un réservoir de carburant dans un véhicule thermique [12].

La puissance de charge ou de décharge de la batterie, quant à elle, est exprimée en kilowatts (kW).

À titre d'exemple, une batterie de 50 kWh se recharge à une puissance de 10 kW en environ 5 heures. Ce temps est estimatif car, au-delà de 80 % de charge, le système réduit automatiquement la puissance de recharge pour préserver la durée de vie de la batterie — à l'image d'une bouteille d'eau que l'on remplit plus lentement vers la fin pour éviter les débordements. L'électricité stockée est ensuite dirigée vers un ou plusieurs moteurs électriques.

Le principe de fonctionnement est relativement simple : un champ magnétique généré dans le stator fait tourner le rotor. Ce mouvement peut être transmis directement aux roues ou via un réducteur à un seul rapport, permettant d'optimiser la vitesse de rotation du moteur [13].



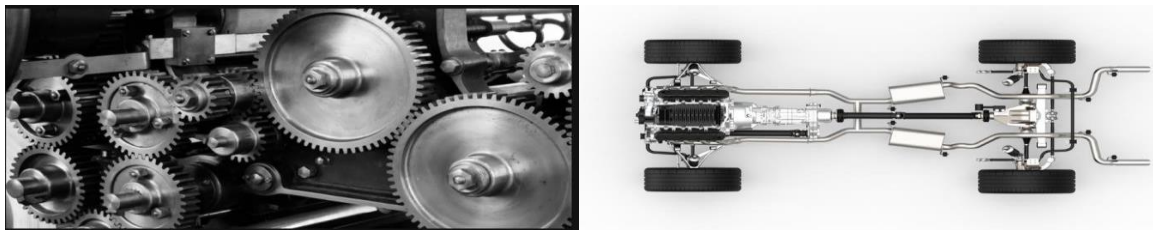
Figure.I.6.batterie

### I.5.2 Transmission et simplicité mécanique

Les véhicules électriques sont dépourvus de boîte de vitesses traditionnelle. Cela s'explique par la capacité du moteur électrique à fonctionner efficacement sur une large plage de

régimes, atteignant plusieurs dizaines de milliers de tours par minute. Contrairement au moteur thermique, qui convertit un mouvement rectiligne alternatif en rotation, le moteur électrique délivre directement un mouvement rotatif.

Cette simplicité mécanique se traduit par un nombre réduit de pièces mobiles, l'absence de courroie de distribution, de filtre à huile ou encore d'embrayage, ce qui réduit considérablement les besoins en entretien[14].

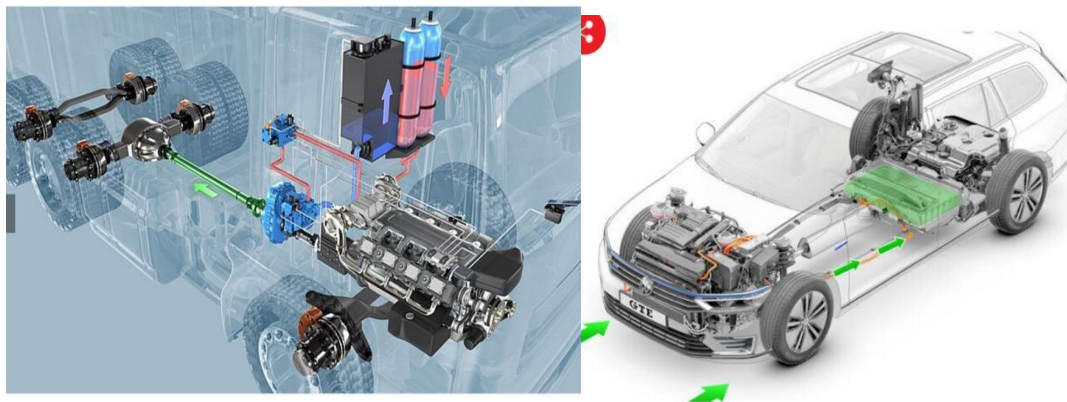


**Figure .I.7. Transmission et simplicité mécanique**

### I.5.3 Le freinage régénératif

Un autre atout majeur des véhicules à batterie est la capacité de récupération d'énergie grâce au freinage régénératif. Lorsqu'on relâche l'accélérateur ou qu'on freine, le moteur cesse d'être alimenté et agit comme un générateur : il transforme l'énergie cinétique du véhicule en électricité, réinjectée dans la batterie.

Ce système prolonge l'autonomie du véhicule tout en réduisant l'usure des freins classiques. Sur la plupart des modèles récents, il est même possible de régler l'intensité du frein régénératif, permettant dans certains cas un freinage quasi complet sans toucher la pédale de frein[15].



**Figure .I.8. Le freinage régénératif**

#### **I.5.4 Gestion de la panne d'énergie**

Les pannes mécaniques sont moins fréquentes sur les véhicules électriques, mais comme pour tout véhicule, une panne d'énergie peut survenir en cas de mauvaise planification. Lorsque le niveau de batterie devient faible (généralement en dessous de 10 %), le véhicule alerte automatiquement le conducteur via des messages sur le tableau de bord ou l'écran central. Selon le modèle, il reste alors entre 20 et 50 km d'autonomie pour rejoindre une borne de recharge.

Si le véhicule continue de rouler sans être rechargé, la puissance moteur est réduite progressivement.

À un seuil critique, un mode de sécurité, souvent appelé mode "tortue", se déclenche, limitant la vitesse à environ 10 km/h, obligeant l'utilisateur à se stationner au plus vite. Ce système permet d'éviter l'arrêt brutal et garantit un minimum de sécurité. [16].

#### **I.6 Les différents types de véhicules électriques**

L'univers des véhicules électriques regroupe plusieurs technologies, chacune répondant à des besoins spécifiques en matière de mobilité, d'autonomie et de consommation énergétique. Voici les principales catégories :

##### **I.6.1 Véhicules 100 % électriques à batterie (BEV – Battery Electric Vehicles)**

Les véhicules électriques à batterie sont entièrement propulsés par un ou plusieurs moteurs électriques alimentés par une batterie rechargeable.

Ils ne disposent d'aucun moteur thermique et n'émettent aucune émission polluante directe lors de leur fonctionnement.

La recharge se fait à l'arrêt via une prise domestique ou une borne de recharge. Les BEV représentent aujourd'hui la solution la plus écologique pour une mobilité zéro émission, et conviennent particulièrement aux trajets urbains ou périurbains, avec une autonomie qui dépend de la capacité de la batterie[17].

##### **I.6.2 Véhicules à autonomie étendue (REEV – Range-Extended Electric Vehicles)**

Les REEV associent une chaîne de traction électrique à un générateur thermique auxiliaire. Contrairement aux hybrides classiques, le moteur thermique n'entraîne jamais

directement les roues : il sert uniquement à recharger la batterie lorsque celle-ci atteint un niveau faible.

Cette architecture permet d'augmenter l'autonomie du véhicule sans compromettre les avantages d'un mode de conduite majoritairement électrique [18].

### **I.6.3 Véhicules à pile à combustible (FCEV – Fuel Cell Electric Vehicles)**

Les FCEV fonctionnent grâce à une pile à combustible alimentée en hydrogène, qui produit de l'électricité par une réaction électrochimique avec l'oxygène de l'air. Ce processus ne rejette que de la vapeur d'eau, ce qui en fait une solution très propre.

Ces véhicules se distinguent par leur temps de recharge très court (comparable à celui d'un plein de carburant) et leur grande autonomie, les rendant intéressants pour les longs trajets ou les usages professionnels[19].

### **I.6.4 Véhicules hybrides non rechargeables (HEV – Hybrid Electric Vehicles)**

Les HEV combinent un moteur thermique et un ou plusieurs moteurs électriques, mais leur batterie ne peut pas être rechargée par une source externe.

L'énergie électrique est produite par le freinage régénératif et/ou le moteur thermique lui-même.

Ces véhicules offrent une meilleure efficacité énergétique que les véhicules thermiques traditionnels, surtout en circulation urbaine, grâce à l'assistance du moteur électrique dans certaines phases de conduite[20].

### **I.6.5 Véhicules hybrides rechargeables (PHEV – Plug-in Hybrid Electric Vehicles)**

Les PHEV disposent d'une motorisation mixte : un moteur thermique couplé à un moteur électrique et une batterie pouvant être rechargée sur le réseau électrique.

Ils permettent de rouler en mode 100 % électrique sur de courtes distances (généralement entre 40 et 80 km), puis de basculer automatiquement sur le moteur thermique pour les trajets plus longs.

Cette technologie offre un compromis intéressant entre mobilité zéro émission en ville et grande autonomie pour les longs déplacements [21].

### **I.6.6 Véhicules hybrides légers (MHEV – Mild Hybrid Electric Vehicles)**

Les MHEV utilisent un système électrique basse tension (souvent 48 V) pour assister le moteur thermique. Bien qu'ils ne soient pas capables de rouler en mode électrique pur, le moteur électrique apporte un soutien lors des accélérations ou au démarrage, réduisant ainsi la consommation de carburant et les émissions. C'est une solution intermédiaire entre le véhicule thermique classique et l'hybride complet[22].

### **I.6.7 Hybrides classiques ou hybrides purs (SHEV – Series Hybrid Electric Vehicles)**

Les SHEV fonctionnent principalement avec le moteur thermique, mais peuvent rouler brièvement en tout électrique, notamment à basse vitesse ou sur de courtes distances. Le moteur électrique intervient selon les besoins, en complément du moteur principal, afin d'optimiser la consommation globale du véhicule [23].

## **I.7 Les différentes architectures de traction**

Pour assurer la propulsion d'un véhicule électrique, deux grands types de moteurs peuvent être utilisés : les moteurs à courant continu (DC) et les moteurs à courant alternatif (AC). Le choix entre ces deux technologies dépend de plusieurs critères tels que le rendement, le coût, la simplicité de commande, la durabilité et les performances attendues. Chacun de ces moteurs possède des caractéristiques spécifiques qui influencent le comportement du véhicule, sa consommation d'énergie, ainsi que son intégration dans l'architecture globale de la chaîne de traction[24].

### **I.7.1 Véhicules électriques mono-moteur (machine à courant continu)**

Dans cette architecture, le véhicule est équipé d'un moteur à courant continu (DC), alimenté par une batterie via un variateur de vitesse, généralement sous la forme d'un hacheur réversible. Ce variateur permet de contrôler à la fois la vitesse et le sens de rotation du moteur. Le système comprend également un réducteur différentiel, dont le rôle est de réduire la vitesse de rotation du moteur tout en augmentant le couple transmis aux roues. Cette configuration est relativement simple, ce qui la rend intéressante pour certains véhicules urbains ou utilitaires légers, bien que les moteurs à courant continu soient aujourd'hui de moins

en moins utilisés, au profit des moteurs à courant alternatif plus performants et plus robustes [25].

### I.7.2 Véhicules électriques bi-moteur (machine à courant alternatif)

Dans ce type, la chaîne énergétique est doublée. C'est une architecture avec moteur synchrone (dans la roue), une batterie, deux variateurs (onduleurs), deux machines synchrones. L'onduleur est utilisé pour convertir le courant électrique continu fourni par la batterie en courant alternatif nécessaire au moteur de la voiture électrique [26].

## I.8 Types de moteurs électriques

Les moteurs utilisés dans les véhicules électriques ou hybrides peuvent être classés en plusieurs catégories selon le type de courant et la technologie de commande :

### I.8.1 Moteurs à courant continu (CC)

Ces moteurs utilisent un courant continu pour créer le champ magnétique nécessaire à la rotation. Ils sont particulièrement appréciés pour leur simplicité de commande du couple et de la vitesse.

On les retrouve souvent dans les applications simples comme les jouets, les petits ventilateurs ou les outils portatifs.

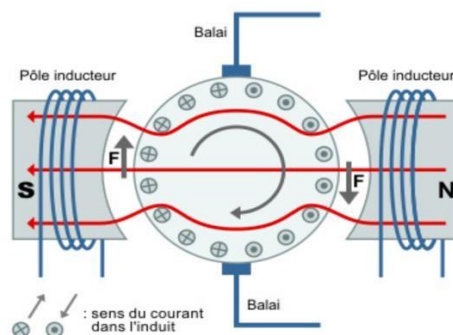


Figure (I.9) : Moteurs à courant continu

### I.8.2 Moteurs à courant alternatif (CA)

Fonctionnent à partir de courant alternatif. Deux sous-types :

- **I.8.2.1 Moteurs à induction** : les plus répandus, avec une rotation induite par le champ magnétique du stator.
- **I.8.2.2 Moteurs synchrones** : tournent à une vitesse constante synchronisée avec la fréquence du réseau ou du convertisseur[27].

### **I.8.3 Moteurs sans balais (Brushless)**

Éliminent les balais grâce à une commande électronique. Offrent efficacité, silence, durée de vie élevée. Très utilisés dans les véhicules électriques, drones et robots.

## **I.9 Les convertisseurs statiques**

### ***I.9.1 Redresseurs (AC/DC)***

Transforment le courant alternatif en courant continu. Utilisés pour alimenter les circuits à courant continu.

### ***I.9.2 Hacheurs (DC/DC)***

Convertissent une tension continue fixe en une tension continue réglable. Permettent de réguler la tension moteur ou optimiser la gestion batterie.

### ***I.9.3 Onduleurs (DC/AC)***

Transforment une tension continue en une tension alternative. Essentiels pour les moteurs AC alimentés par batterie.

## **I.10 Durée de vie d'un moteur de voiture électrique**

Les moteurs électriques sont très durables, pouvant atteindre 500 000 à plus d'un million de kilomètres, grâce à leur conception simple. À l'inverse, les moteurs thermiques dépassent rarement 300 000 km sans réparations lourdes. Dans un VE, les éléments les plus sensibles sont plutôt la batterie et l'électronique. [28].

## **I.11 Durée de vie d'une batterie de voiture électrique**

Elle dépend du nombre de cycles de charge/décharge, en moyenne de 1 000 à 1 500 cycles. Cela correspond à environ 10 ans d'utilisation, selon le kilométrage annuel. Elle est aussi influencée par l'environnement thermique et le vieillissement nature.

### I.12 Puissance d'une voiture électrique

La puissance mécanique dépend de l'énergie électrique délivrée par la batterie et du rendement du système de conversion. Une partie de l'énergie est perdue sous forme de chaleur ou de frottement. Le rendement d'un moteur électrique est en général supérieur à celui d'un moteur thermique.

### I.13 Supercondensateurs

Les supercondensateurs, ou ultracondensateurs, ont une densité de puissance élevée et se rechargent très rapidement. Bien qu'ils stockent moins d'énergie que les batteries, ils sont très efficaces pour fournir de courtes impulsions d'énergie. Leur durée de vie est aussi plus longue, avec une meilleure résistance au nombre de cycles.

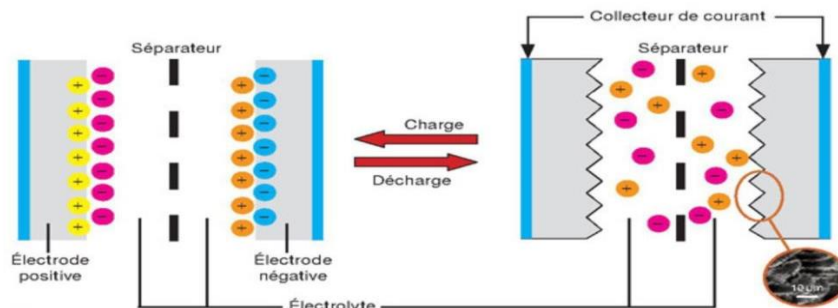


Figure (I.10) : Supercondensateurs

### I.14 Avantages des véhicules électriques

Les véhicules électriques présentent de nombreux atouts qui en font une alternative sérieuse aux motorisations thermiques, tant sur le plan environnemental que technique et économique :

- Zéro émission à l'usage : Absence de gaz d'échappement et de polluants (NO<sub>x</sub>, CO, particules fines), contribuant à une meilleure qualité de l'air.

- Électricité à faible empreinte carbone (en France) : Production majoritairement basée sur le nucléaire et les renouvelables.
- Silence de fonctionnement : Meilleur confort de conduite et réduction des nuisances sonores.
- Entretien réduit : Moins de pièces en mouvement, pas de vidange, pas de boîte de vitesses complexe, freinage régénératif.
- Coût d'usage inférieur : La recharge coûte souvent bien moins cher qu'un plein de carburant.

### I.15 Inconvénients des véhicules électriques

Malgré leurs avantages, les véhicules électriques présentent encore certaines limites :

- Coût d'achat élevé : En raison du coût des batteries, même avec les aides.
- Autonomie limitée : Moins de kilomètres que les moteurs thermiques, surtout sur autoroute.
- Contraintes pour les longs trajets : Planification des recharges, temps d'attente plus long qu'un plein. Recharge en logement collectif : Accès limité à l'infrastructure dans les immeubles.
- Recyclage des batteries : Nécessité de structurer le traitement en fin de vie.
- Vieillesse de la batterie : Perte d'autonomie progressive au fil des années.

### I.16 La pile à combustible

La pile à combustible (PAC) est un dispositif électrochimique qui convertit directement l'énergie chimique d'un combustible (généralement l'hydrogène) en énergie électrique, en chaleur et en eau[8].

Elle fonctionne selon une réaction d'oxydo-réduction, avec transfert d'électrons. Ses avantages sont nombreux : fonctionnement propre (émission d'eau uniquement), autonomie prolongée, recharge rapide et efficacité énergétique élevée.

Les PAC sont particulièrement adaptées aux véhicules à hydrogène, mais peuvent aussi fonctionner avec d'autres combustibles, bien que l'hydrogène soit le plus utilisé [29].

**I.17 Conclusion**

Ce premier chapitre a permis de poser les bases essentielles à la compréhension des véhicules électriques et hybrides. Nous avons défini les principales sources d'énergie (batteries et PAC), examiné la classification des véhicules hybrides (par architecture et taux d'hybridation), et décrit les types de moteurs (courant continu et alternatif) ainsi que les éléments de la chaîne de traction.

Ces connaissances sont indispensables pour aborder, dans les chapitres suivants, les aspects plus techniques, les performances, et les enjeux énergétiques liés au développement des véhicules électriques. [30].

## **Chapitre : II La Pile à Combustible**

## **II.1. Introduction**

La pile à combustible (PAC) est un dispositif électrochimique qui convertit directement l'énergie chimique d'un combustible — généralement l'hydrogène — en énergie électrique, en chaleur et en eau, par le biais d'une réaction d'oxydo-réduction impliquant un transfert d'électrons. Ce système présente de nombreux avantages : un fonctionnement propre (avec pour seul rejet de l'eau), une autonomie prolongée, une recharge rapide et une efficacité énergétique élevée. Principalement utilisée dans les véhicules à hydrogène, la PAC peut également fonctionner avec d'autres combustibles, bien que l'hydrogène demeure le plus courant en raison de ses performances et de son absence d'émissions polluantes [31].

## **II.2. Définition**

Le principe de la pile à combustible est de produire de l'électricité par oxydation d'hydrogène et réduction simultanée d'oxygène avec pour seuls sous-produits de l'eau et de la chaleur. L'oxygène est généralement puisé dans l'air alors que l'hydrogène peut être fourni par plusieurs types de sources. Les deux plus fréquentes sont le gaz hydrogène ou le méthanol [32].

## **II.3. Historique**

L'effet de pile à combustible a été découvert en 1839 par le scientifique allemand Christian Schönbein. Peu après, entre 1839 et 1842, le physicien britannique William R. Grove réalise le premier modèle de laboratoire de pile à combustible, marquant ainsi le début des recherches expérimentales sur cette technologie. Ce n'est qu'en 1889 que les chimistes Ludwig Mond et Carl Langer lui donnent le nom de "pile à combustible" et contribuent à définir son principe de fonctionnement moderne [33].

Un tournant majeur se produit en 1932, lorsque l'ingénieur britannique Francis T. Bacon relance les travaux sur la pile à combustible. Il conçoit un prototype de 1 kW en 1953, suivi d'un modèle plus performant de 5 kW en 1959. Ce dernier servira de base technologique pour les piles à combustible utilisées lors des missions spatiales Apollo de la NASA, où elles fourniront à la fois de l'électricité et de l'eau potable aux astronautes [34].

La raison pour laquelle il a fallu plus d'un siècle entre les premières découvertes et les premières applications concrètes réside principalement dans le développement rapide d'autres technologies de production d'électricité, comme les générateurs électromécaniques, ainsi que dans le coût élevé des matériaux nécessaires à la fabrication des piles à combustible, un frein qui reste encore aujourd'hui un défi à surmonter .

## II.4. Généralités

Une pile à combustible est un dispositif électrochimique qui permet de produire de l'électricité de manière continue à partir de la réaction entre un carburant réducteur (le plus souvent le dihydrogène) et un comburant oxydant, généralement le dioxygène présent dans l'air. Cette production d'énergie repose sur une réaction d'oxydoréduction : le carburant s'oxyde à l'anode, tandis que l'oxydant est réduit à la cathode. La réaction d'oxydation de l'hydrogène est accélérée par un catalyseur, le plus souvent à base de platine . Parmi les différentes combinaisons possibles, la pile la plus couramment utilisée reste la pile dihydrogène-dioxygène (ou dihydrogène-air), en raison de la maîtrise de la production d'hydrogène. Celui-ci est principalement obtenu à partir d'hydrocarbures (par reformage), mais aussi par électrolyse de l'eau, ce qui en fait un vecteur énergétique d'avenir. Des recherches sont actuellement en cours pour identifier des sources naturelles d'hydrogène, ce qui pourrait ouvrir de nouvelles perspectives en matière d'approvisionnement et de durabilité. [35].

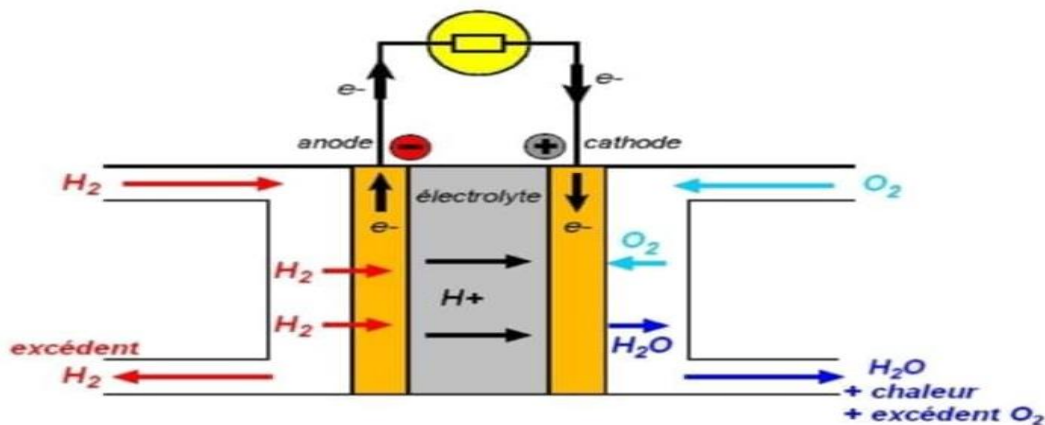
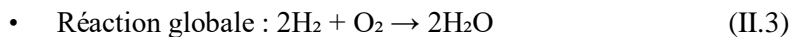
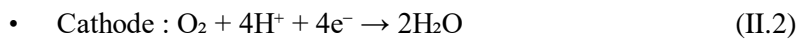


Figure II.1. la Pile à Combustible

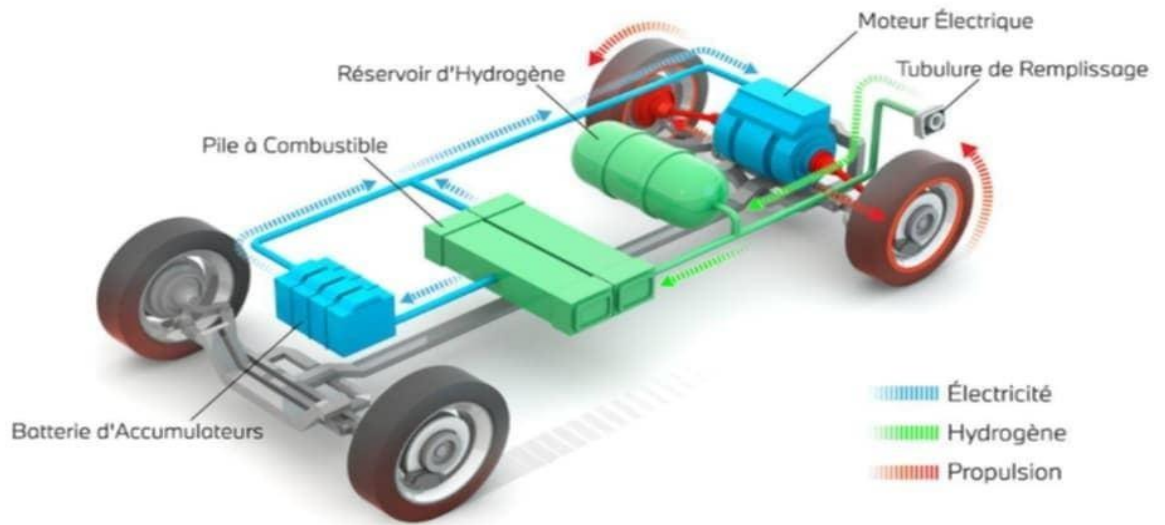
## II.5. Le principe de fonctionnement d'une pile à combustible

Le principe de fonctionnement d'une pile à combustible acide, comme la PEMFC (*Proton Exchange Membrane Fuel Cell*), repose sur une réaction électrochimique entre le dihydrogène ( $H_2$ ) et le dioxygène ( $O_2$ ). À l'anode, l'hydrogène est oxydé : chaque molécule de  $H_2$  est décomposée en protons ( $H^+$ ) et électrons ( $e^-$ ). Les protons traversent l'électrolyte jusqu'à la cathode, tandis que les électrons empruntent un circuit externe, créant un courant électrique. À la cathode, les protons, les électrons et l'oxygène réagissent pour former de l'eau, seul sous-produit de cette réaction [36].

propre. Les équations des demi-réactions sont :



Une pile à combustible génère une tension théorique de 1,23 V. Son fonctionnement repose sur une combustion électrochimique contrôlée, un principe démontré dès 1839 par William Grove. Elle est constituée de cellules élémentaires comprenant trois composants essentiels : une anode, une cathode et un électrolyte, permettant la migration des ions sous l'effet d'un champ électrique. Le combustible, tel que l'hydrogène ( $H_2$ ) ou le méthanol ( $CH_3OH$ ), est introduit à l'anode, tandis que le comburant, généralement l'oxygène ou l'air, est alimenté à la cathode. Le catalyseur — le plus souvent du platine — joue un rôle fondamental en accélérant les réactions électrochimiques aux électrodes. Grâce à l'absence de contact direct entre les réactifs, la pile à combustible permet de produire simultanément de l'électricité, de la chaleur et de l'eau, tout en offrant un rendement élevé et des émissions nulles de polluants. [37].



**Figure II.2. Fonctionnement d'une pile à combustible**

## II.6. Structure générale

Une pile à combustible est constituée d'un ensemble de cellules élémentaires connectées en série pour former un empilement, ou « stack », assurant une production électrique suffisante pour les applications visées. Chaque cellule comprend trois composants principaux : **deux plaques bipolaires**, chargées de distribuer les gaz réactifs (hydrogène et oxygène), de conduire le courant électrique et d'assurer le refroidissement ; **deux électrodes**, l'anode (où se déroule l'oxydation du combustible) et la cathode (où s'effectue la réduction du comburant), toutes deux recouvertes d'un **catalyseur**, généralement à base de platine, pour accélérer les réactions électrochimiques ; et enfin **un électrolyte**, typiquement une membrane polymère (dans les PAC de type PEMFC), qui permet le passage sélectif des ions (protons) tout en bloquant les électrons. L'ensemble permet de produire de l'électricité de manière continue, propre et silencieuse, à partir de la réaction entre l'hydrogène et l'oxygène [38].

**II.7. Les types [10-14]**

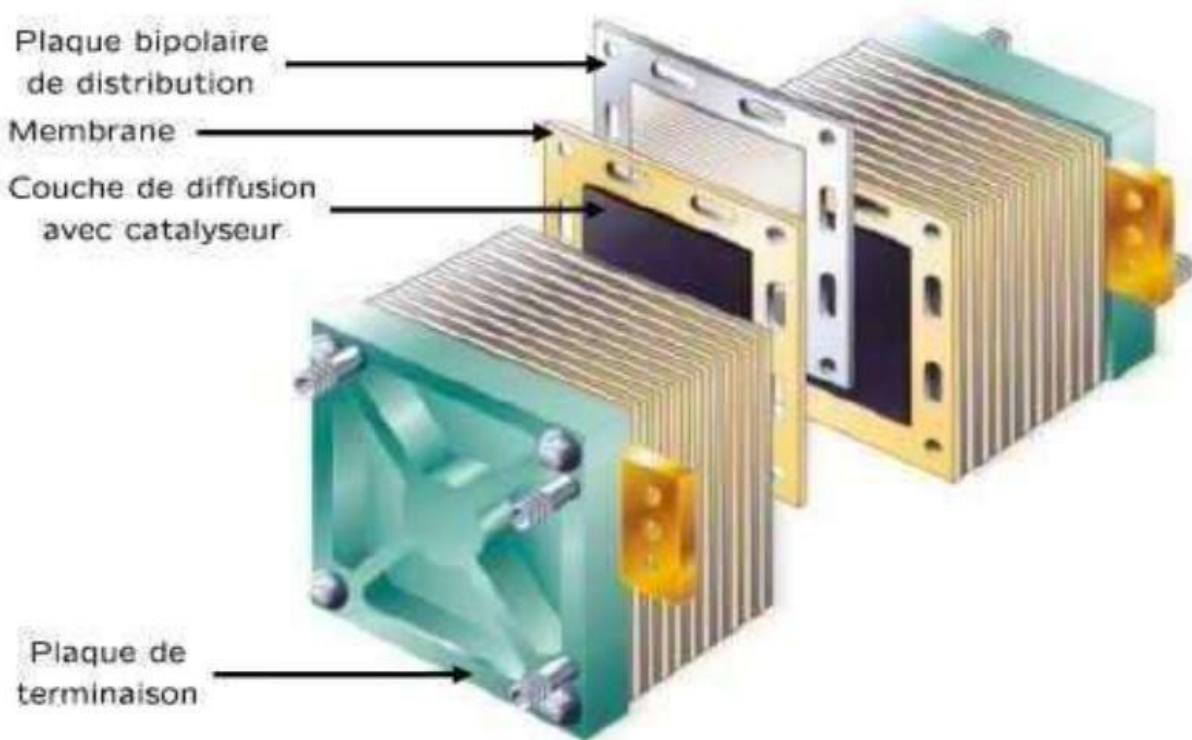
	<b>PEMFC</b>	<b>AFC</b>	<b>PAFC</b>	<b>MCFC</b>	<b>SOFC</b>
<b>Électrolyte</b>	Membranes échangeuses d'ions polymère S hydratées	Hydroxyde de potassium mobilisé ou immobilisé dans une matrice d'amiante	Acide Phosphorique Liquide Immobilisé dans SiC	Carbonate fondu liquide immobilisé dans LiAlO2	Pérovskites (céramique)
<b>Électrodes</b>	Carbone	Métaux de transition	Carbone	Nickel	Pérovskite et pérovskite/cermet métallique
<b>Catalyseur</b>	Platine	Platine	Platine	Matériau d'électrode	Matériau d'électrode
<b>Interconnexion</b>	Carbone ou métal	Métal	Graphite	Acier inoxydable ou nickel	Nickel, céramique ou acier
<b>Température de fonctionnement</b>	40-80°C	65°C-220°C	205°C	650°C	600-1000°C
<b>Porteur de charge</b>	H+	OH-	H+	CO3-	O-
<b>Reformeur externe pour carburants et hydrocarbures</b>	Oui	Oui	Oui	Non, pour certains carburants	Non, pour certains carburants et conceptions de cellules
<b>Conversion par déplacement externe du CO en hydrogène</b>	Oui, plus purification pour éliminer les traces de CO	Oui, plus purification pour éliminer le CO et le CO2	Oui	Non	Non
<b>Composants de la cellule principale</b>	A base de carbone	A base de carbone	A base de graphite	A base d'inox. Céramique	A base d'inox. Céramique
<b>Produit Gestion de l'eau</b>	Évaporatif	Évaporatif	Évaporatif	Produit gazeux	Produit gazeux

## II.7.1. Pile à combustible à électrolyte polymère (PEMFC)

### II.7.1.1. Principe de fonctionnement

L'hydrogène est dissocié en protons ( $H^+$ ) et en électrons ( $e^-$ ) sous l'effet d'un catalyseur, amorçant ainsi le processus électrochimique de la pile à combustible.

Les protons traversent l'électrolyte polymère, tandis que les électrons empruntent un circuit externe, générant ainsi un courant électrique utilisable [39].



**Figure II.3. Structure d'un empilement des cellules PEMFC (Électro Encyclo)**

À la cathode, les électrons et les protons réagissent avec l'oxygène pour produire de l'eau.

### II.7.1.2. Avantages

- Haute efficacité énergétique.
- Faibles émissions polluantes (principalement de l'eau).
- Démarrage rapide.
- Compacte et adaptée aux applications mobiles (voitures, portables).

### II.7.1.3. Défis

- Coût élevé dû à l'utilisation de platine.
- Sensibilité au CO, nécessitant une pureté de l'hydrogène élevée.
- Durabilité limitée des matériaux (membranes et électrodes).

### II.7.1.4. Applications

- Transports (voitures, bus, trains).
  - Génération d'énergie stationnaire (bâtiments, installations industrielles).
- Applications portables (batteries externes, appareils électroniques).

## II.7.2. Pile à combustible alcaline (AFC)

### II.7.2.1. Principe de fonctionnement

#### 1. Anode (côté hydrogène)

L'hydrogène (H<sub>2</sub>) est dissocié en protons (H<sup>+</sup>) et électrons (e<sup>-</sup>) à l'anode. Les électrons circulent à travers un circuit externe (créant un courant électrique).

Les ions H<sup>+</sup> (protons) migrent à travers l'électrolyte alcalin vers la cathode. [40].

#### 2. Cathode (côté oxygène)

À la cathode, l'oxygène (O<sub>2</sub>) réagit avec les électrons et les ions H<sup>+</sup> pour former de l'eau (H<sub>2</sub>O).

### Réaction globale



### II.7.2.2. Avantages

1. Haute efficacité.
2. Faibles émissions polluantes.
3. Expérience éprouvée dans l'espace.
- 4.

### II.7.2.3. Défis

1. Sensibilité au CO<sub>2</sub>.
2. Corrosion et durabilité des matériaux.
3. Problèmes de pureté du carburant.

#### II.7.2.4. Applications

- Applications spatiales (missions Apollo, SSI).
- Applications terrestres (stationnaires, systèmes de propulsion).

### II.7.3. Pile à combustible à acide phosphorique (PAFC)

#### II.7.3.1. Principe de fonctionnement

1. **Anode (côté hydrogène)**
2. L'hydrogène (H<sub>2</sub>) est introduit à l'anode.
3. Le catalyseur (platine) dissocie H<sub>2</sub> en ions H<sup>+</sup> et électrons e<sup>-</sup>.
4. Les électrons passent par un circuit externe, générant un courant électrique.
5. Les ions H<sup>+</sup> traversent l'électrolyte (acide phosphorique) en direction de la cathode.

#### Réaction globale



#### II.7.3.2. Avantages

1. Stabilité à température élevée (150–200°C).
2. Bonne durabilité.
3. Bonne efficacité énergétique.
4. Applications stationnaires.

#### II.7.3.3. Défis

1. Coût du platine.

2. Efficacité limitée par rapport à d'autres piles.
3. Gestion thermique complexe.

#### II.7.3.4. Applications

- Production d'électricité stationnaire (hôpitaux, universités, industries).
- Cogénération (électricité + chaleur).

#### II.7.4. Pile à combustible à carbonate fondu (MCFC)

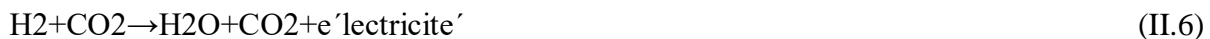
##### II.7.4.1. Principe de fonctionnement

1. Anode (côté hydrogène)
2. Le carburant ( $H_2$  ou  $CO$ ) est introduit à l'anode.
3. Le catalyseur, généralement à base de nickel, dissocie les molécules en électrons ( $e^-$ ) et en ions.
4. Les électrons circulent à travers un circuit externe, produisant de l'électricité.
5. Les ions carbonate ( $CO_3^{2-}$ ) migrent vers la cathode à travers l'électrolyte fondu.
6. Cathode (côté oxygène)
  - L'oxygène réagit avec les ions carbonate et les électrons pour former du  $CO_2$ .

Température de fonctionnement : 600 à 700°C.

#### Réaction globale

La réaction globale dans une pile à combustible à carbonate fondu est la suivante :



#### II.7.4.2 Avantages des MCFC

##### 1. Haute efficacité énergétique

En raison de leur température de fonctionnement élevée, les MCFC ont un rendement thermique élevé, souvent supérieur à 60 % pour la production d'électricité seule. En combinaison avec la cogénération (utilisation de la chaleur), leur efficacité peut atteindre jusqu'à 80–85 % [42].

##### 2. Capacité à utiliser une grande variété de carburants

Les MCFC peuvent fonctionner non seulement avec de l'hydrogène pur, mais aussi avec du monoxyde de carbone (CO), des gaz reformés (par exemple du gaz naturel) et même des hydrocarbures, ce qui les rend adaptées à des environnements industriels où ces carburants sont abondants et moins coûteux.

### 3. **Réduction des émissions**

Comme pour les autres types de piles à combustible, la réaction électrochimique produit de l'électricité avec des émissions minimales, notamment de l'eau et du dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>). Cela les rend plus écologiques que les moteurs à combustion.

### 4. **Adaptabilité aux grandes échelles**

Grâce à leur capacité à fonctionner à haute température et à leur flexibilité quant aux carburants utilisés, les MCFC sont particulièrement adaptées aux applications stationnaires à grande échelle, telles que la production d'électricité pour des complexes industriels ou des réseaux de distribution. [43].

## II.7.4.3 Défis des MCFC

### 1. **Coût des matériaux et du système**

Les MCFC utilisent des matériaux coûteux, notamment pour l'électrolyte et les électrodes. De plus, la gestion thermique (maintien des hautes températures) nécessite des systèmes complexes, ce qui peut entraîner des coûts élevés.

### 2. **Corrosion à haute température**

Les conditions de température élevées peuvent entraîner une corrosion des composants internes de la pile, ce qui affecte la durabilité des matériaux et la performance à long terme[44].

### 3. **Émissions de CO<sub>2</sub>**

Bien que les MCFC produisent de l'électricité avec des émissions faibles, la réaction chimique produit du dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) comme sous-produit, ce qui peut limiter leur impact environnemental, surtout si elles utilisent des combustibles fossiles.

### 4. **Difficulté de démarrage**

En raison de leur température de fonctionnement élevée, les MCFC peuvent avoir un démarrage plus lent par rapport à des piles à combustible à basse température comme les PEFC, qui démarrent rapidement à température ambiante. [45].

#### II.7.4.4 Applications des MCFC

##### 1. Production d'électricité stationnaire

Les MCFC sont couramment utilisées pour des applications stationnaires à grande échelle, telles que la production d'électricité pour des complexes industriels, des centrales de cogénération ou même pour des réseaux énergétiques à base de piles à combustible[46].

##### 2. Cogénération

Grâce à leur capacité à produire de la chaleur en plus de l'électricité, elles sont particulièrement adaptées aux systèmes de cogénération, où la chaleur excédentaire est utilisée pour le chauffage ou d'autres processus industriels.

##### 3. Industrie

Les MCFC sont également utilisées dans des environnements industriels où des gaz riches en CO ou en méthane sont disponibles, comme dans les raffineries de pétrole ou les usines de traitement de gaz [47].

### II.8 Système de piles à combustible

#### II.8.1 Processeur de combustible

Le processeur de combustible est un composant clé des systèmes à pile à combustible, chargé de transformer les carburants disponibles en une forme utilisable par la pile, principalement de l'hydrogène ou un gaz de synthèse. Selon le type de pile et le carburant utilisé, ce processeur peut aller d'un simple filtre à un ensemble complexe intégrant des réacteurs de reformage et des dispositifs de purification. Il permet notamment de convertir des hydrocarbures tels que le méthanol, le gaz naturel, le diesel ou même le charbon gazéifié en un mélange riche en hydrogène. Dans certains systèmes à haute température, comme les piles à carbonate fondu (MCFC) ou à oxyde solide (SOFC), ce reformage peut être réalisé directement à l'intérieur même de la pile. Toutefois, la purification du gaz reste indispensable afin d'éviter l'encrassement ou l'empoisonnement des électrodes par des impuretés telles que le soufre ou le monoxyde de carbone. En permettant l'utilisation de carburants variés tout en assurant un fonctionnement propre et efficace, le processeur de combustible joue ainsi un rôle essentiel dans le

développement de technologies énergétiques durables, notamment dans les domaines du transport, de l'industrie et de la production décentralisée d'électricité [48].

### II.8.2 Conditionneurs d'alimentation

Les conditionneurs d'alimentation sont des éléments essentiels dans les systèmes à pile à combustible, car ils assurent la conversion et la régulation du courant électrique produit afin qu'il soit compatible avec les besoins des différents composants du système. Bien que la pile à combustible génère naturellement un courant continu (DC), de nombreux dispositifs, comme les moteurs électriques ou certains équipements auxiliaires, nécessitent un courant alternatif (AC) ou un courant continu de tension différente[49].

Pour répondre à ces exigences, deux types de convertisseurs sont généralement utilisés :

- Les convertisseurs DC/DC, souvent de type boost (suralimentation), qui ajustent la tension du courant continu fourni par la pile pour répondre aux spécifications de charge ou pour permettre une gestion optimale de l'énergie.
- Les onduleurs (DC/AC), qui transforment le courant continu en courant alternatif, indispensable pour les moteurs ou autres systèmes fonctionnant en AC.

Cependant, ces étapes de conditionnement entraînent une perte d'efficacité énergétique non négligeable, généralement estimée entre 2 % et 6 %. Cette perte doit être prise en compte dans le dimensionnement global du système, car elle influence directement les performances et l'autonomie énergétique, notamment dans les applications mobiles comme les véhicules électriques à pile à combustible.

En résumé, les conditionneurs d'alimentation garantissent la compatibilité électrique, tout en jouant un rôle stratégique dans l'efficacité énergétique globale du système [50]

### II.8.3 Compresseurs d'air

Les compresseurs d'air sont des composants indispensables dans les systèmes à pile à combustible, car ils assurent l'alimentation en oxygène nécessaire aux réactions électrochimiques se produisant à la cathode. Leur rôle principal est de réguler et de comprimer

l'air ambiant, afin de fournir une quantité et une pression d'oxygène optimales, améliorant ainsi l'efficacité et la réactivité du système.

Une gestion précise du débit et de la pression de l'air est essentielle pour garantir des conditions de fonctionnement stables et adaptées à chaque application. Cela est particulièrement critique dans les applications mobiles, telles que les véhicules à hydrogène, où la performance du compresseur influence directement la puissance de propulsion, la réactivité du système et la consommation d'énergie.

En ajustant la pression de l'air fourni, les compresseurs permettent également de contrôler la température et l'humidité dans la pile, deux facteurs déterminants pour la durabilité des matériaux et la stabilité des performances. Toutefois, l'utilisation de compresseurs entraîne une consommation énergétique supplémentaire, qui doit être équilibrée par l'amélioration du rendement global du système [51].

En résumé, les compresseurs d'air jouent un rôle clé dans le bon fonctionnement des piles à combustible, en assurant un approvisionnement optimal en oxygène, en soutenant les performances électrochimiques et en contribuant à l'efficacité globale du système énergétique.

#### **II.8.4 Humidificateurs**

Les humidificateurs jouent un rôle essentiel dans le fonctionnement des piles à combustible à membrane électrolytique polymère (comme les PEFC), qui nécessitent un taux d'humidité précis pour assurer une conductivité ionique optimale de la membrane. En effet, une membrane trop sèche perd en efficacité, tandis qu'une humidité excessive peut provoquer une saturation et des pertes de performance. Pour garantir des conditions d'humidité stables, les systèmes à pile à combustible intègrent des humidificateurs chargés d'humidifier l'air d'entrée, généralement l'oxygène ou l'air ambiant destiné à la cathode. Ces dispositifs permettent ainsi de maintenir le taux d'humidité nécessaire au bon fonctionnement de la membrane. Souvent, l'humidificateur est fabriqué à partir du même matériau que la membrane électrolytique (comme le Nafion), ce qui facilite les échanges d'humidité entre les gaz entrants et la vapeur d'eau générée à l'intérieur de la pile. Ce processus de récupération d'humidité permet de réduire la consommation d'eau extérieure et d'optimiser la gestion thermique du système [52].

#### **II.9. La production d'hydrogène**

L'hydrogène, premier élément du tableau périodique et le plus léger de l'univers, est également le plus abondant. Il constitue une part essentielle des étoiles et des nuages moléculaires, et entre dans la composition de molécules vitales comme l'eau. Dès 1671, Robert Boyle décrit une réaction chimique entre le fer et des acides dilués qui libère du dihydrogène. En 1766, Henry Cavendish isole ce gaz et le nomme « air inflammable ». On lui attribue la découverte de l'hydrogène en tant qu'élément chimique. En 1783, Antoine Lavoisier lui donne le nom d'hydrogène, dérivé du grec *hydro* (« eau ») et *gène* (« engendrer »). À température et pression normales, le dihydrogène ( $H_2$ ) se présente comme un gaz transparent. Il est aujourd'hui considéré comme un vecteur énergétique prometteur, notamment dans les scénarios de transition énergétique vers des sources plus propres. Cependant, l'hydrogène n'existe pas à l'état libre dans la nature. Il doit être produit en le séparant des éléments avec lesquels il est lié, comme l'oxygène dans la molécule d'eau ou le carbone dans les combustibles fossiles. Ces dissociations sont réalisées par différents procédés tels que le reformage ou l'oxydation, souvent en présence d'eau [53].

### II.9.1. Production d'hydrogène à partir des combustibles fossiles

Actuellement, environ 96 % de l'hydrogène produit dans le monde provient de matières premières fossiles. Cette production se répartit comme suit :

- 49 % à partir de gaz naturel,
- 29 % à partir d'hydrocarbures liquides,
- 18 % à partir de charbon.

Chaque année, environ 60 millions de tonnes d'hydrogène sont ainsi générées à l'échelle mondiale.

Bien que cette méthode soit aujourd'hui largement utilisée, elle ne représente pas une solution durable à long terme. En effet, les ressources fossiles sont limitées dans le temps, et leur utilisation pour produire de l'hydrogène s'accompagne d'un fort impact environnemental, notamment à travers l'émission de dioxyde de carbone ( $CO_2$ ). Cette production contribue donc au réchauffement climatique, ce qui constitue son principal inconvénient [54].

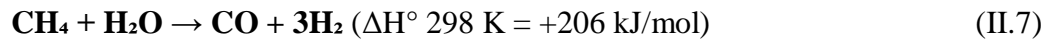
### II.9.2. Vaporeformage du gaz naturel

Le vaporeformage (ou reformage à la vapeur d'eau) est le procédé le plus couramment utilisé pour produire de l'hydrogène à partir d'hydrocarbures légers, en particulier le méthane (CH<sub>4</sub>), principal composant du gaz naturel.

Ce procédé repose sur une réaction chimique endothermique entre le méthane et la vapeur d'eau, qui nécessite :

- des températures élevées (entre 800 et 1000 °C),
- des pressions allant de 14 à 20 bar,
- et l'utilisation de catalyseurs à base de métaux de transition (comme le nickel).

La réaction principale est la suivante :



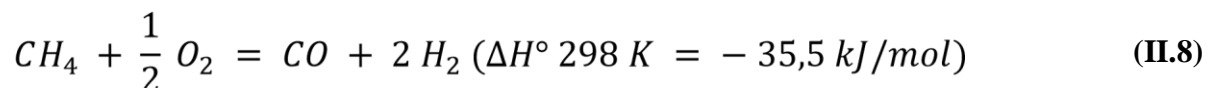
Cette équation montre que la réaction produit un mélange de monoxyde de carbone (CO) et de dihydrogène (H<sub>2</sub>), formant ce qu'on appelle un gaz de synthèse (*syngas*).

Le caractère endothermique de la réaction ( $\Delta H > 0$ ) signifie qu'elle absorbe de l'énergie, d'où la nécessité d'apporter une grande quantité de chaleur pour maintenir le processus[55].

### II.9.3. Oxydation partielle du méthane

L'oxydation partielle (POx : *Partial Oxidation*) est un autre procédé à haute température (1300 °C à 1500 °C) utilisé pour la production d'hydrogène. Cette réaction exothermique ne nécessite pas l'emploi d'un catalyseur. Le principal inconvénient de cette méthode est que son rendement est aléatoire. Selon la quantité d'oxygène et les conditions du milieu réactionnel,

l'oxydation du méthane peut engendrer réactions :



Plusieurs études ont démontré que les systèmes catalytiques contenant des métaux de transition tels que le fer (Fe), le cobalt (Co) et le nickel (Ni) [209], ainsi que des métaux nobles comme le platine (Pt), l'iridium (Ir), le palladium (Pd) et le rhodium (Rh), permettent de catalyser

efficacement les réactions de reformage, bien que leur résistance aux dépôts carbonés demeure faible. Ces réactions génèrent un gaz de synthèse présentant un rapport molaire  $H_2/CO$  compris entre 1,5 et 2.

La combinaison des procédés de vaporeformage et d'oxydation partielle donne lieu au reformage autotherme, un procédé particulièrement avantageux. En effet, il ne nécessite qu'un chauffage initial : l'exothermicité de l'oxydation partielle (équation I.3) compense ensuite l'endothermicité du vaporeformage (équation I.2), permettant ainsi un équilibre énergétique global favorable[56].

#### **II.9.4. Production d'hydrogène à partir des énergies renouvelables**

Au cours des dernières années, diverses sources d'énergie renouvelables ont été explorées pour produire de l'hydrogène, dans un souci de durabilité environnementale. Les principales méthodes sont détaillées ci-dessous :

##### **a) La biomasse**

Des matières organiques telles que les forêts, les algues et les déchets biodégradables peuvent être valorisées pour produire de l'hydrogène. Le procédé de gazéification, en particulier, constitue une méthode prometteuse en termes d'efficacité énergétique et de rentabilité économique. Ce procédé repose sur l'oxydation partielle de la biomasse, produisant un gaz contenant de l'hydrogène, du méthane ( $CH_4$ ), du monoxyde de carbone ( $CO$ ), du dioxyde de carbone ( $CO_2$ ), de l'azote ( $N_2$ ), etc.

Cependant, l'efficacité globale de cette technique reste inférieure à celle des procédés basés sur les combustibles fossiles. D'autres méthodes telles que la fermentation biologique utilisant certaines souches bactériennes permettent également de générer de l'hydrogène, bien que ces technologies soient encore en développement.

##### **b) L'énergie solaire**

L'énergie solaire peut être exploitée sous deux formes principales : thermique et photovoltaïque. La conversion photovoltaïque permet la production d'électricité, qui peut ensuite être utilisée pour l'électrolyse de l'eau. Une autre méthode en pleine expansion est la

photoélectrolyse de l'eau, aussi appelée water splitting, qui permet de dissocier directement les molécules d'eau en hydrogène et en oxygène à l'aide de l'énergie solaire.

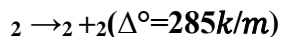
Cette technique repose sur l'utilisation de matériaux semi-conducteurs capables d'absorber une radiation lumineuse dont l'énergie est supérieure à la bande interdite (*band gap*,  $E_g$ ) du matériau. Elle présente un intérêt économique notable du fait de la faible valeur du réactif (l'eau) et de son impact environnemental réduit.

### c) L'eau comme vecteur énergétique

Grâce à son abondance et à sa disponibilité mondiale, l'eau constitue un excellent vecteur d'énergie, notamment à travers l'énergie hydraulique et ses applications dans la production d'électricité et l'électrolyse.

### d) L'électrolyse de l'eau

L'électrolyse est un procédé électrochimique qui permet la décomposition de l'eau en dihydrogène ( $H_2$ ) et dioxygène ( $O_2$ ) sous l'effet d'un courant électrique. Cette réaction nécessite un apport énergétique lié à l'enthalpie et à l'entropie du système :



Une cellule d'électrolyse est composée de deux électrodes (anode et cathode), d'un générateur de courant continu, et d'un électrolyte ioniquement conducteur. Ce dernier peut être :

- une solution aqueuse acide ou basique,
- une membrane polymère échangeuse de protons (PEM),
- ou une membrane céramique conductrice d'ions  $O^{2-}$  (dans les électrolyseurs à haute température).

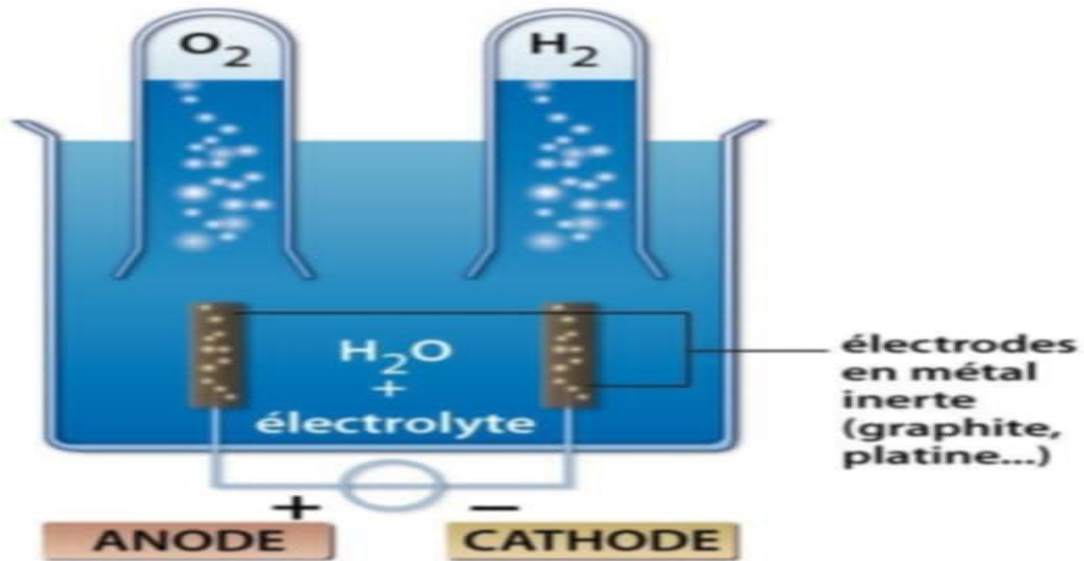


Figure II .4. l'ectrolyse de l'eau

#### e) La photo-électrolyse

La photoélectrolyse est une approche photoélectrochimique prometteuse pour la conversion de l'énergie solaire en hydrogène. Elle repose sur l'interaction entre un semi-conducteur et un électrolyte. Lorsqu'un photon d'énergie suffisante frappe le semi-conducteur, il génère des paires électron-trou capables de participer à des réactions d'oxydo-réduction à l'interface. Ce procédé permet une conversion directe de l'énergie solaire en énergie chimique stockée sous forme d'hydrogène, sans passer par l'étape intermédiaire de production d'électricité. Il suscite un fort intérêt en raison de son potentiel en matière d'énergie propre et renouvelable.

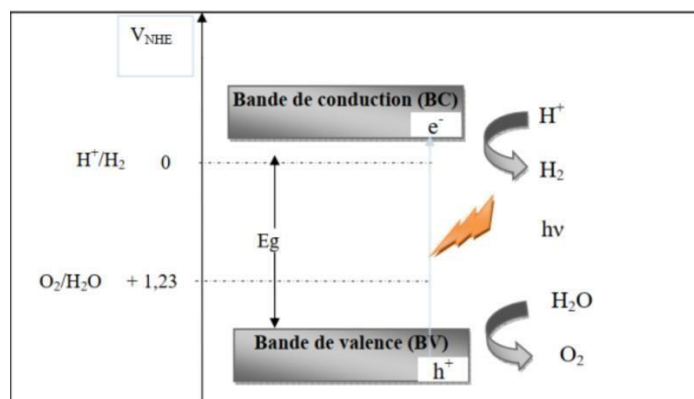


Figure II .5. Principe de la réaction de photo-décomposition de l'eau en photocatalyse.

### II.9.5. Domaines d'application de l'hydrogène

L'hydrogène possède un large éventail d'applications industrielles, énergétiques et technologiques. En tant que vecteur énergétique propre et polyvalent, il est appelé à jouer un rôle majeur dans la transition vers une économie bas carbone.

#### 1. Utilisation industrielle

L'hydrogène est déjà largement utilisé comme gaz industriel et comme matière première dans de nombreuses industries, notamment :

- La chimie : pour la synthèse de l'ammoniac ( $\text{NH}_3$ ) utilisé dans la fabrication des engrais (procédé Haber-Bosch), la production de méthanol, l'hydrogénation des huiles, etc.
- La métallurgie : comme agent réducteur pour l'extraction de certains métaux et dans les traitements thermiques.
- L'industrie pharmaceutique : pour certaines réactions de synthèse. L'industrie alimentaire : notamment pour l'hydrogénation des graisses.
- La microélectronique et l'informatique : dans des procédés spécifiques de fabrication de composants électroniques.

#### 2. Source d'énergie polyvalente

L'hydrogène peut remplacer les combustibles fossiles dans la plupart des usages énergétiques, à l'exception des cas où la présence de carbone est indispensable. Ses principales applications énergétiques sont :

- La combustion dans les fours industriels, les moteurs à combustion interne, les turbines à gaz et les moteurs à réaction, où il peut offrir un rendement supérieur à celui des combustibles fossiles traditionnels (charbon, pétrole, gaz naturel).
- Les transports : les automobiles, bus, trains, navires, sous-marins, avions et même les fusées peuvent être propulsés par de l'hydrogène, sous forme gazeuse, liquide ou via des piles à combustible.
- Les piles à combustible : elles permettent de convertir directement l'hydrogène en électricité, offrant ainsi une solution propre et silencieuse pour la mobilité (voitures à

hydrogène), les applications portables, le stockage d'énergie et les systèmes stationnaires de production d'électricité[57].

### 3. Réfrigération, stockage et purification

Les hydrures métalliques constituent une autre technologie prometteuse dans le domaine de l'hydrogène, avec des applications dans :

- La réfrigération et la climatisation (systèmes thermochimiques basés sur les cycles à hydrures),
- Le stockage solide de l'hydrogène, offrant une alternative plus sûre aux réservoirs à haute pression,
- La purification de l'hydrogène grâce à la capacité sélective de certains hydrures à absorber et libérer le gaz.

### 4. Applications thermiques et environnementales

La combustion de l'hydrogène avec l'oxygène produit uniquement de la vapeur d'eau, sans émissions de CO<sub>2</sub>, ce qui en fait une solution idéale pour :

- Le chauffage des locaux (résidentiels, tertiaires ou industriels),
- Les procédés thermiques industriels nécessitant une source de chaleur propre,
- Les systèmes de production combinée de chaleur et d'électricité (cogénération) à haute efficacité.

## II.10. Conclusion

La pile à combustible représente une solution énergétique prometteuse, alliant haut rendement, faible impact environnemental et diversité d'applications. Malgré certains défis techniques et économiques, son développement ouvre la voie à une transition vers une mobilité propre et une production d'énergie durable. Elle s'impose ainsi comme un pilier essentiel dans le paysage énergétique de demain

## **Chapitre III :**

# **Modélisation de la chaîne à véhicule électrique**

### III .1.Introduction

Dans ce chapitre, nous abordons la modélisation de la chaîne de traction d'un véhicule, étape essentielle pour l'analyse, l'optimisation et le dimensionnement des différentes composantes du système de propulsion. La chaîne véhicule, constituée principalement du moteur, du système de transmission, du dispositif de stockage d'énergie et des éléments de commande représente l'ensemble des sous-systèmes qui assurent la conversion de l'énergie en mouvement.

L'objectif principal de ce chapitre est de développer un modèle représentatif du comportement dynamique de la chaîne véhicule, en tenant compte des interactions entre ses différents éléments. Ce modèle permet de simuler les performances du véhicule, d'analyser les flux d'énergie, et d'évaluer les choix technologiques en fonction des contraintes d'usage (vitesse, autonomie, rendement, etc.). Nous présenterons d'abord l'architecture générale de la chaîne véhicule, avant de détailler les modèles mathématiques associés à chaque sous-système. Enfin, nous montrerons comment ces modèles peuvent être intégrés dans un environnement de simulation pour valider les performances globales du véhicule [58].

### III .2.Convertisseurs DC/DC

Le secteur des transports connaît ces dernières années une évolution remarquable, marquée par un intérêt croissant pour les énergies renouvelables et la réduction des émissions polluantes générées par les véhicules à moteur thermique. Dans ce contexte, les voitures électriques s'imposent comme une alternative prometteuse et respectueuse de l'environnement, reposant sur des systèmes électriques sophistiqués intégrant plusieurs sources d'énergie et des modules électroniques de gestion de puissance. Parmi les composants essentiels de ces véhicules figure le système de conversion d'énergie DC/DC, qui joue un rôle clé dans la distribution optimale de l'énergie entre les différents sous-systèmes du véhicule. Ce système ne se limite pas à alimenter le moteur électrique, mais assure également le fonctionnement des équipements auxiliaires et la recharge des batteries secondaires. Dans une voiture électrique typique, on trouve généralement deux convertisseurs DC/DC (appelés aussi hacheurs). Le premier convertit la tension continue élevée provenant de la batterie principale (au lithium-ion), comprise entre 200 V et 330 V, en une tension très basse de 14 V, destinée à recharger la batterie de servitude (au plomb), qui alimente les équipements auxiliaires du véhicule (éclairage, système de contrôle, etc.). Le second hacheur permet de convertir l'énergie produite par le panneau solaire situé sur le toit du véhicule en une tension identique (14 V), assurant ainsi une recharge écologique et

complémentaire de la batterie de servitude. Ce système permet ainsi une gestion intelligente et stable de l'énergie, en tirant parti de deux sources complémentaires : la batterie principale et l'énergie solaire, contribuant à améliorer l'autonomie et l'efficacité énergétique globale du véhicule électrique [59].

### III.3. Les types d'un hacheur

#### III.3.1. Hacheur « BUCK »

##### 1- Description

Le hacheur Buck, également appelé hacheur série ou dévolteur, est un convertisseur statique de type continu–continu (DC/DC) dont la fonction principale est de réduire la tension d'entrée afin de fournir une tension de sortie inférieure. Ce type de convertisseur est couramment utilisé pour alimenter un circuit ou une charge nécessitant une tension plus faible que celle fournie par la source. Il trouve de nombreuses applications dans les systèmes embarqués, les alimentations de puissance, ainsi que dans le domaine automobile, notamment pour l'alimentation des équipements à basse tension à partir d'une source haute tension. Son principe de fonctionnement repose sur le hachage de la tension d'entrée à l'aide d'un interrupteur électronique (généralement un transistor), suivi d'un filtre LC — composé d'une inductance et d'un condensateur — permettant d'obtenir une tension de sortie continue, stable et régulée [60].

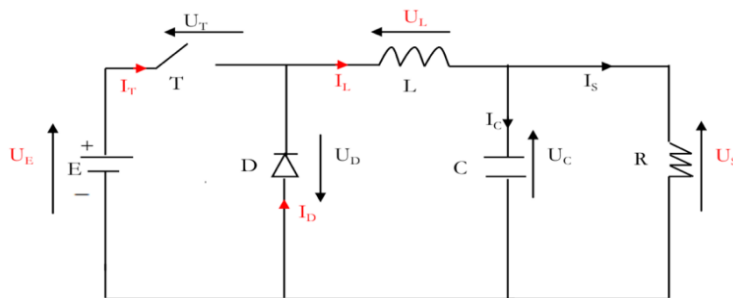


Figure III.1. Schéma de principe d'un « Buck »

##### 2. Principe de fonctionnement du hacheur Buck

Dans un hacheur Buck, le transistor est utilisé comme interrupteur commandé, car le courant dans le circuit est unidirectionnel (toujours positif) et nécessite une commande aussi bien pour l'amorçage que pour le blocage. La charge est généralement représentée par une résistance

R, tandis que la bobine L et le condensateur C forment un filtre LC chargé de réduire les ondulations du courant et de la tension en sortie, dues au découpage. Le fonctionnement repose sur la commande du transistor T par un signal d'horloge créant deux phases distinctes durant une période T [61].

**Phase:[0,αT]**

Pendant l'état haut de l'horloge, le transistor T est passant. Le courant circule alors de la source vers la charge à travers la bobine, qui emmagasine de l'énergie sous forme magnétique. Durant cette phase, la diode D est bloquée.

La tension aux bornes de la bobine est donnée par :

$$V_L = V_e - V_s$$

- **Phas2:[αT,T]**

Pendant l'état bas de l'horloge, le transistor est bloqué. La bobine L, qui tend à maintenir le courant constant, restitue l'énergie stockée en alimentant la charge via la diode D qui devient conductrice. Ainsi, le courant continue de circuler même lorsque l'interrupteur est ouvert.

La tension aux bornes de la bobine pendant cette phase est :

$$V_L = -V_s$$

En régime permanent, la valeur moyenne de la tension aux bornes de la bobine est toujours nulle :

$$\langle V_L \rangle = 0$$

$$\langle U_L \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T U_L(t) dt = \frac{1}{T} [A1 + A2] = 0 \tag{III.1.}$$

$$\frac{1}{T} [(U_e - U_s)\alpha T \pm U_s(T - \alpha T)] = 0 \quad (\text{III.2.})$$

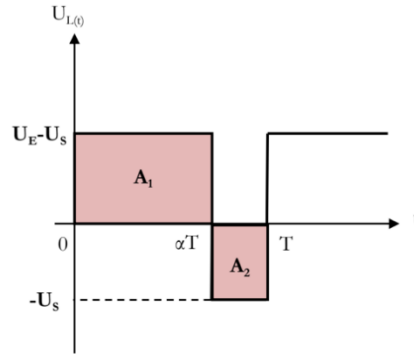


Figure III.2. forme de tension dans la bobine « buck ».

Suite du principe de fonctionnement – Analyse des courants

Phase 1 : [0,  $\alpha T$ ]

a) Le courant dans la bobine augmente :

$$\begin{cases} L \frac{di_L}{dt} = U_e - U_s \\ i_L(t) = \frac{U_e - U_s}{L} t + I_{min} \end{cases} \quad (\text{III.3})$$

b) Le courant dans la diode : (diode est bloquée).

c) Le courant dans le transistor : (transistor est passant).

Phase 2 : [ $\alpha T$ , T]

a) Le courant dans la bobine diminue :

$$\begin{cases} L \frac{di_L}{dt} = -U_s \\ i_L(t) = \frac{-U_s}{L} t + I_{min} \end{cases} \quad (\text{III.4})$$

b) Le courant dans la diode : (diode est passante).

c) Le courant dans le transistor : (transistor est bloqué).

### III.3.2. Hacheur « BOOST »

#### 1. Description

Le hacheur Boost, également appelé hacheur parallèle ou survolteur, est un convertisseur statique continu–continu (DC/DC) qui permet de fournir une tension de sortie supérieure à la tension d'entrée appliquée. Ce type de convertisseur est utilisé lorsque l'on souhaite élever la tension d'alimentation pour répondre aux besoins d'une charge fonctionnant sous une tension plus élevée que celle fournie par la source. Le fonctionnement repose, comme pour le hacheur Buck, sur un interrupteur électronique (transistor) associé à une bobine, une diode et un condensateur, formant ensemble un système capable de stocker puis transférer l'énergie de manière contrôlée, de façon à augmenter la tension en sortie. Le hacheur Boost est couramment employé dans les applications embarquées, les systèmes photovoltaïques, ainsi que dans les véhicules électriques, notamment pour élever la tension issue de panneaux solaires ou de batteries à basse tension vers un niveau compatible avec les équipements du système [62].

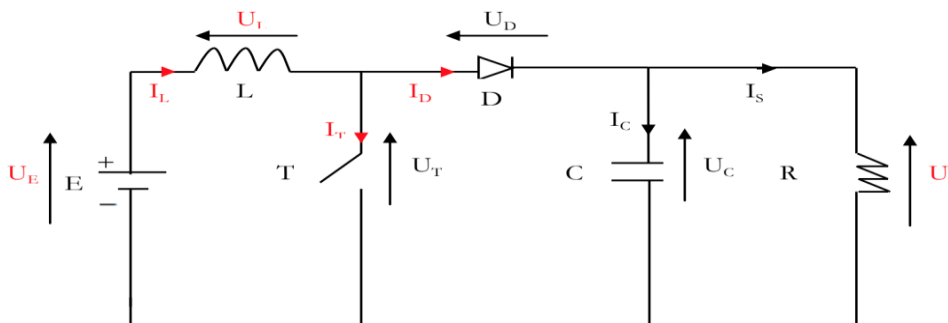


Figure III.3. Schéma de principe d'un « boost ».

## 2. Principe de fonctionnement du hacheur « BOOST »

Le hacheur Boost fonctionne en deux phases distinctes au cours d'une période d'horloge TTT, en fonction de l'état du transistor de commutation TTT.

### Phase 1 : [0, αT] — Transistor ON

- Transistor T conducteur
- Diode D bloquée (car la tension à ses bornes est négative)
- La bobine L est alimentée directement par la tension d'entrée E et emmagasine de l'énergie (courant croissant)
- Le condensateur C alimente la charge

Application de la loi des mailles

$$UL(t) = Ue$$

### Phase 2 : [αT, T] — Transistor OFF

- Transistor T bloqué
- Diode D passante
- La bobine L restitue l'énergie emmagasinée (courant décroissant)
- L'énergie va vers la charge et recharge le condensateur

Application de la loi des mailles

$$UL(t) = Ue - Us$$

puisque la bobine débite à travers la diode vers le condensateur et la charge.

$$\begin{cases} A1 = Ue \cdot \alpha T \\ A2 = (Ue - Us)(T - \alpha T) \end{cases} \quad (III.5.)$$

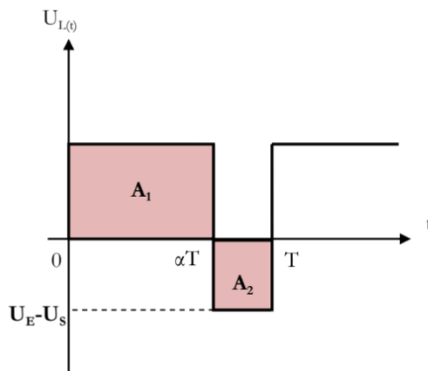


Figure III.4 . Forme de tension dans la bobine « boost ».

• **La tension de sortie**

En régime permanent la valeur moyenne de la tension aux bornes de la bobine est toujours nulle :

$$\langle UL \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T UL(t) dt = \frac{1}{T} [A1 + A2] = 0 \tag{III.6}$$

$$\frac{1}{T} [Ue \alpha T + (Ue - Us)(T - \alpha T)] = 0 \tag{III.7}$$

$$Ue \alpha + (Ue - Us)(1 - \alpha) = 0 \tag{III.8}$$

$$Us = \frac{Ue}{1-\alpha} \tag{III.9}$$

Avec  $0 < \alpha < 1$ , donc la tension de sortie est supérieure à celle d'entrée

• **Les courants IL,IT,ID**

**Phase1 [0 αT]**

a) Le courant dans la bobine augmente :

$$\begin{cases} L \frac{diL}{dt} = Ue \\ IL(t) = \frac{Ue}{L} t + Imin \end{cases} \tag{III.10}$$

b) Le courant dans la diode : (diode est bloquée).

c) Le courant dans le transistor : (transistor est passant).

**Phase2[αT T]**

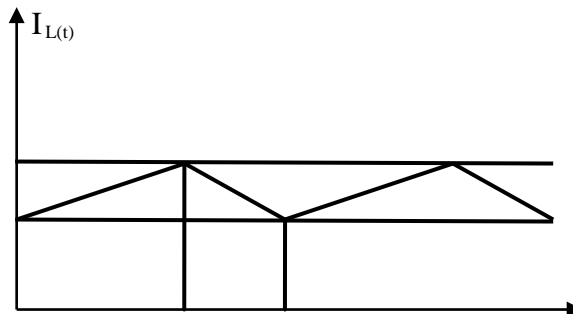
a) Le courant dans la bobine diminue :

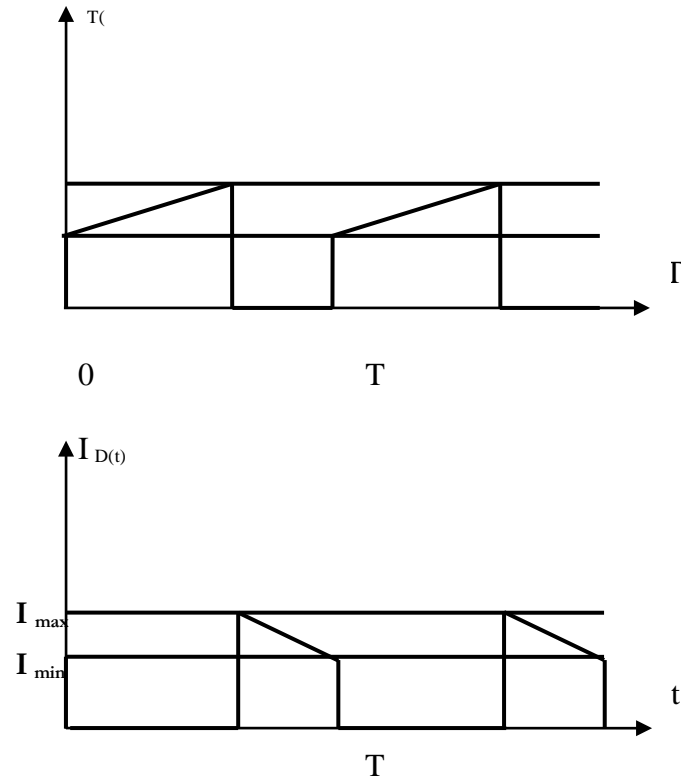
$$\begin{cases} L \frac{diL}{dt} = Ue - Us \\ IL(t) = \frac{Ue - Us}{L} (t - \alpha T) + Imax \end{cases} \tag{III.11}$$

b) Le courant dans la diode : (diode est passante).

c) Le courant dans le transistor : (transistor est bloqué).

• **Chronogrammes**





### III.3.3.Hacheur « BUCK-BOOST » Bidirectionnel

#### 1. Description

Le hacheur BUCK-BOOST bidirectionnel est un convertisseur DC-DC capable de faire circuler la puissance dans les deux sens, de l'entrée vers la sortie ou inversement. Ce type de convertisseur est particulièrement utilisé dans les systèmes de gestion d'énergie intégrant plusieurs sources comme une batterie, une pile à combustible ou un supercondensateur, où des transferts d'énergie réversibles sont nécessaires. En fonction de l'application et des contraintes de sécurité, les convertisseurs bidirectionnels peuvent être classés en deux grandes catégories : les convertisseurs isolés, qui intègrent un transformateur pour assurer une isolation galvanique entre l'entrée et la sortie, et les convertisseurs non isolés, qui sont plus compacts et plus efficaces, mais sans séparation électrique. Les versions isolées sont privilégiées pour les systèmes à haute tension ou à sécurité critique, tandis que les versions non isolées sont adaptées aux systèmes embarqués où l'isolation n'est pas requise [63].

Un convertisseur DC-DC bidirectionnel non isolé peut être dérivé d'un convertisseur unidirectionnel classique, en adaptant sa structure pour permettre le passage du courant dans les deux sens. Cette évolution est rendue possible en remplaçant les composants unidirectionnels, comme les diodes, par des interrupteurs bidirectionnels tels que des MOSFETs ou des IGBTs munis de diodes antiparallèles. Contrairement aux convertisseurs Buck ou Boost classiques, qui limitent le flux de puissance à une seule direction à cause de la présence de diodes, cette architecture permet un flux d'énergie réversible entre la source et la charge.

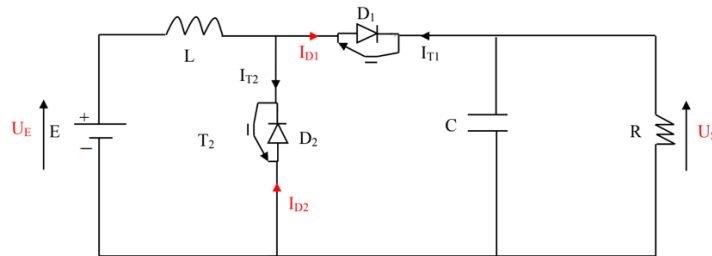
Ainsi, le convertisseur peut non seulement alimenter la charge, mais aussi permettre à la charge de restituer de l'énergie vers la source. Ce type de convertisseur est qualifié de convertisseur à deux quadrants s'il est réversible en courant uniquement, et de convertisseur à quatre quadrants s'il l'est aussi en tension. Dans le cadre de cette étude, on s'intéresse uniquement à la réversibilité en courant, ce qui suffit pour assurer le fonctionnement en mode Buck ou Boost selon les conditions d'exploitation [64].

## **2.Principe de fonctionnement**

Le fonctionnement du convertisseur BUCK-BOOST bidirectionnel repose sur la commande alternée de deux interrupteurs actifs, généralement des MOSFETs T1 et T2, associés à leurs diodes antiparallèles D1 et D2, qui jouent le rôle de diodes de roue libre. En fonction de la direction souhaitée du flux de puissance, l'un des MOSFETs est activé pendant que l'autre reste bloqué [65].

- Lorsque le MOSFET T1 est commandé, le convertisseur fonctionne en mode buck (abaisseur de tension) : la puissance circule de la source vers la charge.
- À l'inverse, lorsque le MOSFET T2 est activé, le convertisseur fonctionne en mode boost (élevateur de tension), permettant à l'énergie de revenir de la charge vers la source.

Le rôle des diodes antiparallèles est de garantir la continuité du courant à travers la bobine lors des phases de commutation, en assurant le passage du courant même lorsque les MOSFETs sont bloqués. Ainsi, cette alternance de conduction entre T1/D1 et T2/D2 permet d'ajuster dynamiquement la tension de sortie, tout en rendant possible un flux d'énergie bidirectionnel contrôlé [66].



**Figure III.5. Schéma de principe d'un « buck-boost » bidirectionnel.**

### Analyse du convertisseur Buck-Boost bidirectionnel – Mode Boost (décharge)

Dans l'analyse du convertisseur Buck-Boost bidirectionnel, plusieurs hypothèses idéales sont posées afin de simplifier l'étude du comportement dynamique du système :

- Les interrupteurs (MOSFETs) sont supposés idéaux : sans chute de tension ni pertes de commutation.
- Le condensateur de filtrage est considéré comme parfaitement capacitif, c'est-à-dire sans résistance série équivalente (ESR).
- L'inductance est supposée idéale, sans pertes résistives ou magnétiques.
- Le courant de sortie est supposé constant sur un petit intervalle de temps.
- L'ondulation du courant d'entrée est négligée par rapport à sa valeur moyenne.

Sous ces conditions idéales, le fonctionnement du convertisseur en mode Boost (décharge) peut être décrit comme suit :

- Lorsque l'on souhaite élever la tension de sortie, on commande l'interrupteur  $T_2$ .
- Pendant la conduction de  $T_2$ , l'inductance  $L$  emmagasine de l'énergie provenant de la source (telle qu'un supercondensateur ou une alimentation continue), sous forme d'énergie magnétique.
- Durant cette phase, le condensateur  $C$ , préalablement chargé, continue d'alimenter la charge.
- Lorsque  $T_2$  est bloqué, l'inductance restitue l'énergie accumulée à travers la diode  $D_2$ .

- L'énergie est alors transférée vers le condensateur et la charge, ce qui entraîne une élévation de la tension de sortie.

Ce processus de transfert d'énergie permet d'assurer un flux unidirectionnel allant de la source vers la charge, tout en augmentant la tension appliquée à cette dernière.

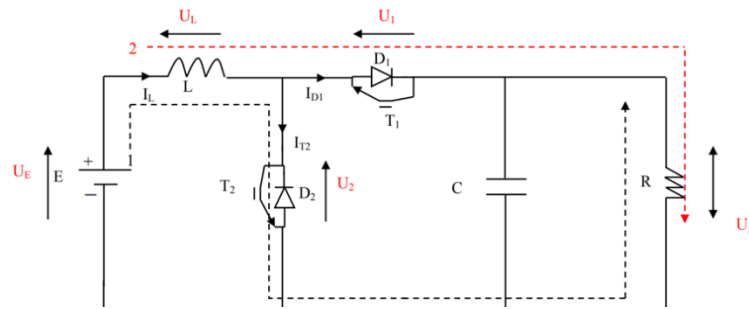


Figure III.6. Schéma de principe d'un « buck-boost » bidirectionnel en mode « boost ».

**Phase 1 [0 αT]**

Le Mosfet de puissance T2 est passant (fermé), et le Mosfet de puissance T1 est bloqué. Dans

cet état : La tension aux bornes de l'inductance L est :  $U_L = U_e$

Le courant dans l'inductance augmente :

$$i_L(t) = \frac{U_e}{L}(t) + i_L(de t = 0) \tag{III.12}$$

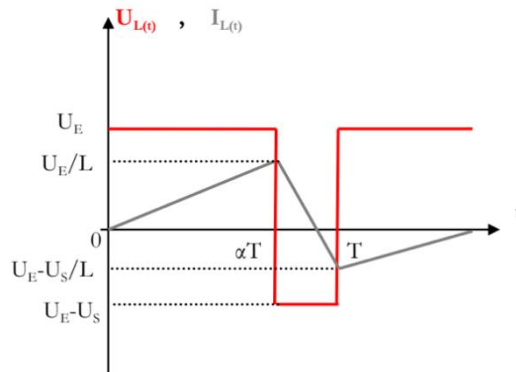
$$\Delta i_L = i_L(\alpha T) - i_L(de t = 0) = \frac{U_e}{L}(\alpha T) \tag{III.13}$$

**Phase 2 [αT T]**

Le Mosfet de puissance T2 est ouvert et la diode de corps D1 commence à conduire. l'énergie emmagasinée dans la bobine passe dans la charge et son condensateur C. Dans cet état :la tension aux bornes de l'inductance est :  $U_L = U_e - U_s$

le courant dans l'inductance diminue :

En  $t=T$  :



**Figure III.7. Forme d'onde de tension et de courant dans l'inductance en mode « boost**

».

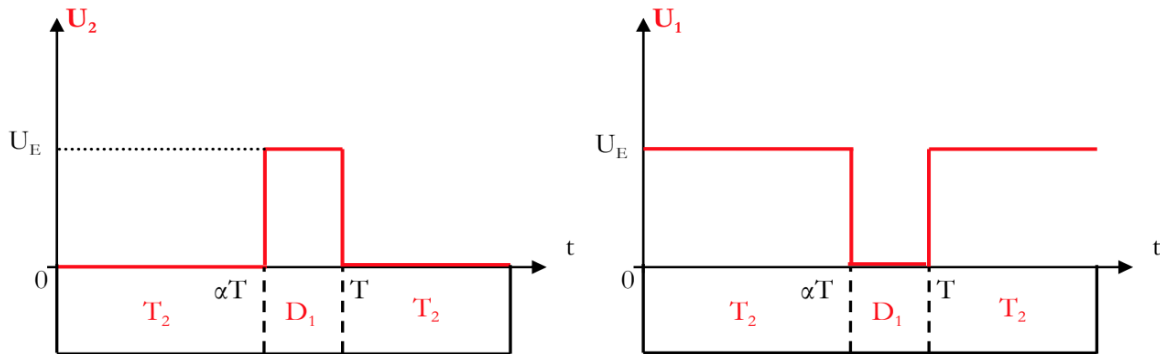
$$i_L(T) = \frac{U_e - U_s}{L} (T - \alpha T) + i_L(\alpha T) \tag{III.15}$$

$$\Delta I_L = i_L(\alpha T) - i_L(T) = -\frac{U_e - U_s}{L} (T - \alpha T) \tag{III.16}$$

En régime permanent, le courant traversant l'inductance est le même au début et à la fin de chaque cycle de commutation et de même pour la tension, pour cela on a :

$$\Delta I_{\text{ouvert}} = \Delta I_{\text{fermé}}$$

$$\frac{U_e}{L}(\alpha T) = -\frac{U_e - U_s}{L}(T - \alpha T) \quad (\text{III.17})$$



**Figure III.8. forme d'onde de tension (U1,U2) aux bornes des mosfets « mode boost ».**

Grâce à l'expression obtenue dans le mode Boost, on constate que la tension de sortie  $U_s$  est toujours supérieure à la tension d'entrée, tant que le rapport cyclique  $\alpha$  reste compris entre 0 et 1. En effet, plus le rapport cyclique augmente, plus la durée pendant laquelle l'interrupteur **T2** est conducteur est grande, ce qui permet à la bobine d'emmagasiner davantage d'énergie. Lors du blocage de **T2**, cette énergie est restituée vers la sortie, entraînant une élévation de la tension. La relation entre la tension de sortie et le rapport cyclique montre ainsi un comportement croissant, ce qui confirme que la sortie est d'autant plus élevée que  $\alpha$  se rapproche de 1. Ce principe permet un contrôle précis de la tension de sortie simplement par modulation de la commande en largeur d'impulsion (PWM).

#### III.4. Modélisation d'une batterie lithium ion

Il existe plusieurs modèles de batteries lithium-ion. Cependant, leur situation. Le travail n'est pas facile du fait du respect de plusieurs paramètres (température, résistance interne ... etc.). En fonction des applications et de leurs limites. Ces batteries interagissent différemment. Donc on ne trouve pas un seul modèle cela est vrai en toutes circonstances. Dans ce travail, nous avons sélectionné un circuit RC séquentiel [67]

Similaire à une batterie lithium-ion . En mode décharge, la tension est aux bornes de la cellule de batterie sont données par l'expression :

$$v_b = E_0 - R_b i_b - \frac{1}{C_b} \int_c b i_b dt \quad (III.17)$$

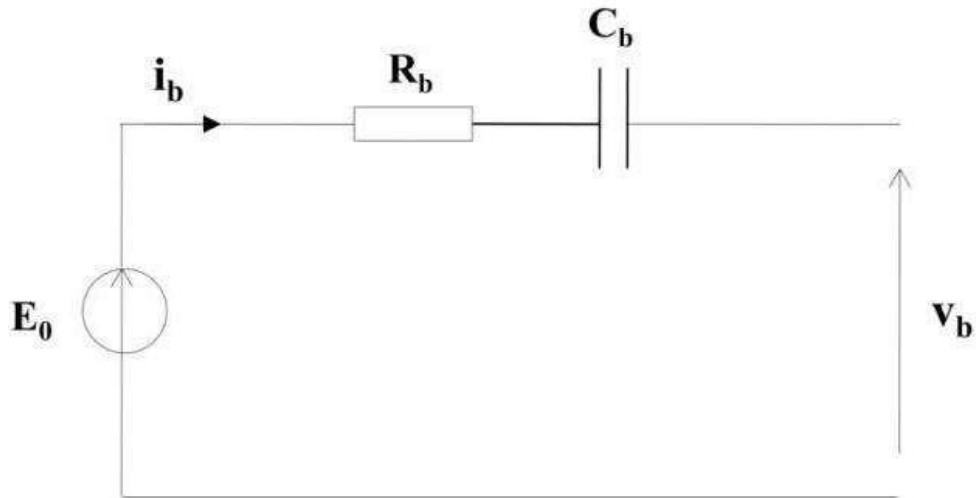


Figure III.9. Modèle d'une batterie lithium ion

$v_b$  : tension de la batterie lithium ion [V]

$E_b$  : sa tension à vide [V]

$I_b$  : son courant [A]

$R_b$  : sa résistance [ $\Omega$ ]

Pour un stack composé de  $N_{bs}$  batteries en série, et  $N_{bp}$  en parallèle, on peut écrire :

$$E_{ba0} = N_{bs} \times E_0 \quad (III.18)$$

$$R_{ba} = N_{bp} \times R_b \quad (III.19)$$

$$N^{bp}$$

$$C_{ba} = \frac{1}{N_{bs}} \times C_b \quad (III.20)$$

$$v_{ba} = E_{ba0} - R_{ba} i_b - \frac{1}{C_{ba}} \int_c b a i_b dt \quad (III.21)$$

Nous définissons l'état de charge,  $EDC_{ba}$ , du stack comme étant le rapport entre sa capacité nominale  $C_{ban}$  et la quantité de charge  $Q_{bam}$  manquante par rapport à  $C_{ban}$ .

$$EDC_{ba} = (1 - cbam) \times 100\% \quad (II.22)$$

Avec :

**EDC<sub>ba</sub>** : Etat de charge stack des batteries

**C<sub>ban</sub>** : Capacité nominale

**Q<sub>m<sub>ba</sub></sub>** : Quantité de charge

### III.5 Modélisation de l'onduleur à deux niveaux de tension

Le schéma de principe de l'onduleur triphasé à deux niveaux de tension monté en pont alimentant une charge triphasée, est donné par la figure (III.10). Il s'agit d'un onduleur de tension à deux niveaux de tensions, possédant six cellules de commutation et six diodes de roue libre. Chaque bras de l'onduleur comporte deux cellules de commutations constituées chacune, de l'interrupteur avec sa diode, la sortie correspond au point milieu du bras. Les signaux de commande des interrupteurs de chaque bras doivent être complémentaires afin de ne pas court-circuiter l'alimentation continue de l'onduleur. Pour se prémunir d'un court-circuit intempestif, il est nécessaire d'introduire un temps d'attente à la fermeture de l'interrupteur, usuellement appelé *temps mort*. Les semi-conducteurs les plus couramment utilisés pour réaliser les interrupteurs sont les transistors de puissance (MOSFET, IGBT, Bipolaires) et les thyristors rapides (principalement les GTO).

L'entrée est une source de tension continue. Le récepteur est une charge triphasée équilibrée qui peut être une machine asynchrone connectée en triangle ou en étoile sans neutre. Les deux interrupteurs  $K_j$   $K'_j$ , ( $j = 1, 2, 3$ ), sont unidirectionnel en tension et bidirectionnel en courant. Ce sont des éléments commandables à l'ouverture et à la fermeture. Ils sont commandés par la technique de modulation de largeur d'impulsion, qui consiste à moduler la tension de sortie. Nous supposons que la commutation des éléments semi-conducteurs est instantanée (composants parfaits). Ainsi, à chaque bras d'onduleur est associé une fonction logique de commutation  $S_j$ , ( $j = 1, 2, 3$ ) définie comme suit [68] :

$$S_j = \begin{cases} 1 & \text{si } K_j \text{ fermé et } K'_j \text{ ouvert} \\ 0 & \text{si } K_j \text{ ouvert et } K'_j \text{ fermé} \end{cases} \quad \text{(III.23)}$$

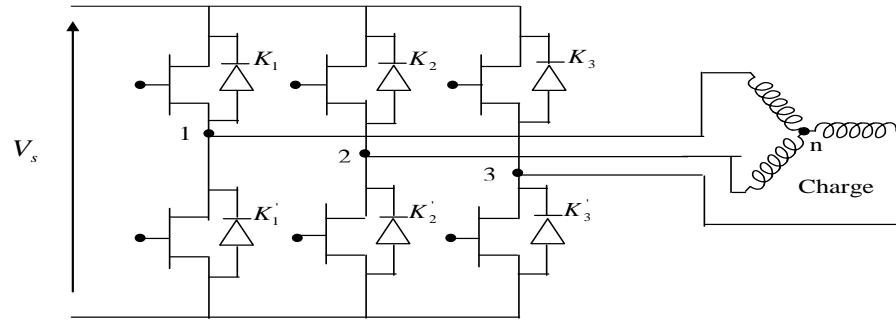
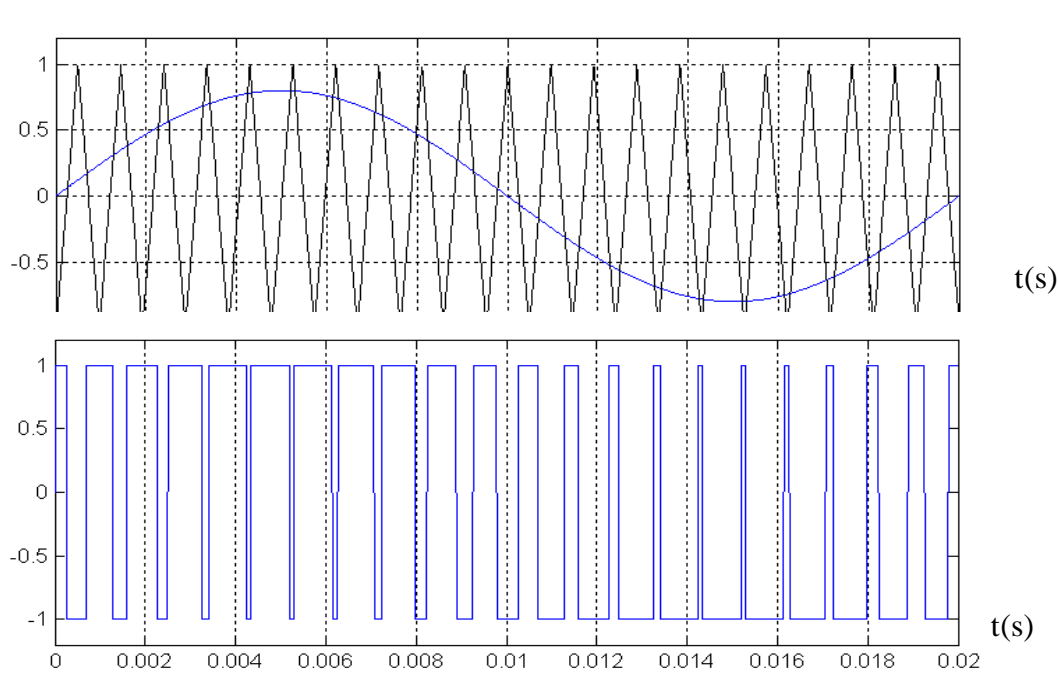


Figure.III.10. Schéma de l'onduleur associé à une charge triphasée.

### III.5.1. Commande par MLI (Stratégie triangulo – sinusoïdale)

La stratégie triangulo- sinusoïdale est obtenue par la comparaison, du signal de porteuse ( $V_p$ ) et le signal de référence ( $V_{ref}$ ), définissant la fonction logique  $S_x$  comme le montre la figure (Figure.III.11)



(b)

Figure.III.11. Principe de la commande à MLI (stratégie triangulo -sinusoïdale)

La fonction logique  $S_x$ , associée au signal de commande est définie par :

$$S_x = \begin{cases} 1 & \text{si } V_{ref} \geq V_p \\ -1 & \text{si } V_{ref} \leq -V_p \end{cases} \quad (III.24)$$

### 1)\_ Equation de la porteuse

La porteuse est un signal triangulaire caractérisé par une fréquence  $f_p$  ( $T_p = \frac{1}{f_p}$ )

Elle est donnée par les équations suivantes : [

$$\begin{cases} x_1(t) = V_p \left(-1 + 4 \frac{t}{T_p}\right) & t \in \left[0, \frac{T_p}{2}\right] \\ x_2(t) = V_p \left(3 - 4 \frac{t}{T_p}\right) & t \in \left[\frac{T_p}{2}, T_p\right] \end{cases} \quad (III.25)$$

### 2)\_ Equation de la référence

La référence est un système triphasé de signaux tel que :

$$\begin{cases} v_{ra} = V_{ref} \sin \omega_{ref} t \\ v_{rb} = V_{ref} \sin(\omega_{ref} t - 2\pi / 3) \\ v_{rc} = V_{ref} \sin(\omega_{ref} t + 2\pi / 3) \end{cases} \quad (III.26)$$

## III.5.2.Caractéristiques de la MLI

### 1)\_ Indice de modulation $I_M$

Egale au rapport de la fréquence de la modulation (porteuse) sur la fréquence de référence :

$$I_M = \frac{f_p}{f_{ref}} \quad (III.27)$$

L'augmentation de la valeur de  $I_M$  conduit au déplacement des harmoniques vers les fréquences élevées. Ce qui est un avantage, mais on constate une augmentation du déchet de tension, donc nous devons optimiser la valeur de  $I_M$ .

### 2)\_ Taux de modulation $T_M$

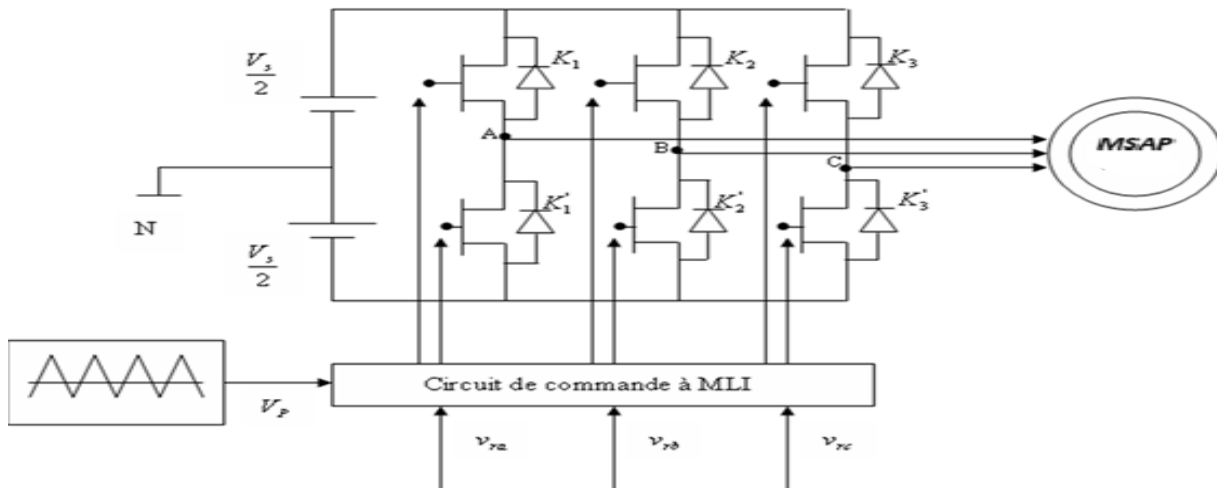
C'est un coefficient de réglage de la tension, qui est égal au rapport de l'amplitude de la tension de référence à l'amplitude de la porteuse

$$T_M = \frac{V_{ref}}{V_p} \tag{III.28}$$

Quand  $T_M$  set nul, la tension de sortie est formée d'ondes rectangulaire de même largeur avec une fréquence  $M_{fr}$  et quand  $T$  s'accroît, la fréquence  $f_r$  croit, les termes  $M_{fr}, 3M_{fr}, 5M_{fr}$  diminuent.

**3)\_ Concept et modélisation**

Le schéma de principe de l'onduleur à MLI de tension, alimentant le stator d'un moteur asynchrone est donné par la figure (III-12), le point milieu de la source de tension est fictif.



**Figure.III.12. Schéma de principe d'un onduleur à MLI.**

Les tensions de sorties aux bornes de l'ondulation MLI sont référencées par rapport au point fictif « O » de la source de l'onduleur, ont pour expression :

$$\begin{cases} v_{AB} = v_{AO} - v_{BO} \\ v_{BC} = v_{BO} - v_{CO} \\ v_{CA} = v_{CO} - v_{AO} \end{cases} \tag{III.29}$$

Sachant que  $V_{AN} + V_{BN} + V_{CN} = 0$ , nous pouvons écrire :

$$\begin{cases} v_{AN} = v_{AO} + v_{ON} \\ v_{BN} = v_{BO} + v_{ON} \\ v_{CN} = v_{CO} + v_{ON} \end{cases} \quad (\text{III.30})$$

En faisant la somme des équations du système (III.30), on obtient :

$$v_{AN} + v_{BN} + v_{CN} = v_{AO} + v_{BO} + v_{CO} + 3v_{ON} = 0 \quad (\text{III.31})$$

D'où :

$$v_{AO} + v_{BO} + v_{CO} = -3v_{ON} \quad (\text{III.32})$$

Donc :

$$v_{ON} = -\frac{1}{3}(v_{AO} + v_{BO} + v_{CO}) \quad (\text{III.33})$$

En substituant l'équation (III.33) dans le système(III.30) , il vient alors

$$\begin{bmatrix} v_{AN} \\ v_{BN} \\ v_{CN} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{AO} \\ v_{BO} \\ v_{CO} \end{bmatrix} \quad (\text{III.34})$$

Selon la condition des interrupteurs statique (SWITCHS) 'S<sub>K</sub>' (K=A, B, C), dans une branche d'onduleur commandé par MLI, on constate :

$$\begin{aligned} v_{ra} \geq V_P & \quad \Leftrightarrow S_1 = 1 \quad \text{si non} \quad S_1 = -1 \\ v_{rb} \geq V_P & \quad \Leftrightarrow S_2 = 1 \quad \text{si non} \quad S_2 = -1 \\ v_{rc} \geq V_P & \quad \Leftrightarrow S_3 = 1 \quad \text{si non} \quad S_3 = -1 \end{aligned}$$

Et les tensions de branches  $V_{KO}$  peuvent être exprimées en fonction des switchs S<sub>K</sub> par :

$$V_{KO} = S_K \cdot \frac{V_s}{2} \quad (\text{K=A, B, C})$$

On remplace  $V_{AO}, V_{BO}, V_{CO}$  dans la relation (III. 34) :

$$\begin{bmatrix} v_{AN} \\ v_{BN} \\ v_{CN} \end{bmatrix} = \frac{V_s}{6} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} \quad (\text{III.35})$$

Le système (III.35) présente le modèle mathématique de l'onduleur à MLI.

## III.6. Modélisation de la machine synchrone à aimants permanents

### III.6.1. Introduction

La machine synchrone, est une machine électrique dont la vitesse de rotation du vitesse du champs tournant est égale la vitesse est du rotor et indépendant de la charge.

Les développements des aimants permanents ont permis la réalisation des machines synchrone à aimant permanents (MSAP) est appelé aussi ''*Brushless*'' ou sans balais, dans laquelle on remplace l'excitation électrique au niveau du rotor par des aimants permanents qui assurent la production d'un champ magnétique [69].

Dans cette partie, nous présenterons la MSAP, en utilisant un modèle simple pour la simulation. Ensuite, nous étudierons l'ensemble convertisseur machine, où l'onduleur est commandé par la technique de modulation de largeur d'impulsion (MLI).

### III.6.2. Avantages et inconvénients de la MSAP

#### 1)\_ Avantages

La machine synchrone à aimant permanent caractérisé par plusieurs avantages :

- Absence de contacts glissants.
- Les pertes par l'effet Joule dans l'inducteur nulles.
- Une grande facilité de refroidissement. car les pertes sont localisées au stator.
- Un rendement plus élevé.
- La suppression des frottements des balais sur le collecteur.
- La diminution des problèmes de maintenance.

#### 2)\_ Inconvénients

Le principal inconvénient réside dans la difficulté de réglage et l'estimation, du flux d'inducteur et de ce fait la commande du moteur est effectuée par action extérieure.

### III.6.3. Hypothèses simplificatrices

La modélisation de MSAP est subordonnée par les hypothèses simplificatrices suivantes:

- La saturation et l’hystérésis du circuit magnétique sont négligeables ainsi que les pertes par courant de Foucault, Ce ci permet l’établissement des relations linéaires entre flux et courant.
- On suppose que la distribution de la force magnétomotrice est sinusoïdale ce qui nous permet de ne considérer que la première harmonique d’espace électrique (le fondamental).
- Les réactances de fuites sont indépendantes de la position du rotor.

### III.6.4. Modélisation triphasée de la machine MSAP

#### 1) Représentation électrique de la MSAP

La machine synchrone à aimants permanents (MSAP) est représentée, comme illustré dans la figure ci-dessous, par ses trois enroulements statoriques. L’induction magnétique générée par les aimants permanents est modélisée par une source de flux magnétique tournant à la vitesse [70]

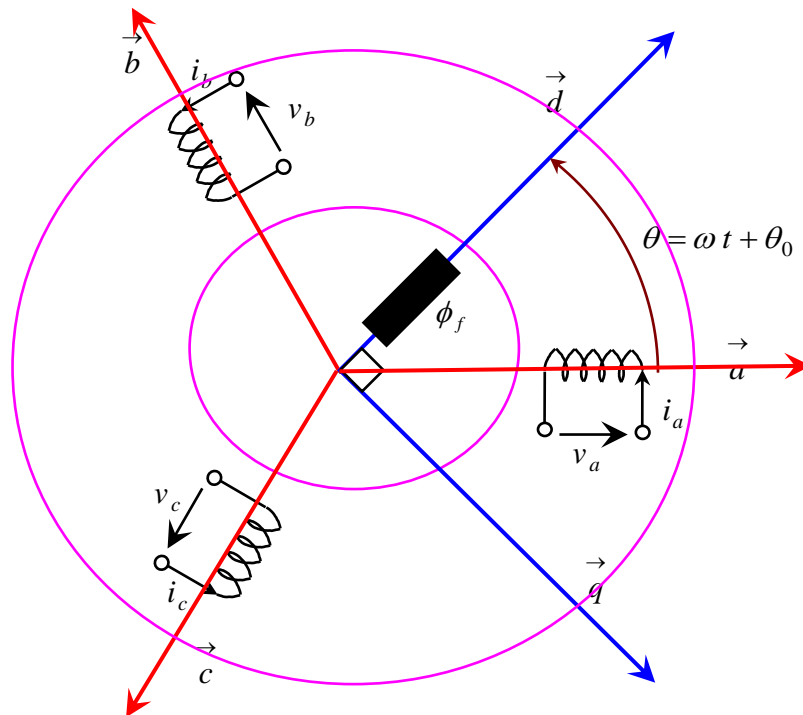


Figure .III.13. Représentation électrique de la MSAP.

La modélisation de la machine est faite en utilisant la transformation de Park qui permet le passage du repère triphasé (a, b, c) à un repère (d,q) en utilisant de transformation suivante :

$$[X_{dqh}] = [P(\psi)][X_{abc}] \tag{III.36}$$

$$[P(\psi)] = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\psi) & \cos\left(\psi - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\psi - \frac{4\pi}{3}\right) \\ -\sin(\psi) & -\sin\left(\psi - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\psi - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \tag{III.37}$$

On déduit la matrice inverse :

$$[p(\psi)]^{-1} = \begin{bmatrix} \cos(\psi) & -\sin(\psi) & 1 \\ \cos\left(\psi - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\psi - \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \\ \cos\left(\psi - \frac{4\pi}{3}\right) & -\sin\left(\psi - \frac{4\pi}{3}\right) & 1 \end{bmatrix} \tag{III.38}$$

Où  $\psi$  correspond la position du repère choisi pour la transformation ( $(\psi = \theta_s)$  pour le stator et  $(\psi = \theta_r)$  pour le rotor).

**2)\_ Equation électrique de la MSAP**

La loi de mailles s’exprime sur des enroulements statoriques par les équations :

$$\begin{cases} v_a = R_s i_a + \frac{d}{dt} \varphi_a \\ v_b = R_s i_b + \frac{d}{dt} \varphi_b \\ v_c = R_s i_c + \frac{d}{dt} \varphi_c \end{cases} \tag{III.39}$$

$$[V_s] = [R_s][I_s] + \frac{d}{dt} [\Phi_s] \tag{III.40}$$

$[V_s]$  : Vecteur des tensions statoriques.

$[I_s]$  : Vecteur des courants statoriques.

$[\Phi_s]$  : Vecteur des flux statoriques.

Après l'application la transformation de Park lié au rotor, sur système des équations (III.39), on obtient le système des équations des tension dans le repère qui constitue un modèle électrique dynamique pour l'enroulement équivalent :

$$\begin{cases} v_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d}{dt} \varphi_{ds} - \omega \varphi_{qs} \\ v_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d}{dt} \varphi_{qs} + \omega \varphi_{ds} \end{cases} \quad (III.41)$$

### 3)\_Équations du flux

Les équations des flux statoriques s'écrivent dans le repère de Park lié au rotor sous la forme suivante :

$$\begin{cases} \varphi_{ds} = L_d \cdot i_{ds} + \varphi_f \\ \varphi_{qs} = L_q i_{qs} \end{cases} \quad (III.42)$$

Où  $\phi_f$  le flux d'excitation constant des aimant permanent.

### 4)\_ Equation du couple électromagnétique

L'expression du couple électromagnétique s'écrit :

$$C_{em} = \frac{1}{2} [I_s]^T \left( \frac{d}{d\theta} [L_s] \right) [I_s] \quad (III.43)$$

Avec:

$$\theta_e = \theta_m p \quad (III.44)$$

$P$ : nombre de paire de pôles.

Après développement on trouve:

$$\begin{aligned} C_{em} &= p (\phi_{ds} i_{qs} - \phi_{qs} i_{ds}) \\ C_{em} &= p [(L_d - L_q) i_{ds} + \phi_f] i_{qs} \end{aligned} \quad (III.45)$$

### 5)\_ Equations Mécaniques

L'équation la plus simple d'un corps en rotation s'écrit :

$$J \frac{d\Omega}{dt} = C_{em} - C_r - f_c \Omega \quad (III.46)$$

Avec:

$$\Omega = \frac{\omega}{p} \tag{III.47}$$

**6)\_ Modèle d'état de PARK**

L'équation d'état de la machine obtenue est donnée sous la forme [27] :

$$\frac{dX}{dt} = AX + BU \tag{III.48}$$

On considère les courants statoriques et la vitesse de rotation comme variables d'état. Après réarrangement des équations, nous obtenons:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-R_s}{L_d} & \frac{\omega L_q}{L_d} \\ \frac{-\omega L_d}{L_q} & \frac{-R_s}{L_q} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_d} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_q} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{ds} \\ v_{qs} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{-\Phi_f}{L_q} \omega \end{bmatrix} \tag{III.49}$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{p}{J} C_{em} - \frac{f}{J} \omega - \frac{p}{J} C_r \tag{III.50}$$

Avec :

$$C_{em} = p((L_d - L_q)i_{ds} - \varphi_f) \tag{III.51}$$

**III.7.Modélisation d'un véhicule hybride**

Un véhicule hybride est un moyen de transport visant à améliorer la mobilité de l'homme. Son déplacement repose sur la puissance et le couple générés par sa chaîne de traction. Ces grandeurs doivent répondre à diverses contraintes de l'environnement telles que:

- lanature de la route,
- lapente,
- larésistance de l'air (vent), etc.

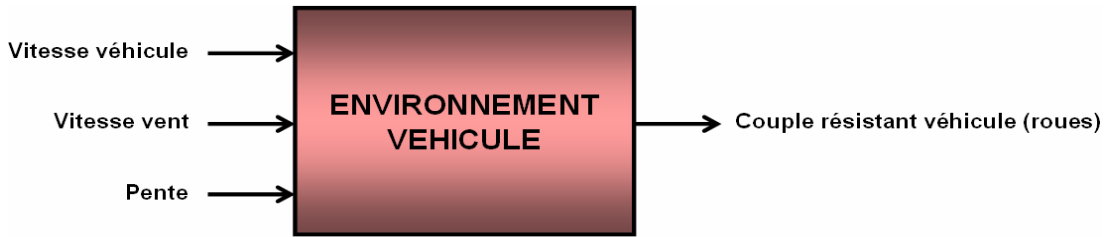


Figure .III.14.L'ensemble des forces

Ces contraintes peuvent être modélisées sous forme de forces, qui, combinées, constituent le couple résistant que le véhicule doit surmonter pour avancer efficacement.

### III.7.1 Force de résistance au roulement Froul

L'ensemble des forces s'exerçant sur le véhicule est exprimé comme suit :

$Froul = [Crr \cdot Mav + Crr \cdot Mar] \cdot g = g \cdot Mv \cdot Crr$  L'effet de ces forces et leurs directions sont généralement représentés dans une figure explicative

#### Forces responsables de la consommation

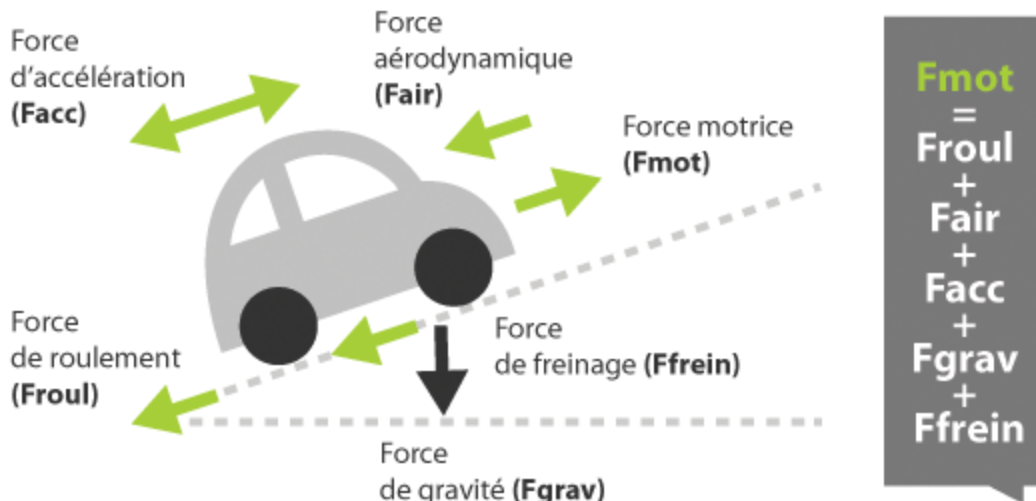


figure .III.15. L'action de ces force sur le véhicule

- $g$  : accélération gravitationnelle (9.81 m/s<sup>2</sup>)
- $Crr$  : coefficient de roulement

- $M_v$ : masse totale du véhicule

Le coefficient de roulement dépend de plusieurs facteurs :

- type, pression et température des pneus,
- vitesse du véhicule,
- revêtement de la route.

Pour des pneus classiques :  $C_{rr} \approx 0.015$

Pneus "verts" développés par Michelin :

$C_{rr} \approx 0.007$

Le calcul de cette force exige de prendre en compte plusieurs paramètres, son expression est :

$$F_{aero} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S_f \cdot C_{px} \cdot (V_{veh} - V_{vent})^2$$

Avec :

Paramètres aérodynamiques du véhicule

- $\rho$  : Masse volumique de l'air, généralement prise égale à 1,23 kg/m<sup>3</sup>.
- $S_f$  : Section frontale du véhicule, exprimée en m<sup>2</sup>.
- $C_{px}$  : Coefficient de pénétration dans l'air, varie significativement selon le type de véhicule :
  - 0,2 : Véhicule à profil très aérodynamique.
  - 0,3 : Véhicule à bon profil aérodynamique.
  - 0,5 : Véhicule typique.
  - 0,7 : Camionnette.
- $V_{xveh}$  : Vitesse du véhicule, en m/s.
- $V_{xvent}$  : Vitesse du vent, en m/s, définie selon deux conventions :
  - Positive : si le vent s'oppose au mouvement du véhicule.
  - Négative : si le vent souffle dans le même sens que le véhicule.

### 1. Force due à la pente ( $F_{pente}$ )

C'est la force nécessaire au véhicule de masse (m) pour vaincre une pente (exprimé en

pourcentage dans le jargon routier), son expression est donnée par :

$$F_{\text{pente}} = g \cdot M_v \cdot \sin(\alpha)$$

Avec  $\alpha$ : L'angle de la pente.

$g$ : La gravitation généralement prise à  $9.81 \text{ m/s}^2$

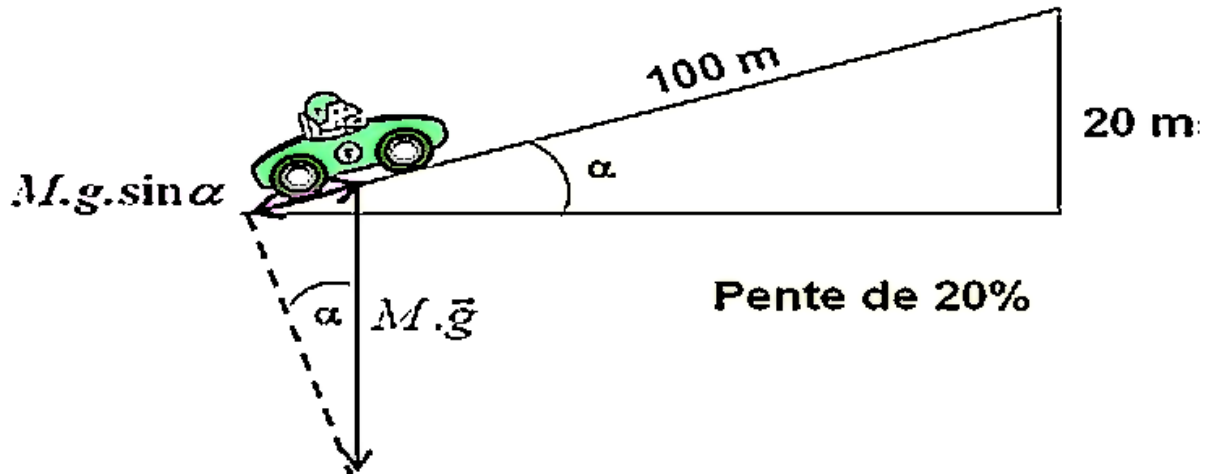


Figure .III.16.Définition d'une pente

## 2.Force due à l'accélération (Facc)

$$F_{acc} = M_v \cdot \frac{dv_{veh}}{dt} \quad (III.52)$$

L'expression de la puissance à fournir en fonction de cette force et de la vitesse du déplacement du véhicule est donnée par :

$$P = F_{tot} \cdot V_{veh}$$

Le couple résistant  $C_r$  est lié à la force totale par la relation :

$$C_r = F_{tot} \cdot R_r$$

$R_r$  : Rayon de la roue (m)

## III.8. Conclusion

Ce chapitre a permis de développer une modélisation complète et organisée de la chaîne de traction d'un véhicule hybride/électrique, en intégrant ses principaux sous-systèmes : les convertisseurs DC/DC (Buck, Boost et Buck-Boost bidirectionnel), la batterie lithium-ion, l'onduleur à deux niveaux de tension, la machine synchrone à aimants permanents (MSAP), ainsi que les forces impliquées dans le déplacement du véhicule. Chacun de ces éléments a été étudié selon ses principes de fonctionnement, ses équations caractéristiques et ses modèles de commande, afin de permettre une analyse fine des flux d'énergie, du comportement dynamique et de la performance globale du système de propulsion. Cette approche modulaire et hiérarchisée permet de simuler différents scénarios de fonctionnement, d'optimiser les choix technologiques et d'adapter la configuration du véhicule aux exigences d'efficacité énergétique, d'autonomie et de confort d'utilisation. Dès lors, la modélisation présentée constitue une base solide pour la mise en œuvre d'une simulation globale du véhicule dans un environnement numérique, dans le but d'une conception intelligente, éco-performante et adaptée aux enjeux de la mobilité durable [71].

**Chapitre IV :**  
**Simulation de la commande du véhicule à**  
**hydrogène**

## IV.1.Introduction

Dans un contexte marqué par la nécessité de réduire les émissions de gaz à effet de serre et de développer des solutions de mobilité plus durables, le véhicule à hydrogène apparaît comme une alternative prometteuse aux véhicules thermiques classiques. Ce type de véhicule utilise une pile à combustible pour convertir l'hydrogène en électricité, alimentant ainsi un moteur électrique. Pour garantir de bonnes performances, une autonomie suffisante et une gestion efficace de l'énergie, une stratégie de commande adaptée est indispensable. Ce travail porte sur la modélisation, la commande et la simulation d'un véhicule à hydrogène. Il vise à étudier le comportement dynamique du système et à évaluer différentes stratégies de gestion d'énergie entre la pile à combustible, la batterie et le moteur électrique. La simulation est réalisée à l'aide d'un environnement numérique (MATLAB/Simulink), qui permet de représenter avec précision les composants du système et leurs interactions. Les résultats obtenus montrent l'importance d'une commande efficace pour assurer la performance, la stabilité et la longévité du système. La stratégie de gestion d'énergie adoptée permet d'optimiser la consommation d'hydrogène, de préserver la batterie et d'améliorer le rendement global du véhicule. Ce travail ouvre ainsi la voie à de futures recherches et développements vers une mobilité hydrogène plus fiable et plus performante [72]

## IV.2. Convertisseur DC-DC

Les convertisseurs DC-DC jouent un rôle central dans de nombreuses applications modernes. Ils assurent l'alimentation des réseaux de communication, des instruments électroniques, ainsi que des systèmes à haute puissance tels que la charge et la décharge de batteries, le placage électrochimique ou encore le soudage. Leur présence est également indispensable dans les véhicules électriques, où ils contribuent à la régulation de l'énergie entre les différentes sources et les composants du système. Fonctionnant en mode de commutation, ces convertisseurs permettent de transformer une tension d'entrée continue non régulée en une tension de sortie continue et contrôlée, adaptée aux exigences de la charge. Pour garantir une sortie stable malgré les perturbations (variations de la tension d'entrée ou de la charge), une commande en boucle fermée est nécessaire. En l'absence de contrôle efficace, il est pratiquement impossible de maintenir des performances stables. Bien que des stratégies classiques comme les régulateurs P, PI et PID soient

couramment utilisées, elles montrent des limites notables en régime fortement dynamique ou en présence de variations importantes de charge. Dans ce contexte, ce chapitre se focalise sur la mise en œuvre de deux stratégies de commande avancées — la commande en mode tension et la commande en mode courant — appliquées aux principaux types de convertisseurs : Buck, Boost et Buck-Boost bidirectionnel. Ces approches visent à assurer un fonctionnement stable, efficace et adaptable quelles que soient les conditions de fonctionnement du système [73].

### IV.3. Application de la commande PI en mode tension

Le circuit électronique du convertisseur buck-boost commande par PI en mode tension est représenté dans la figure (IV.1). Le signal MLI est généré en appliquant une tension de commande à une entrée de comparateur, et une tension en dents de scie (les ondes triangulaires du MLI) de fréquence fixe, générée par l'horloge, le rapport cyclique du signal MLI est proportionnel à la tension de commande et détermine le pourcentage de temps que l'élément de commutation conduit. En bref la MLI est utilisée pour moduler le rapport cyclique, pour le fonctionnement à fréquence fixe et en contrôlant la tension de sortie. Le lien entre l'entrée et la sortie du système peut être modifié par un ajout du contrôleur PID qui est généralement calculé selon certains critères définissant le type de réponse souhaitée pour le système en boucle fermée (stabilité, temps de réponse...) [74].

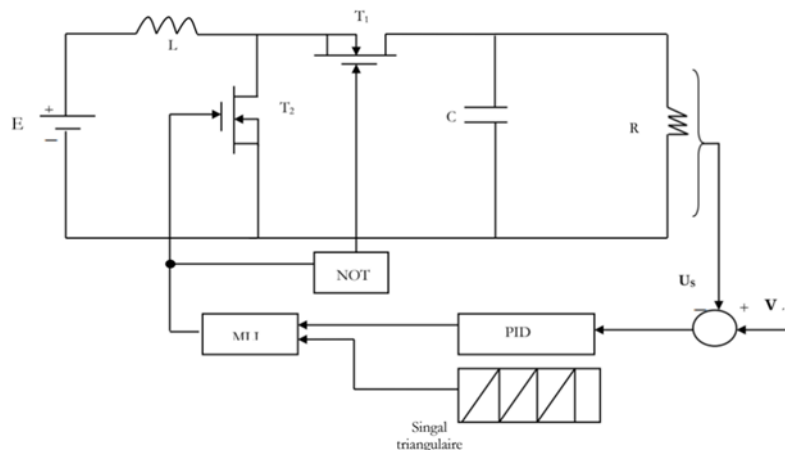


Figure IV.1 Commande PI en mode tension d'un convertisseur Buck-Boost bidirectionnel.

#### IV.4. Application de la commande réseau NARX en mode tension

Le NARX est un réseau complexe qui possède plusieurs couches et intègre une entrée exogène ainsi qu'une connexion de rétroaction sur la sortie. Il est spécifiquement conçu pour modéliser des régressions auto-non linéaires. Cette approche améliore la performance du modèle à chaque étape en ajustant progressivement les biais et les poids via un processus d'apprentissage itératif. Pendant l'entraînement, les sorties du réseau sont comparées aux valeurs réelles lorsque celles-ci sont disponibles, puis les résultats sont renvoyés au réseau. Les modèles NARX offrent une plus grande flexibilité que d'autres réseaux pour intégrer des données issues d'entrées exogènes. La validité du modèle est renforcée tout en réduisant simultanément le nombre de paramètres nécessaires grâce à l'ajout d'un degré de liberté supplémentaire. L'équation (IV.1) représente le modèle mathématique du réseau neuronal NARX utilisé dans ce travail.

$$Y(t) = f[u(t - n_u), \dots, u(t - 1), u(t), v(t - n_v), \dots, v(t - 1)] \quad (\text{IV.1})$$

Où  $f$  et  $u(t)$  désignent respectivement la fonction non linéaire et l'entrée du réseau au temps  $t$  lors de l'entraînement avec les réseaux neuronaux NARX. Dans cette partie, le contrôleur PI est remplacé par le contrôleur proposé NARXN. Les entrées de chaque neurone sont l'erreur ( $e$ ),  $e(k-1)$ ,  $e(k-2)$ ,  $y(k-1)$  et  $y(k-2)$ , et la sortie correspond au signal de commande généré par chaque contrôleur. Les données d'entraînement ont été obtenues à partir du contrôleur PI. Ces données d'entraînement comprennent les caractéristiques d'entrée et de sortie. Le NARXN est entraîné sur la base des données acquises. L'approche de cette recherche consiste à apprendre 2 000 001 valeurs de données d'entraînement afin d'ajuster les paramètres du système pour produire une sortie optimale. Dans cette étude, 80 % des données d'entrée sont utilisées pour entraîner le NARXN, 10 % pour les tests et 10 % pour la validation. La couche cachée du NARXNN est composée de dix neurones. La couche d'entrée a un décalage temporel d'un cycle, la couche cachée utilise la fonction tangente inverse comme fonction d'activation, la couche de sortie utilise une fonction de transfert linéaire comme fonction d'activation, et l'indicateur de performance est calculé à partir de l'erreur quadratique moyenne (RMSE). L'algorithme d'entraînement utilise la méthode de Levenberg-Marquardt. Le modèle NARXNN utilisé dans cette étude pour estimer la sortie optimale du système est illustré [75].

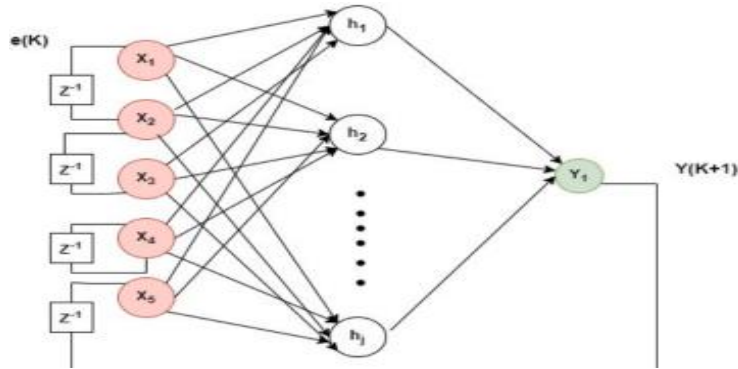


Figure IV.2 Diagramme de structure du NARXNN

L'indice de performance du modèle de prédiction NARXNN est présenté à la **Figure IV.3**. Il convient de noter que les ensembles d'entraînement et de test ont tous deux atteint la valeur cible de l'erreur lors de la 219 itération d'entraînement. En revanche, après la 255e itération, l'erreur de l'ensemble de test a atteint la valeur cible de 0,021865. Il est remarquable que l'erreur de l'ensemble de validation ait continué à augmenter jusqu'à ce que le réseau nécessite seulement 255 itérations pour s'approcher progressivement du résultat optimal en ajustant le taux d'apprentissage lors des entraînements suivants. Ces résultats suggèrent que la précision élevée et la convergence rapide sont des caractéristiques du modèle de prédiction [76].

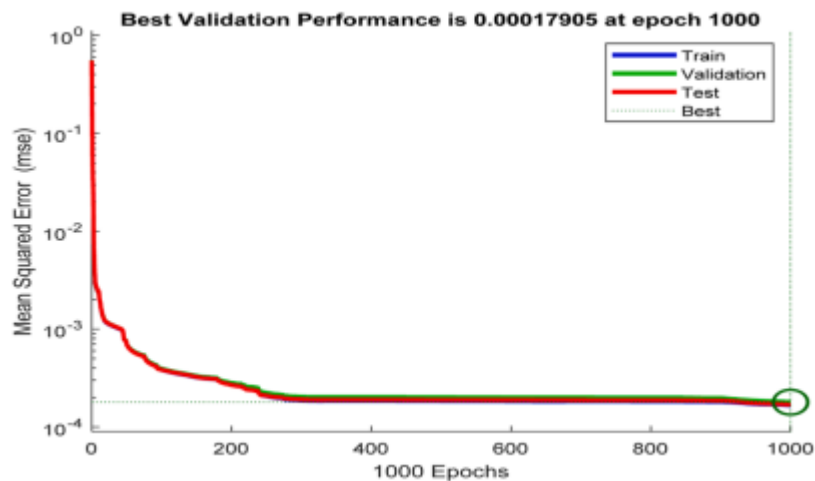
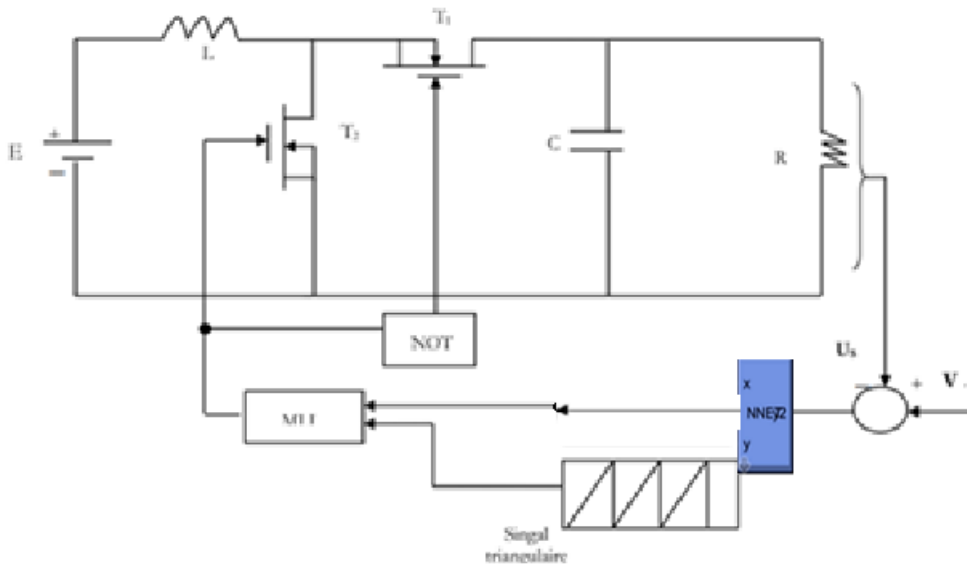


Figure IV.3. Mean squared error

De nombreux processus dynamiques sous le contrôle tertiaire du système sont présents dans les données initiales. L'objectif d'entraînement du système et la sortie du modèle de réseau de neurones artificiels (RNA) sont étroitement alignés. Un excellent effet de suivi est obtenu même pour le seul processus dynamique. Le comportement dynamique présente la plus grande erreur, d'environ 1, ce qui indique que le modèle capture avec précision le système [77].



**Figure IV.4. Commande par réseaux de neurone en mode tension d'un convertisseur Buck-Boost bidirectionnel.**

#### IV.5. Principe de la commande vectorielle

La commande par orientation de champs consiste à annuler l'effet du flux statorique suivant l'axe direct, c'est-à-dire, orienter le flux dans l'entrefer suivant l'axe quadrature, cela est obtenu en imposant à ( $i_q$ ) une valeur nulle et commander la vitesse et la position par ( $i_d$ ) et ( $\theta$ ) seulement.

Physiquement cette stratégie revient à maintenir le courant statorique en quadrature avec le flux rotorique [78].

D'après l'équation de couple électromagnétique suivante

$$C_{em} = p(\Phi_d i_q - \Phi_q i_d) = p[(L_d - L_q) i_q i_d + \Phi_f i_q] \quad (\text{IV.3})$$

On s'aperçoit que si l'on élimine le produit  $\Phi_q i_d$ , alors le couple rassemblerait fort à celui d'une machine à courant continu (MCC). Il suffit, pour ce faire d'orienter le courant statorique  $i_s$  sur l'axe  $q$  de manière à annuler la composante de courant direct  $i_d$ . Le couple alors s'écrit :

$$C_{em} = p\Phi_f i_q \tag{IV.4}$$

- Si la MSAP est à pôles lisses  $L_d=L_q$ , le couple  $C_{em} = p\Phi_f i_q$  et il est maximal pour  $i_d$  nul.

- Si la MSAP est à pôles saillants  $L_d \neq L_q$ , le couple  $C_{em}$  est maximal pour un courant  $i_d$  optimisé. Si cette valeur du courant est maintenue constante le couple  $C_{em}$  est proportionnel à  $i_q$ .

La machine étudiée est à pôles lisses ( $L_d=L_q$ ). Son couple électromagnétique est maximal lorsque le courant statorique dans le référentiel de Park est maintenu suivant l'axe  $q$ , ceci revient à maintenir la composante directe du courant nulle montrée par la figure (3.1) qui a pour effet la diminution des pertes joules.

Nous avons :

$$v_d = -L_q \omega i_q \tag{IV.5}$$

$$v_q = R_s i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + L_d \omega i_d + \Phi_f \omega \tag{IV.6}$$

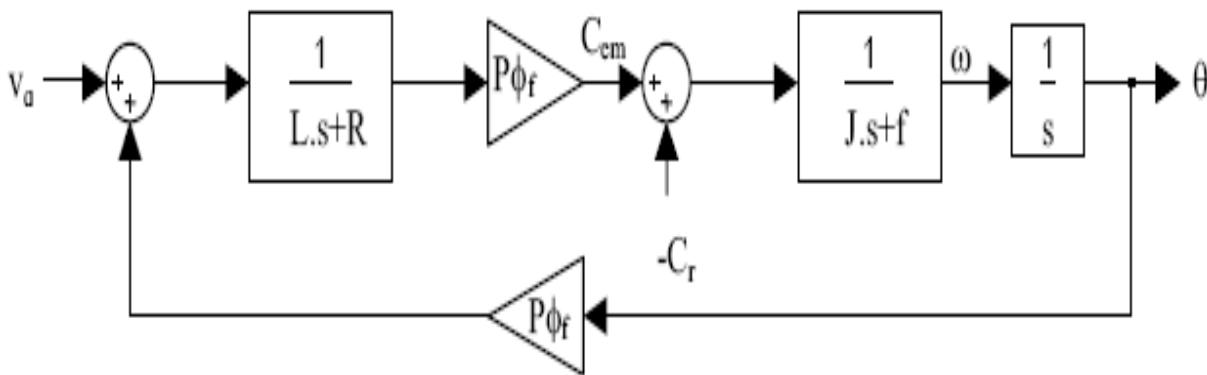


Figure. IV.5. Schéma équivalent de la MSAP à courant direct nul

Cette équation associée à l'équation mécanique peut être représentée sous forme d'un schéma bloc suivant :

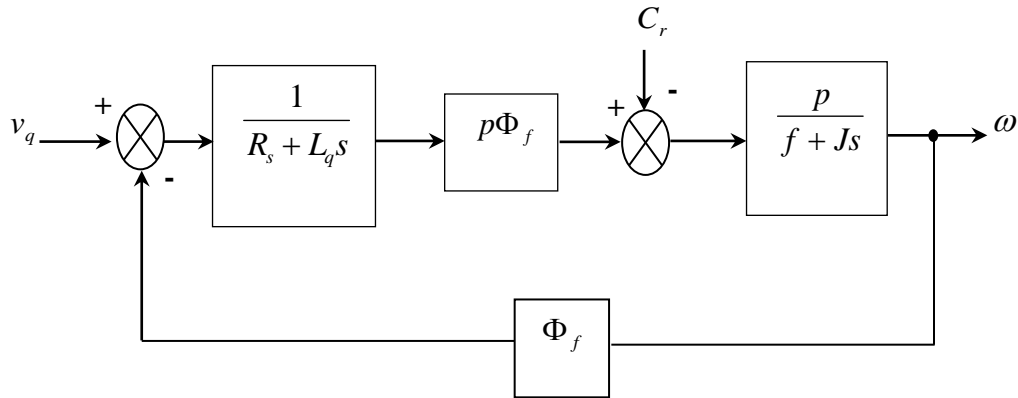


Figure IV.6. Modèle en tension avec ( $v_d = 0$ )

#### IV.6. Commande vectorielle directe

Dans la même mesure où un contrôle précis du couple est exigé comme pour le cas des machines de fortes puissances une régulation du courant  $i_q$  est indispensable.

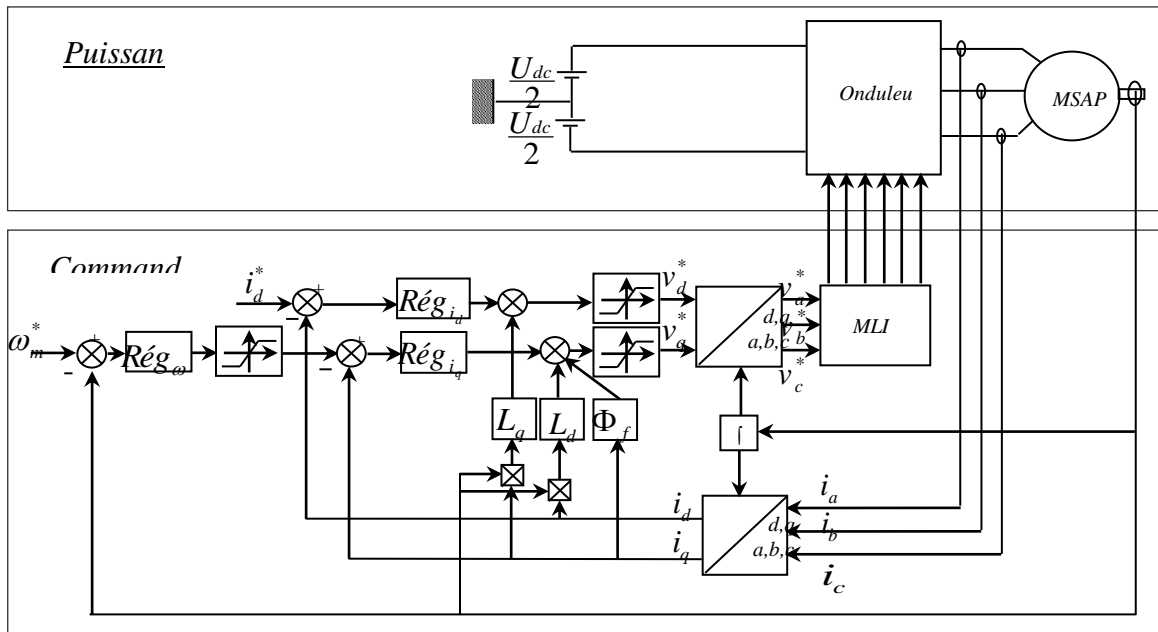
Le modèle de la MSAP dans le référentiel de PARK défini par les équations suivantes :

$$\begin{cases} v_d = R_s i_d + \frac{d\Phi_d}{dt} - \omega_m \Phi_q \\ v_q = R_s i_q + \frac{d\Phi_q}{dt} + \omega_m \Phi_d \end{cases} \quad (\text{IV.7})$$

La commande d'un courant est donc sensible à la variation de l'autre. Ce couplage qui constitue l'une des difficultés de la commande vectorielle peut être éliminé par une méthode de compensation classique. Celle-ci consiste à faire réguler les deux courants  $i_q$  et  $i_d$  en négligeant les termes de couplage.

Ces derniers étant rajoutés à la sortie des correcteurs des courants afin d'obtenir les tensions de commande  $v_d^*$  et  $v_q^*$ .

La figure suivante représente le principe de la commande vectorielle directe d'une machine MSAP. Les régulateurs utilisés dans ce type de commande sont la boucle de régulation de vitesse et celle des courants  $i_d$  et  $i_q$ .



**Figure IV.7. Schéma de principe de la commande vectorielle directe d'une MSAP**

Alors le régulateur de vitesse  $Rég_{\omega}$  régule la vitesse avec la vitesse de référence dont la vitesse de ce régulateur est le couple électromagnétique de référence  $C_{em}^*$ , le courant  $i_q^*$  est comparé à la valeur de  $i_q$  grâce au régulateur de courant  $Rég_{i_q}$  dont la sortie est la tension de référence  $v_q^*$ . Le régulateur de courant  $Rég_{i_d}$  régule le courant  $i_d$  dont le courant de référence  $i_d^*$  est nul avec une sortie  $v_d^*$ . Les deux tensions de références  $v_d^*$  et  $v_q^*$  sont alors transformées en grandeurs  $v_a^*$ ,  $v_b^*$ ,  $v_c^*$ .

L'onduleur à MLI applique des créneaux de tensions à la machine dont les valeurs moyenne sur une période de MLI correspondent aux valeurs  $v_a^*$ ,  $v_b^*$ ,  $v_c^*$ .

Les courants  $i_a$ ,  $i_b$ ,  $i_c$  sont mesurés puis transformés et donnent  $i_d$  et  $i_q$  qu'on utilise pour la régulation des courants.

L'angle  $\theta$  utilisé dans la transformation directe et inverse est calculé à partir d'une mesure de vitesse de rotation du moteur.

### IV.6.1 Structure d'orientation

Le système est décrit par les lois de commande [36]:

$$\begin{cases} v_d = v_{d1} - f_{emd} \\ v_q = v_{q1} - f_{emq} \end{cases} \quad (IV.8)$$

avec :

$$\begin{aligned} v_{d1} &= R_s i_d + L_d \frac{di_d}{dt} \\ v_{q1} &= R_s i_q + L_q \frac{di_q}{dt} \end{aligned} \quad (IV.9)$$

Les deux nouvelles tensions de commande :

$$f_{emd} = L_q \omega i_q \quad (IV.10)$$

$$f_{emq} = -\omega(L_d i_d + \Phi_f) \quad (IV.11)$$

Le schéma bloc (DFOC ) suivant correspondant la structure la structure

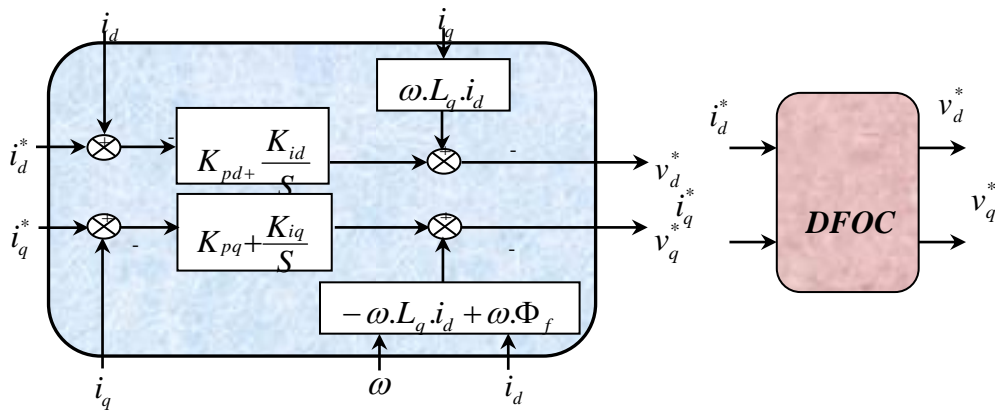
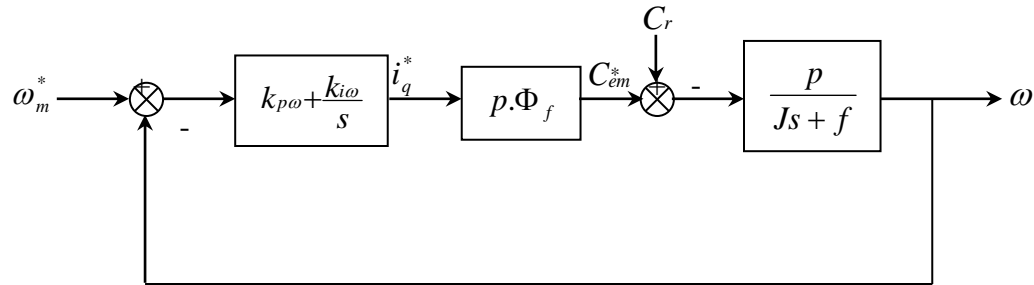


Figure. IV.8.Schéma bloc " DFOC" (à gauche) et synoptique (à droite)

### IV.6.2 Calcul des régulateurs

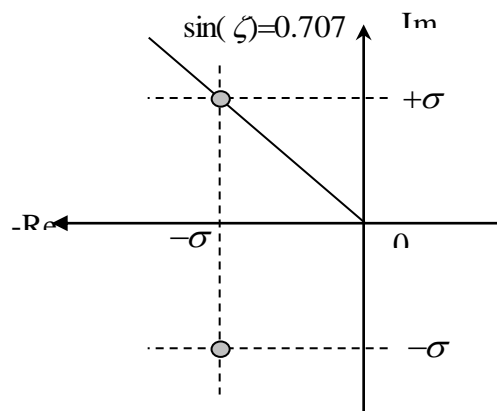
- Régulateur de vitesse

Le régulateur de la vitesse nous permet de déterminer la référence de couple afin de la maintenir à sa valeur de consigne. La boucle de la régulation de la vitesse est donnée par la **figure .IV.9**



**Figure. IV.9.**Boucle de régulation de la vitesse

Lors de la régulation de vitesse on associe le régulateur de type PI qui détermine la consigne de vitesse. Les paramètres du régulateur sont calculés par la méthode du placement des pôles.



**Figure. IV.10.**placement des pôles choisi

La fonction de transfert  $\omega_m / \omega_m^*$  est la suivante :

$$\frac{\omega_m}{\omega_m^*} = \frac{N(s)}{D(s)} = \frac{\frac{p^2 \Phi_f}{J} (k_{pw} s + k_{iw})}{s^2 + \frac{f_m + p^2 \Phi_f k_{pw}}{J} s + \frac{p^2 \Phi_f k_{iw}}{J}} \quad (\text{IV.12})$$

Alors l'équation caractéristique de la fonction de transfert en boucle fermée est donnée par :

$$D(s) = s^2 + \frac{f_m + p^2 \Phi_f k_{pw}}{J} s + \frac{p^2 \Phi_f k_{iw}}{J} \quad (\text{IV.13})$$

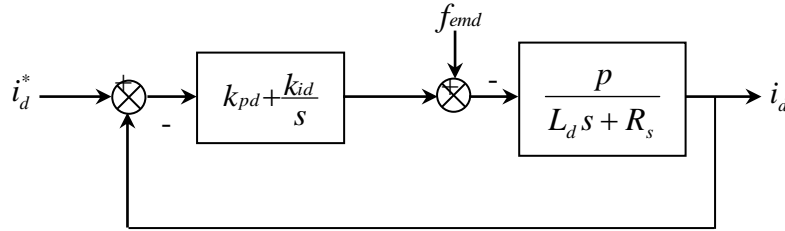
En imposant deux pôles conjugués en boucle fermée et par identification,

On trouve les paramètres du régulateur :

$$\begin{cases} \frac{f_m + p^2 \Phi_f \cdot k_{p\omega}}{J} = 2\sigma \\ \frac{p^2 \Phi_f \cdot k_{i\omega}}{J} = 2\sigma^2 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} k_{p\omega} = \frac{(2\sigma J - f_m)}{p^2 \Phi_f} \\ k_{i\omega} = \frac{2\sigma^2 J}{p^2 \Phi_f} \end{cases} \quad (\text{IV.14})$$

- **Régulateurs de courant**

La boucle de régulation du courant  $i_d$  est donnée par la figure suivante :



**Figure IV.11. Boucle de courant  $i_d$**

Le correcteur de courant a la forme suivante :

$$C_d(s) = k_{pd} + \frac{k_{id}}{s} \quad (\text{IV.15})$$

La fonction de transfert  $\frac{i_d}{i_d^*}$  est la suivante :

$$\frac{i_d}{i_d^*} = \frac{N(s)}{D(s)} = \frac{\frac{k_{pd} + k_{id}s}{L_d}}{s^2 + \frac{R_s + k_{pd}}{L_d}s + \frac{k_{id}}{L_d}} \quad (\text{IV.16})$$

Alors l'équation caractéristique est exprimée par :

$$D(s) = s^2 + \frac{R_s + k_{pd}}{L_d}s + \frac{k_{id}}{L_d} \quad (\text{IV.17})$$

Alors on trouve les paramètres du régulateur suivant :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{R_s + k_{pd}}{L_d} = 2\sigma \\ \frac{k_{id}}{L_d} = 2\sigma^2 \end{array} \right. \Rightarrow \begin{array}{l} k_{pd} = 2L_d\sigma - R_s \\ k_{id} = 2L_d\sigma^2 \end{array} \quad (\text{IV.18})$$

Les coefficients de régulateur de vitesse (PI) sont calculés pour les pôles conjugués  $\rho = 100$  ce qui donne :

$$\left\{ \begin{array}{l} kiw = 14 \\ kpw = 0.2 \end{array} \right. \quad (\text{IV.19})$$

Les coefficients de régulateur de courant (PI) sont calculés pour les pôles conjugués  $\rho = 200$  ce qui donne :

$$\left\{ \begin{array}{l} kiw = 400 \\ kpw = 2 \end{array} \right. \quad (\text{IV.20})$$

#### IV.7. Resultats de simulation et discussion

La méthode de commande vectorielle basée sur un contrôleur PI à une machine synchrone à aimants permanents (PMSM) a été utilisée pour vérifier que l'agencement du véhicule électrique (VE) alimenté par une pile à combustible PEM possède des capacités dynamiques et statiques adéquates. Un modèle complet du système VE est construit et analysé sous MATLAB/Simulink dans différentes conditions de fonctionnement.

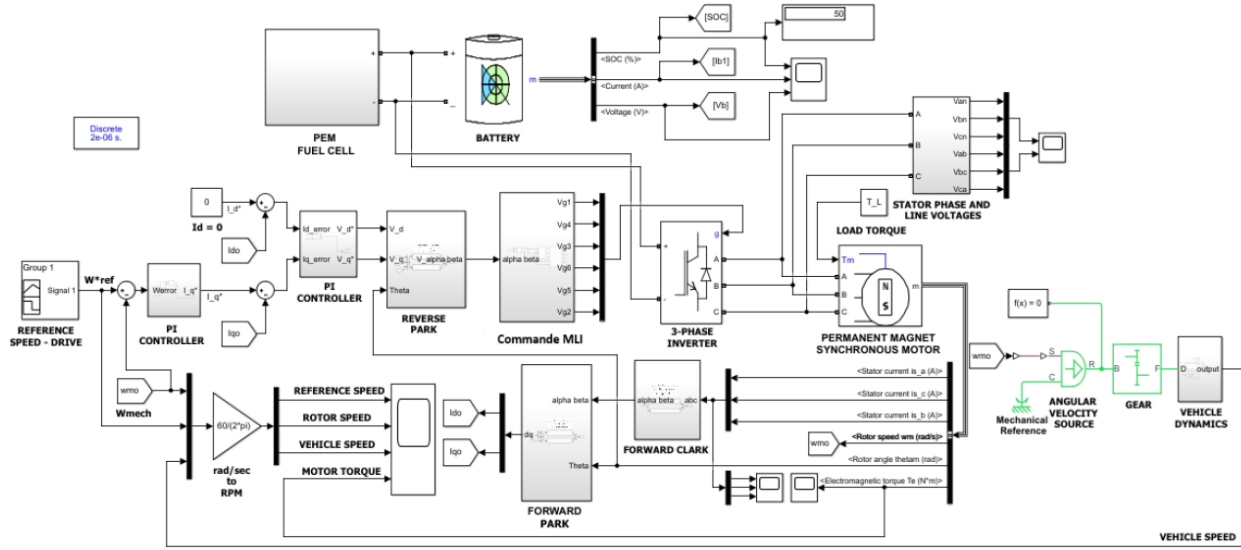


Figure IV. 12. Modèle Simulink du véhicule électrique alimenté par pile à combustible avec commande vectorielle.

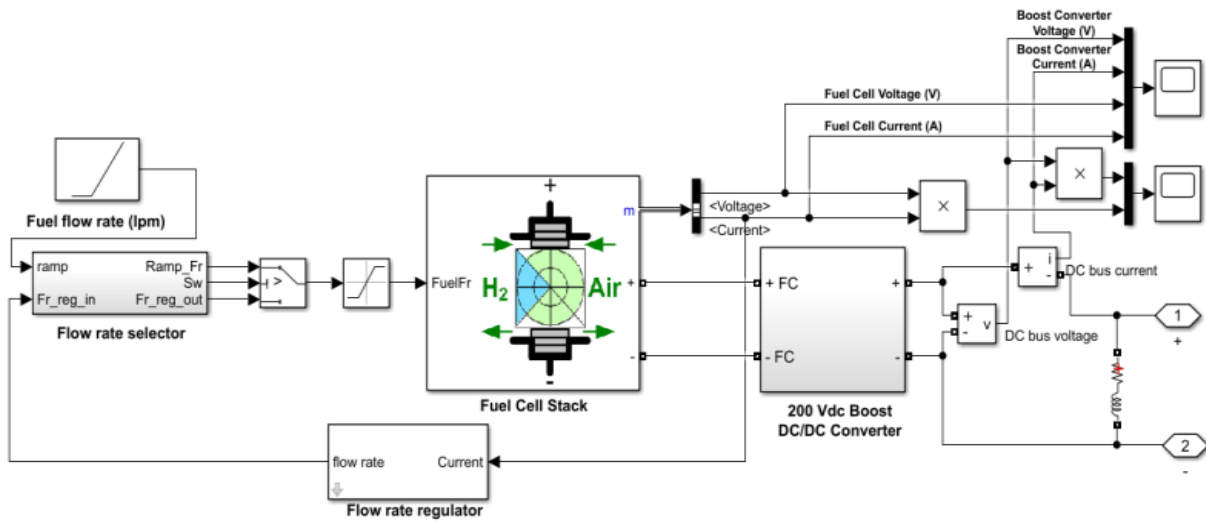
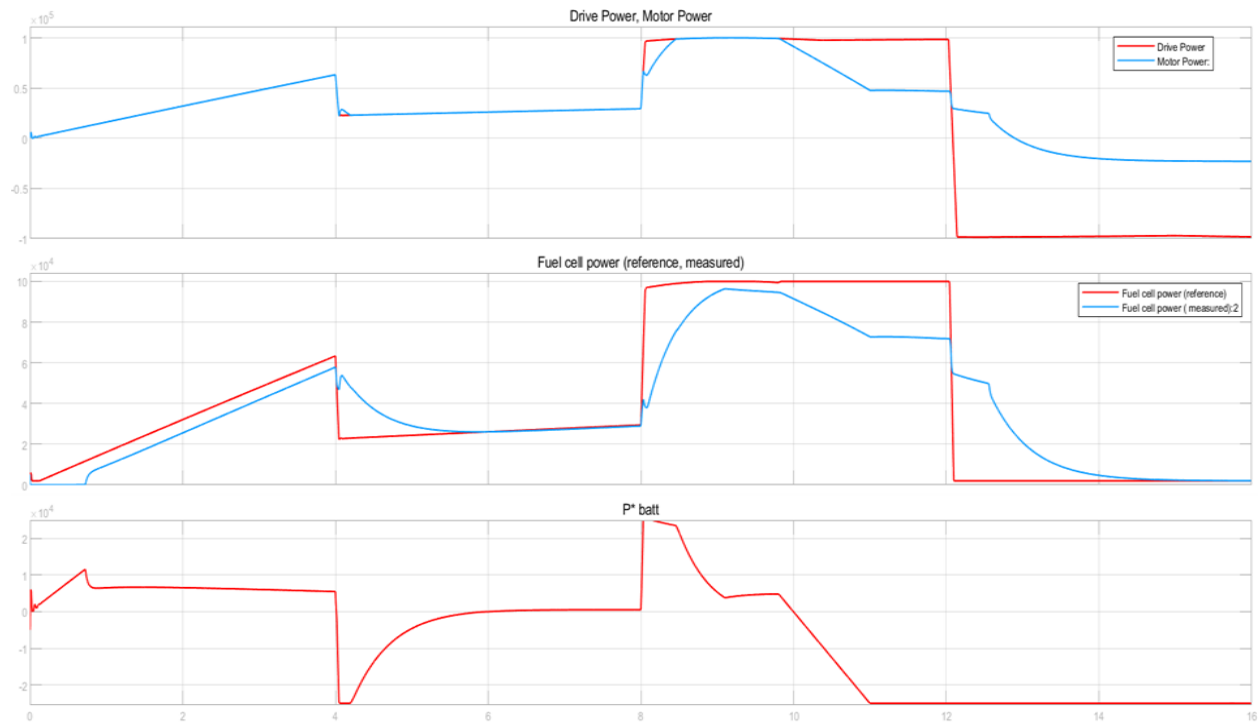


Figure IV.13. Modèle Simulink de la pile à combustible PEM

La Fig. IV.12 présente un modèle Simulink détaillé de la méthode de commande vectorielle proposée pour l'ensemble du système VE. Afin de développer ce modèle de simulation, on a intégré le concept de simulation segmentée, qui divise le système de commande global en segments. La Fig. IV.13 montre le modèle Simulink du sous-système de la pile à combustible PEM. Les paramètres figurant dans ANNEX sont pris en compte dans la modélisation dynamique du VE et de l'entraînement PMSM, respectivement. La pile à combustible PEM est composée de

400 cellules avec une puissance maximale de 6 kW. Sous une pression de 3 bar et à une température de 95 °C, le carburant hydrogène est injecté dans la pile. Ensuite, l'unité PEM satisfait les besoins de charge, et la tension développée par le convertisseur boost atteint ainsi environ 200 V.



**Figure IV.14** Répartition et évolution des puissances dans un système hybride Fuel Cell – Batterie – Moteur"

Les figures présentées illustrent le comportement dynamique d'un système de propulsion hybride intégrant une pile à combustible, un moteur électrique et une batterie. La première figure compare la puissance demandée pour la conduite (Drive Power) à celle réellement fournie par le moteur.

- Entre 0 et ~4s : les deux courbes augmentent de manière similaire.
- Vers 4s : légère chute de puissance du moteur, alors que la puissance de conduite reste stable, signe d'un ajustement du système.

- De 8s à 12s : la puissance de conduite est maintenue au maximum tandis que celle du moteur diminue progressivement → peut refléter un **soutien de la batterie** ou une **limitation du moteur**.
- Après 12s : la demande de puissance chute brutalement et le moteur continue à fournir de la puissance de manière décroissante.

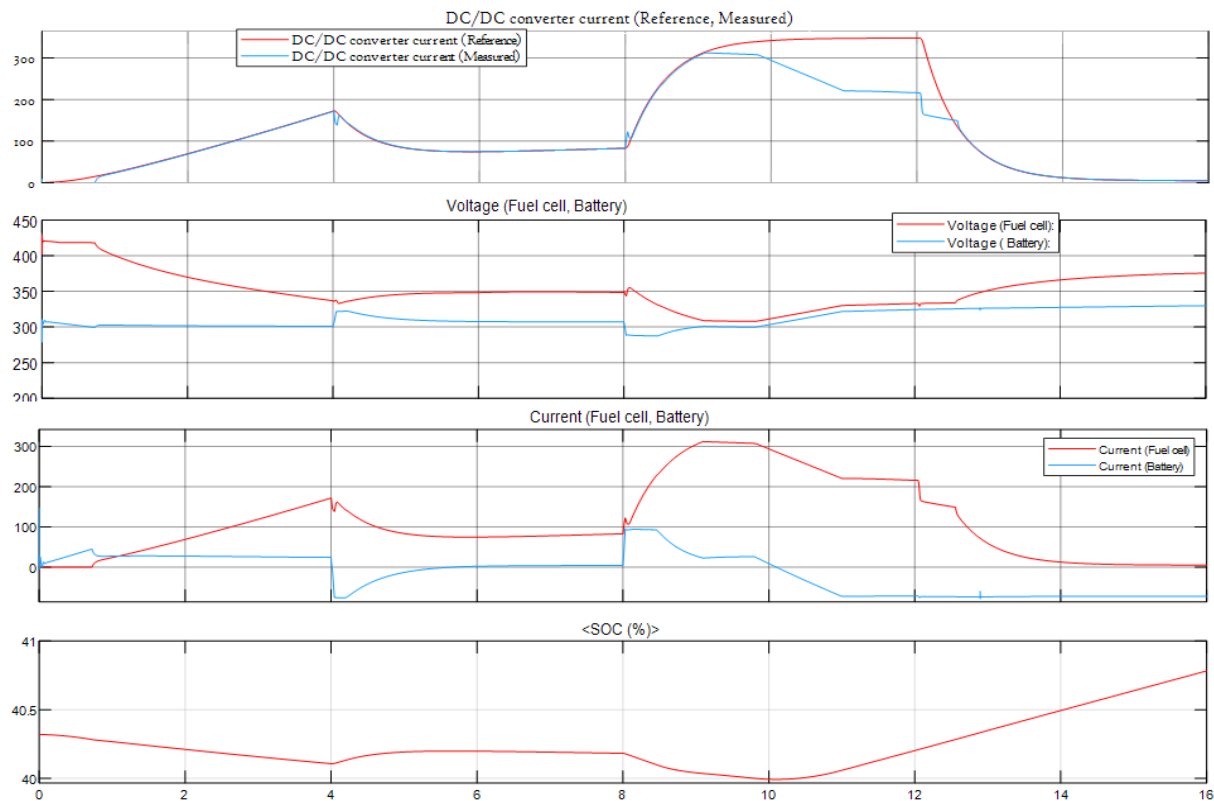
**La seconde figure** montre la puissance de la pile à combustible, où l'on distingue un écart significatif entre la puissance de référence et celle réellement mesurée, particulièrement lors des changements rapides. Cette inertie est typique des piles à combustible, qui réagissent lentement aux variations brusques pour des raisons de stabilité électrochimique.

- Montée progressive jusqu'à ~4s, suivie d'une chute.
- Entre 4s et 8s : puissance mesurée bien inférieure à la référence → la pile limite probablement sa réponse pour des raisons de stabilité ou d'efficacité.
- À partir de 8s : la puissance de référence est élevée, et la pile suit mieux, mais reste en dessous → **inertie de réponse de la pile à combustible**.
- Après 12s : la référence tombe à zéro, et la puissance réelle chute aussi progressivement.

**Enfin, la troisième figure** montre la puissance échangée par la batterie (positive = décharge, négative = recharge).

- Début de la simulation : la batterie compense largement la demande → forte décharge.
- Entre 4s et 8s : recharge progressive → probablement pendant une phase où la demande moteur est faible et la pile reste active.
- De 8s à 12s : nouvelle décharge pour soutenir le moteur lors d'une forte demande.
- Après 12s : recharge lorsque la demande chute.

La figure **IV.15** illustre les principaux paramètres électriques du système hybride composé d'une pile à combustible PEM et d'une batterie, contrôlé par un convertisseur DC/DC dans un véhicule électrique (VE).

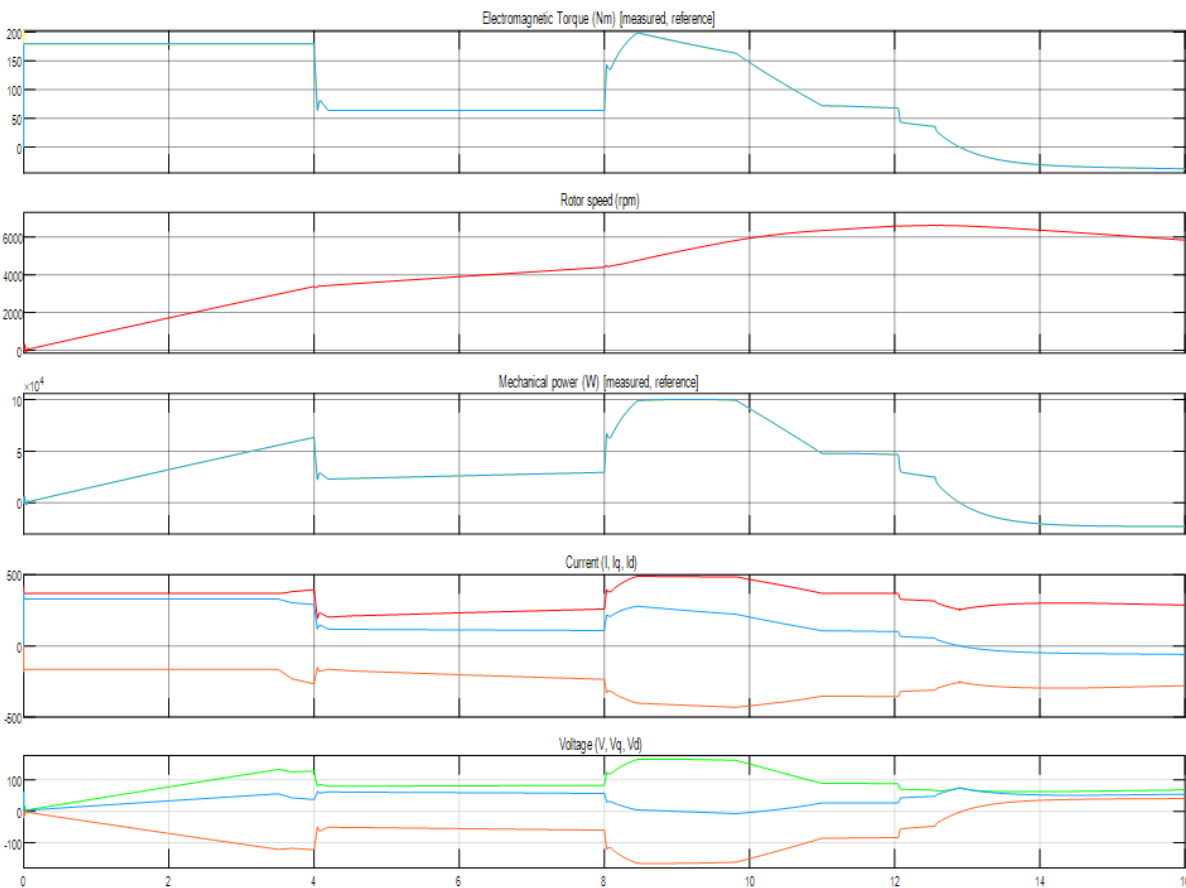


**Figure IV.15** Comportement dynamique du courant, de la tension et de l'état de charge dans un véhicule électrique hybride PEM-batterie

- Le premier graphique compare le courant de référence du convertisseur DC/DC (courbe rouge) au courant mesuré (courbe bleue). L'excellente concordance entre ces deux courbes démontre la précision et la robustesse du contrôle appliqué au convertisseur. Cette capacité à suivre fidèlement la consigne de courant est cruciale pour assurer une conversion d'énergie efficace et stable.
- Le second graphique montre l'évolution des tensions de la pile à combustible et de la batterie. La tension de la pile à combustible diminue légèrement sous l'effet de l'augmentation de la demande en courant, puis se stabilise autour de 350 V. La tension de la batterie, quant à elle, reste relativement constante autour de 310 V, indiquant son rôle de tampon énergétique pour compenser les variations rapides de charge.
- Le troisième graphique met en évidence les courants fournis par la pile à combustible et la batterie. La pile à combustible délivre la majorité du courant, qui atteint un pic de l'ordre

de 300 A avant de décroître progressivement. La batterie intervient en complément en fournissant ou en absorbant du courant selon les besoins dynamiques du système, comme l'indiquent les fluctuations observées. Cette interaction dynamique optimise la gestion énergétique en permettant à la pile à combustible de fonctionner dans des conditions plus stables, tout en assurant la réactivité nécessaire aux variations de charge.

- Enfin, le quatrième graphique présente l'évolution de l'état de charge (SOC) de la batterie, qui reste dans une plage étroite autour de 40%. Cette stabilité témoigne d'une utilisation équilibrée de la batterie, évitant des cycles de décharge ou charge profonds qui pourraient nuire à sa durée de vie. Dans la Figure (IV.16) les courbes présentées illustrent les performances du moteur synchrone à aimant permanent.

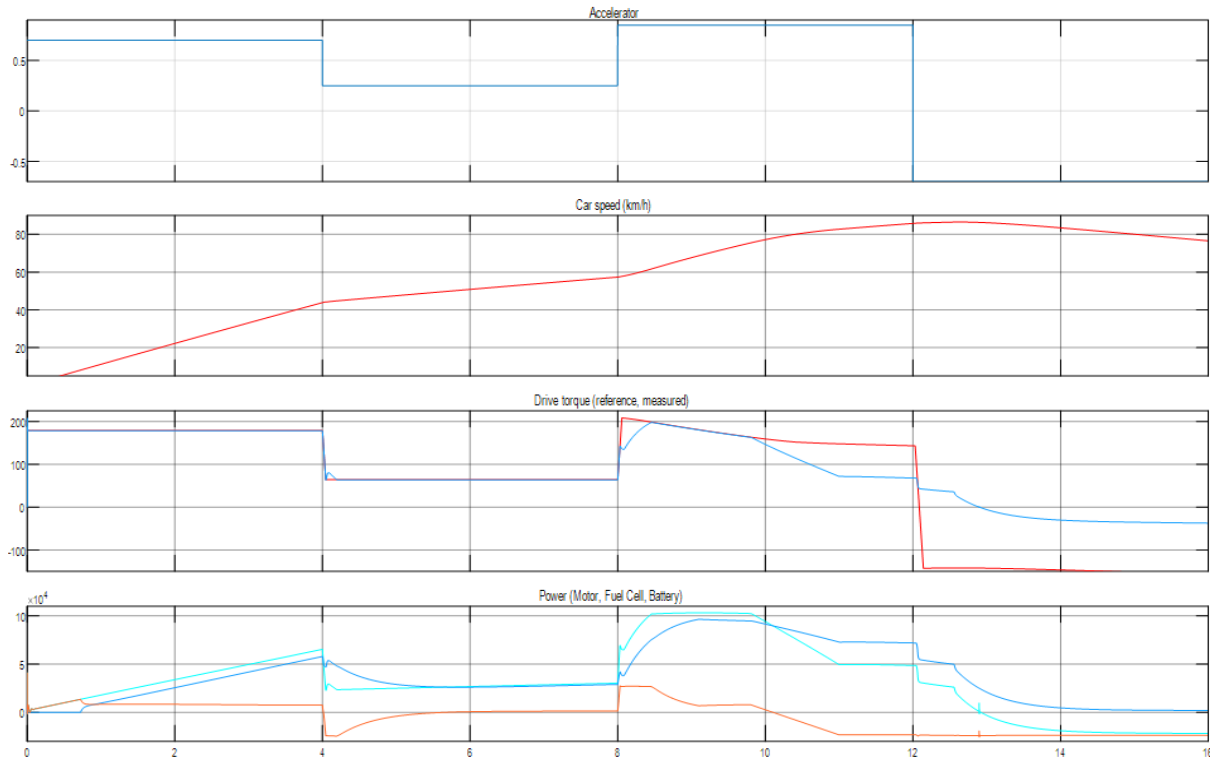


**Figure IV.16.** Analyse temporelle des grandeurs électriques et mécaniques dans une PMSM pilotée par commande vectorielle

La figure présente les réponses dynamiques clés de la machine synchrone à aimants permanents (PMSM) pilotée par une commande vectorielle avancée, illustrant l'évolution temporelle du couple électromagnétique, de la vitesse du rotor, de la puissance mécanique, des courants dans les axes d et q, ainsi que des tensions correspondantes. Le couple électromagnétique mesuré suit fidèlement la référence tout au long de la simulation, témoignant de la précision et de la robustesse du système de contrôle. Cette performance est essentielle pour garantir une réponse dynamique rapide et stable aux variations de charge.

La vitesse du rotor augmente progressivement jusqu'à atteindre environ 6000 tours par minute, correspondant à la montée en charge et en couple. Cette évolution montre la capacité du moteur à atteindre rapidement sa vitesse nominale, suivie d'une légère décroissance liée à la réduction de la charge. La puissance mécanique suit une tendance similaire au couple, avec une augmentation jusqu'à un pic significatif avant de diminuer, indiquant une conversion efficace de l'énergie électrique en travail mécanique utile.

L'analyse des courants dans les axes d ( $i_d$ ) et q ( $i_q$ ) révèle une séparation claire de leurs rôles : le courant  $i_q$ , principal générateur de couple, est régulé pour suivre la consigne, tandis que le courant  $i_d$  est contrôlé pour optimiser le flux magnétique, assurant un fonctionnement optimal du moteur. Les tensions appliquées aux axes d et q montrent des transitions nettes et coordonnées avec les changements de consignes, démontrant une modulation efficace qui soutient la stabilité et la performance du système.



**Figure IV.17 :** Évolution temporelle du signal d'accélérateur, vitesse du véhicule, couple moteur et puissance dans un VE hybride

La figure.IV.17. illustre les réponses temporelles clés du système de propulsion du véhicule électrique hybride, comprenant le signal d'accélérateur, la vitesse du véhicule, le couple moteur et la puissance fournie par le moteur, la pile à combustible et la batterie. Le signal d'accélérateur varie en plusieurs étapes, alternant entre accélération et décélération, simulant ainsi différents profils de conduite. En réponse, la vitesse du véhicule augmente progressivement pour atteindre environ 85 km/h, avant de décroître légèrement, ce qui traduit une phase de ralentissement contrôlé. Le couple moteur, représenté par la courbe de référence et la courbe mesurée, suit globalement la même évolution, témoignant de la précision et de la robustesse du système de contrôle. Toutefois, un léger décalage est observé lors des phases de décélération, où le couple mesuré diminue plus rapidement que la référence, suggérant des dynamiques propres au système qui pourraient être optimisées. Concernant la puissance, la pile à combustible assure la majorité de la puissance nécessaire au moteur, avec une montée progressive jusqu'à un pic d'environ 50 kW.

La batterie joue un rôle de soutien en fournissant ou en absorbant de l'énergie selon les besoins dynamiques, notamment en atténuant les variations brusques de charge.

#### **IV.8. Conclusion**

Ces résultats confirment l'efficacité du système hybride et de son contrôle dans la gestion dynamique de la propulsion du véhicule. La coordination entre la pile à combustible et la batterie permet une alimentation stable et réactive, essentielle pour la performance et la durabilité du véhicule électrique. Ces qualités rendent cette approche particulièrement adaptée aux applications exigeantes telles que les véhicules électriques, ces résultats confirment l'efficacité du système de contrôle vectoriel avec régulateur PID appliqué au VE alimenté par pile à combustible PEM. La coordination précise entre le convertisseur DC/DC, la pile à combustible et la batterie permet d'assurer une alimentation électrique stable, dynamique et durable, répondant aux exigences de performance du véhicule. Des améliorations futures pourraient viser à optimiser la gestion énergétique pour minimiser davantage les pertes et prolonger la durée de vie des composa

## **Conclusion Générale**

## **Conclusion Générale**

L'objectif principal de ce projet était d'analyser les performances dynamiques et énergétiques du système, tout en mettant en œuvre des stratégies de commande avancées pour assurer une gestion optimale de l'énergie entre les différents composants. La plateforme de simulation MATLAB/Simulink a permis de développer des modèles détaillés et précis, représentant les différents sous-systèmes (pile à combustible, batterie, convertisseurs DC/DC, moteur PMSM), ainsi que les algorithmes de commande.

Les résultats de simulation obtenus ont mis en évidence plusieurs points clés :

- La commande vectorielle associée à un régulateur PI appliqué au moteur PMSM a permis d'obtenir un bon suivi de couple et de vitesse, avec une réponse rapide et stable, confirmant ainsi l'efficacité du contrôle en boucle fermée dans les phases de variation de charge.
- Le système de conversion d'énergie, notamment le convertisseur Buck-Boost bidirectionnel commandé en mode tension via un régulateur PI puis un réseau de neurones NARXNN, a montré des performances remarquables en termes de stabilité de la tension de sortie et de robustesse face aux variations rapides de charge.
- Le modèle NARXNN, entraîné sur des données issues de la commande PI classique, a offert une prédiction plus rapide et plus précise du signal de commande, réduisant l'erreur quadratique moyenne et améliorant le comportement dynamique global du convertisseur. L'utilisation de réseaux de neurones a permis de dépasser les limites des régulateurs linéaires classiques en s'adaptant aux non-linéarités du système.
- Du point de vue énergétique, la simulation du système hybride a montré une gestion intelligente de l'énergie entre la pile à combustible et la batterie. La pile a fourni la majorité de l'énergie pendant les phases de demande constante, tandis que la batterie est intervenue de manière réactive pour soutenir les pics de puissance ou absorber l'excès d'énergie.
- L'état de charge (SOC) de la batterie a été maintenu dans une plage optimale, évitant les cycles profonds de charge et décharge, ce qui prolonge la durée de vie du système de stockage.

- La coordination dynamique entre les composants a permis d'assurer une alimentation stable du moteur, limitant les pertes énergétiques et augmentant l'efficacité globale du système.
- L'analyse des courants et tensions a révélé une forte concordance entre les valeurs de consigne et les mesures, traduisant une précision dans la régulation et une réponse rapide du système aux sollicitations extérieures.
- Les courbes de puissance ont également mis en évidence le rôle clé de l'inertie électrochimique de la pile à combustible, nécessitant une complémentarité efficace avec la batterie pour répondre aux variations rapides de la demande énergétique.

Ces résultats valident la faisabilité et la pertinence de l'approche hybride à hydrogène dans les véhicules électriques, en particulier grâce à une commande bien dimensionnée et à une répartition énergétique intelligente. Le système étudié présente une architecture robuste et flexible, capable de répondre à des profils de conduite variés tout en maintenant des performances élevées en termes de couple, vitesse et stabilité énergétique.

Cependant, malgré ces résultats encourageants, plusieurs limites et axes d'amélioration ont été identifiés, ouvrant la voie à des perspectives de recherche futures :

- Optimisation énergétique avancée : Le système de gestion d'énergie pourrait être amélioré par des algorithmes d'optimisation multi-objectifs, intégrant à la fois la minimisation de la consommation d'hydrogène, la préservation de la batterie et l'optimisation du rendement moteur.
- Intelligence artificielle et apprentissage profond : L'utilisation de réseaux de neurones plus profonds ou de techniques d'apprentissage par renforcement pourrait offrir une meilleure adaptabilité aux conditions de conduite réelles. L'intégration de systèmes intelligents adaptatifs (type RNN, LSTM ou DDPG) serait pertinente pour améliorer la gestion dynamique.
- Simulation en conditions réelles : Les simulations ont été effectuées dans un environnement numérique contrôlé. Une prochaine étape consisterait à valider les résultats en temps réel sur un banc d'essai matériel (Hardware-In-the-Loop) ou en testant un prototype embarqué.
- Gestion thermique : La pile à combustible et la batterie génèrent de la chaleur. Une extension de ce travail devrait inclure une modélisation thermique complète pour prévenir les surchauffes et optimiser le rendement global.

- Vieillessement des composants : Intégrer les effets de vieillissement des composants, notamment de la batterie et de la pile, permettrait de prédire plus précisément les performances du système sur le long terme.
- Connexion au réseau intelligent (Smart Grid) : Dans une vision plus large, le véhicule à hydrogène pourrait devenir un acteur du réseau électrique intelligent (V2G – Vehicle to Grid), en réinjectant de l'énergie dans le réseau ou en participant à la régulation de la charge.

En conclusion, cette étude a démontré l'intérêt technologique et la faisabilité de la propulsion électrique à hydrogène assistée par batterie. Les stratégies de commande proposées ont permis d'obtenir des performances dynamiques et énergétiques très satisfaisantes. Les résultats obtenus confirment que l'intégration intelligente de sources d'énergie et de systèmes de commande avancés peut contribuer au développement de véhicules propres, efficaces et durables. Ce travail constitue une base solide pour des recherches futures orientées vers des systèmes embarqués intelligents, plus autonomes et plus performants, au service de la transition énergétique dans le secteur du transport.

### Référence Bibliographiques

- [1] VehiCROSS. *Electric Vehicles: A Complete Guide to Modern Electric Vehicles*. Vehicle Technology Press, 2007.
- [2] Feldman, C. *Fuel Cells and Hydrogen: Clean Power, Energy Storage, and Environmental Impact*. Clean Energy Publishing, 2020.
- [3] U.S. Department of Energy. *Electric Vehicle Technology Overview*. U.S. Government Printing Office, 2021.
- [4] Bicer, Y., Dincer, I., and Rosen, M. A. "A Critical Review of Hydrogen Production and Storage Systems with a Focus on Renewable Hydrogen Technologies." *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 57, 2016, pp. 1-19.
- [5] Hawkins, T. R., Gausen, O. M., and Strømman, A. H. "Comparative Environmental Life Cycle Assessment of Conventional and Electric Vehicles." *Journal of Industrial Ecology*, vol. 17, no. 1, 2013, pp. 53-64.
- [6] Nykvist, B., and Nilsson, M. "Rapidly Falling Costs of Battery Packs for Electric Vehicles." *Nature Climate Change*, vol. 5, no. 4, 2015, pp. 329-332.
- [7] Ong, S. L., and Schaefer, D. "Hydrogen Fuel Cell Vehicles: The Future of Transportation." *Energy Science & Engineering*, vol. 2, no. 3, 2014, pp. 98-104.
- [8] Toyota. *The Toyota Mirai: Hydrogen Fuel Cell Vehicle*. Toyota Motor Corporation, 2016.
- [9] Lin, B., and Liu, J. "Performance Optimization of Lithium-Ion Batteries for Electric Vehicles: A Review." *Journal of Power Sources*, vol. 342, 2017, pp. 602-617
- [10] Ogden, J. M., and T. G. Kreutz. *The Hydrogen Economy: Opportunities and Challenges*. Springer, 2015.
- [11] Singh, M., and R. K. Yadav. "Overview of Fuel Cells and Their Types." *Energy & Environment*, vol. 23, no. 5, 2012, pp. 759-772.
- [12] Luo, Y., and Y. Wang. "A Review of Hydrogen Production from Renewable Energy Sources." *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 39, no. 30, 2014, pp. 17662-17670.
- [13] Winter, C., and R. Niven. *Fuel Cell Technology Handbook*. CRC Press, 2009.
- [14] Liu, H., and X. Wang. "Membrane Electrode Assembly (MEA) in PEM Fuel Cells: Fundamentals and Recent Developments." *Journal of Power Sources*, vol. 196, no. 23, 2011, pp. 10102-10110.
- [15] Zhang, J., and Z. Liu. *Fuel Cell Systems Explained*. Wiley, 2012.
- [16] Ellis, R., and A. Frazier. "Fuel Cell Performance and Hydrogen Storage." *Journal of Applied Energy*, vol. 90, no. 1, 2012, pp. 105-112.
- [17] Dincer, I., and C. Acar. "Review of Hydrogen Production Technologies." *International Journal of Energy Research*, vol. 34, no. 3, 2010, pp. 271-282.
- [18] Barbir, F. *PEM Fuel Cells: Theory and Practice*. Academic Press, 2005.
- [19] Chien, J. T., and S. T. Lu. "Alkaline Fuel Cells and Their Applications." *Fuel Cells*, vol. 14, no. 3, 2014, pp. 342-354.
- [20] Khalaf, A. S. *Design and Control of DC/DC Converters for Electric Vehicle Applications*. PhD Thesis, University of Texas, 2015.
- [21] Venkataramanan, G., and K. M. Smedley. "DC-DC Converters for Energy Storage Systems." *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 29, no. 10, 2014, pp. 5400-5408.

- [22]Balamurugan, R., and P. V. R. M. S. S. R. K. R. "Buck, Boost, and Buck-Boost Converters for Renewable Energy Systems." *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 51, 2015, pp. 651-663.
- [23]Zhou, J., and F. Blaabjerg. "Modeling and Control of Power Converters in Hybrid Electric Vehicles." *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 59, no. 11, 2012, pp. 4478-4486.
- [24]Gupta, R., and A. Jain. "Battery Modeling and Control for Hybrid Electric Vehicles." *Energy Conversion and Management*, vol. 52, no. 8-9, 2011, pp. 2495-2505.
- [25]Guerreiro, P. J., et al. "Multilevel Inverter for Photovoltaic Applications: A Comparative Study." *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 60, no. 2, 2013, pp. 503-514.
- [26]Mousavi, M. M., and S. M. Islam. "Modeling and Control of Permanent Magnet Synchronous Machines for Electric Vehicle Applications." *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 62, no. 8, 2015, pp. 5094-5102.
- [27]Dimitrova, M., and T. P. Nguyen. "Modelling and Control of Electric Vehicle Motor." *International Journal of Electrical Engineering Education*, vol. 52, no. 1, 2015, pp. 71-84.
- [28]Niazi, S., and H. Patel. *Hybrid Electric Vehicle Modeling and Control: A Systems Approach*. Springer, 2017.
- [29]Wang, L., et al. "Modeling of a Lithium-Ion Battery for Electric Vehicle Applications." *Journal of Power Sources*, vol. 195, no. 4, 2010, pp. 1200-1207.
- [30] Tafreshi, M., and M. Zadeh. "Application of PI Controller for DC-DC Converter in Power Electronics." *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 61, no. 6, 2014, pp. 3155-3161.
- [31]Wang, Z., and Q. Liu. "Modeling and Simulation of a DC-DC Converter Using PI Controller." *Journal of Power Electronics*, vol. 8, no. 3, 2015, pp. 457-463.
- [32]Mariano, M. S., and A. P. Oliveira. "Application of NARX Neural Networks for Control of Power Converters." *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, vol. 24, no. 7, 2013, pp. 1143-1152.
- [33]Chin, T. K., and T. H. Lee. "Model Predictive Control for DC-DC Converters in Electric Vehicle Applications." *Control Engineering Practice*, vol. 50, 2016, pp. 1-12.
- [34]Zhao, X., and Y. Zhang. "Vector Control for Electric Motor Drives in Hybrid Electric Vehicles." *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 62, no. 2, 2015, pp. 1224-1231.
- [35]Gonzalez, G., and X. Zeng. "Direct Vector Control of Permanent Magnet Synchronous Motors: A Review." *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 62, no. 3, 2015, pp. 1910-1920.
- [36]Jung, Y., and K. Lee. "Design and Implementation of a Direct Vector Control for Electric Vehicle Motors." *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 29, no. 5, 2014, pp. 2533-2543.
- [37] J. Larminie, J. Lowry, *Electric Vehicle Technology Explained*, Wiley, 2012.
- [38] M. Ehsani, Y. Gao, S. Gay, A. Emadi, *Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles*, CRC Press, 2004.
- [39] W. Cai, G. Chen, *Power Electronics for Electric Vehicles and Energy Storage Systems*, Springer, 2021.

[40] R. Krishnan, *Electric Motor Drives: Modeling, Analysis, and Control*, Prentice Hall, 2001

- [41] J. G. Kassakian, M. F. Schlecht, G. C. Verghese, *Principles of Power Electronics*, Addison-Wesley, 1991.
- [42] N. Mohan, T. M. Undeland, W. P. Robbins, *Power Electronics: Converters, Applications, and Design*, Wiley, 2003.
- [43] C. C. Chan, K. T. Chau, *Modern Electric Vehicle Technology*, Oxford University Press, 2001.
- [44] S. S. Williamson, A. K. Khaligh, *Power Electronics Handbook*, Elsevier, 2007.
- [45] M. H. Rashid, *Power Electronics: Circuits, Devices, and Applications*, Prentice Hall, 2013.
- [46] P. T. Krein, *Elements of Power Electronics*, Oxford University Press, 1998.
- [47] E. Monmasson, L. Idkhajine, *Intelligent Control of Electrical Drives*, Wiley-ISTE, 2012.
- [48] B. K. Bose, *Modern Power Electronics and AC Drives*, Prentice Hall, 2001.
- [49] L. Solero, A. Lidozzi, *Power Converters for Electric Vehicles*, Springer, 2016.
- [50] Y. Cheng, C. Qiao, *Modeling and Control of Power Electronics Converters for Electric Vehicle Applications*, Wiley-IEEE Press, 2020.
- [51] K. T. Chau, *Electric Vehicle Machines and Drives: Design, Analysis and Application*, Wiley, 2015.
- [52] L. Zhang, C. Mi, *Vehicle Power Management: Modeling, Control and Optimization*, Springer, 2011.
- [53] Z. Zhang, *Energy Storage for Sustainable Microgrid*, Elsevier, 2015.
- [54] J. Dixon, B. Ortúzar, *Ultracapacitor-Based Auxiliary Energy System for Electric Vehicles*, IEEE Transactions, 2002.
- [55] H. Vahedi, M. Saad, *Modeling and Simulation of Hybrid Electric Vehicles*, Springer, 2017.
- [56] M. T. Hagh, M. R. Zolghadri, *Electric Vehicle Control Systems: Modeling and Simulation*, Elsevier, 2018.
- [57] M. A. Hannan, M. M. Hoque, A. Mohamed, A. Ayob, *Review of Energy Storage Systems for Electric Vehicle Applications: Issues and Challenges*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017.

- [58] Chan, C.C. *L'état de l'art des véhicules électriques, hybrides et à pile à combustible*. Proceedings of the IEEE, vol. 95, no. 4, 2007.
- [59] Emadi, A., Lee, Y.J., Rajashekara, K. *Électronique de puissance et systèmes de gestion d'énergie dans les véhicules électriques*. IEEE Transactions, 2008.
- [60] Rashid, M.H. *Électronique de puissance – Circuits, dispositifs et applications*. Pearson Éducation, 2013.
- [61] Erickson, R.W., Maksimovic, D. *Fondamentaux de l'électronique de puissance*. Springer, 2001.
- [62] Mohan, N. *Électronique de puissance – Convertisseurs, applications et conception*. Wiley, 2002.
- [63] Zhang, C., Mi, C., Cao, M. *Convertisseurs bidirectionnels DC-DC pour les systèmes d'énergie renouvelable*. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2010.
- [64] Khaligh, A., Li, Z. *Stockage d'énergie hybride pour véhicules électriques et hybrides : batteries, supercondensateurs, piles à combustible*. IEEE Vehicular Technology, 2010.
- [65] Teymour, B., et al. *Conception de convertisseurs DC-DC bidirectionnels pour applications de véhicules électriques*. Journal of Power Sources, 2013.
- [66] ESRAM, T., Chapman, P.L. *Topologies de conversion DC/DC pour applications photovoltaïques et véhicules*. IEEE Transactions, 2007.
- [67] Tremblay, O., Dessaint, L.A. *Validation expérimentale d'un modèle dynamique de batterie pour applications VE*. World Electric Vehicle Journal, vol. 3, 2009.
- [68] Bose, B.K. *Électronique de puissance moderne et entraînements à courant alternatif*. Prentice Hall, 2002.
- [69] Boldea, I., Nasar, S.A. *Machines synchrones à aimants permanents : principes et modélisation*. CRC Press, 2005.
- [70] Krause, P.C., Wasynczuk, O., Sudhoff, S.D. *Analyse des machines électriques et des systèmes d'entraînement*. IEEE Press, 2013.
- [71] Mi, C., Masrur, M.A., Gao, D.W. *Véhicules hybrides électriques – Principes et applications pratiques*. Wiley, 2011

Tableau 01 : paramètre de la Machine

Symbole de paramètre	Valeur (dimension)
Puissance nominale	6 kW
Tension nominale	200 V
Note actuelle	30 A
Vitesse nominale	5000 RPM
Phases	3
Couple nominal	40 N-m
inductance des axes d et q $L_d, L_q$	0.174mH, 0.29268mH
Résistance du stator, R	0.0083 $\Omega$
Flux magnétique, $\psi f$	0.071115V-s
Nombre de pôles, p	4
Moment d'inertie, J	$5.5e^{-3}$ kg-m <sup>2</sup>
Fréquence de commutation, f <sub>SW</sub>	20 kHz
Tension triangulaire de référence, V <sub>tri</sub>	5 V
Tension de la batterie, V <sub>dc</sub>	200 V

Tableau 02 : paramètre de la pile à combustible

Symbole de paramètre	Valeur (dimension)
Puissance de la pile nominale	85500 w
Puissance de la pile maximale	1000022,4 w
Résistances des piles à combustible	0,17572 ohms
Tension initiale d'une cellule [en]	1,1729 v
Utilisation nominale hydrogène	95,24%
Utilisation nominale oxydant	50,03%
Courant d'échange [i <sub>0</sub> ]	0,24152 A
Coefficient d'échange [alpha]	1,1912
Composition du carburant [ $x.H_2$ ]	99,95%
Composition oxydante [ $x.O_2$ ]	21%
Débit de carburant à utilisation nominale d'hydrogène	374,8 imp.
Débit de carburant à utilisation maximale d'hydrogène	456,7 imp.
Débit d'air à utilisation nominale d'oxydant	1698 imp.
Débit d'air à utilisation maximale d'oxydant	2069 imp.
Température du système [T]	368 Kelvins
Pression d'alimentation en carburant [p carburant]	3 bars

Pression d'alimentation en air [p air]	3 bars
--	--------

Tableau 03 : Les paramètres de la batterie

Symbole de paramètre	Valeur (dimension)
Tension nominale	288 v
Capacité nominale	13,9 (Ah)
Etat de charge initial	40,32%
Temps de réponse de la batterie	30 s

Tableau 04 : VE Paramètres dynamiques

Symbole de paramètre	Valeur (dimension)
Masse du véhicule m	1625 kg
Accélération de la gravité g	9,81 m.s <sup>2</sup>
Zone area, A	2,711 m <sup>2</sup>
Coefficient de résistance au roulement, $\mu r$	0,26
Le rayon de la roue r	0.29 m
Coefficient aérodynamique, $C_d$	0,2
Densité de l'air $\rho$	1,18 kg/m <sup>3</sup>
Rapport de démultiplication G	0,95
L'efficacité des engins , Tapez une équation ici.	0,9
Angle de nivellement, $\alpha$	0

