

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

جامعة الدكتور الطاهر مولاي سعيدة

UNIVERSITE Dr. TAHAR MOULAY – SAIDA

FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT D'ELECTRONIQUE



MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

Pour l'obtention du diplôme de

Master en Electronique

Option : Electronique Instrumentation

THEME

**Conception et optimisation d'une Cyber Car autonome alimentée
par énergie solaire et turbine avec système de freinage intégré**

Présenté par

Sebbagh Imene

Soutenu publiquement, le 11 /06/2025 devant le jury composé de :

Dr Berber Redouane	Président	Pr	Université Dr. Tahar Moulay de Saïda
Dr Bouarfa Abdelkader	Examineur	Dr	Université Dr. Tahar Moulay de Saïda
Pr. Driss Khodja Fatima Z	Encadreur	Pr	Université Dr. Tahar Moulay de Saïda
Dr. Yahi Youcef	Co-encadreur	Dr	Université Dr. Tahar Moulay de Saïda

Année Universitaire 2024- 2025

Remerciements

Avant tout, nous remercions le bon Dieu de nous avoir aidé à réaliser ce présent travail.

*Ce travail a été effectué sous la direction de Madame **Driss Khodja Fatima Zohra**, Professeur à l'Université de Saïda. Nous tenons à la remercier pour la confiance qu'elle nous a témoignée, pour la disponibilité dont elle a fait preuve tout le long de ce travail et ses conseils judicieux nous furent d'une très grande utilité.*

*En toute complémentarité, Monsieur **Yahi Youcef**, Doctorant à l'Université de Saïda, a co-dirigé ce travail. Il a suivi ce travail avec beaucoup d'intérêt.*

*Nous sommes reconnaissantes à Monsieur **R. Berber**, Maître de Conférences à l'Université de Saïda, pour l'attention qu'il a portée à ce travail et nous le remercions d'avoir accepté de présider le Jury.*

*Nous tenons à manifester notre gratitude à Monsieur **A. Bourfa**, Maître de Conférences à l'Université de Saïda, pour l'intérêt qu'il a bien voulu porter à ce travail et nous le remercions d'avoir accepté de faire partie du Jury.*

Enfin, nous adressons nos vifs remerciements à tous les enseignants de la faculté de Technologie qui ont contribué à notre formation.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

A Mon défunt père et à ma mère : Grâce à leurs tendres encouragements et leurs grands sacrifices, ils ont pu créer le climat affectueux et propice à la poursuite de mes études. Aucune dédicace ne pourrait exprimer mes respects, ma considération, reconnaissance et

*M*es profonds sentiments envers eux,

A mes sœurs et mes frères

Qu'ils trouvent ici l'expression de mes sentiments de respect et de reconnaissance pour le soutien qu'ils n'ont cessé de me porter.

A tous mes amis et mes collègues qu'ils trouvent ici le témoignage d'une fidélité et d'une amitié infinie.

A tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin durant mes études.

Sebbagh Imene

Résumé

Ce mémoire présente la conception et la simulation d'un système énergétique embarqué innovant pour véhicule électrique, basé sur l'intégration de trois sources d'énergie renouvelable : l'énergie solaire via des panneaux photovoltaïques, l'énergie éolienne à travers des turbines aérodynamiques intégrées, et l'énergie cinétique récupérée par un système de freinage régénératif.

L'objectif est de maximiser l'autonomie du véhicule tout en réduisant son empreinte carbone. L'architecture du système inclut un calculateur central intelligent chargé de gérer la distribution de l'énergie et de surveiller l'état des batteries. Des convertisseurs DC/DC, DC/AC, et des algorithmes MPPT assurent l'optimisation du rendement énergétique.

Le système a été modélisé et simulé sous MATLAB/Simulink, démontrant sa performance en conditions dynamiques. Les résultats obtenus confirment l'efficacité du système Electro-hybride proposé et ouvrent la voie à des véhicules plus durables, autonomes et respectueux de l'environnement.

Mots-clés : Énergies renouvelables, véhicule électrique, panneaux photovoltaïques, turbines éoliennes, freinage régénératif, gestion énergétique, MATLAB/Simuli

Summary

This thesis presents the design and simulation of an innovative onboard energy system for electric vehicles, based on the integration of three renewable energy sources: solar energy via photovoltaic panels, wind energy through integrated aerodynamic turbines, and kinetic energy recovered through a regenerative braking system.

The objective is to maximize the vehicle's range while reducing its carbon footprint. The system architecture includes an intelligent central controller responsible for managing energy distribution and monitoring battery status. DC/DC and DC/AC converters, along with MPPT algorithms, ensure optimal energy efficiency.

The system was modeled and simulated using MATLAB/Simulink, demonstrating its performance under dynamic conditions. The results confirm the effectiveness of the proposed hybrid system and pave the way for more sustainable, autonomous, and environmentally friendly vehicles.

Keywords: Renewable energy, electric vehicle, photovoltaic panels, wind turbines, regenerative braking, energy management, MATLAB/Simulink.

ملخص

يعرض هذا البحث تصميم ومحاكاة نظام طاقة مبتكر مدمج في مركبة كهربائية، يعتمد على دمج ثلاث مصادر للطاقة المتجددة: الطاقة الشمسية عبر الألواح الكهروضوئية، الطاقة الريحية عبر توربينات هوائية مدمجة، والطاقة الحركية المسترجعة بواسطة نظام كبح تجديدي. يهدف النظام إلى زيادة استقلالية المركبة وتقليل بصمتها الكربونية.

يتضمن النظام وحدة تحكم مركزية ذكية تقوم بإدارة توزيع الطاقة ومراقبة حالة البطاريات، مع استخدام محولات تيار مستمر/تيار مستمر، وتيار مستمر/تيار متناوب، بالإضافة إلى خوارزميات MPPT لتحقيق أقصى كفاءة للطاقة.

تم نمذجة النظام ومحاكاته باستخدام برنامج MATLAB/Simulink، حيث أظهرت النتائج فعالية النظام الهجين المقترح وأكدت قدرته على تقديم أداء موثوق في الظروف الديناميكية. ويمثل هذا النظام خطوة مهمة نحو مركبات كهربائية أكثر استدامة واستقلالية وصديقة للبيئة.

الكلمات المفتاحية: الطاقات المتجددة، المركبة الكهربائية، الألواح الشمسية، التوربينات الهوائية، الكبح التجديدي، إدارة الطاقة، MATLAB/Simulink.

Table des matières

Table des matières

Résumé	i
Table des matières	ii
Liste des figures	v
Liste des tableaux	vii
Liste des abréviations	viii
Introduction générale	01

Chapitre I : Fondements théoriques

I.1 Introduction	03
I.2 Chronologie du véhicule électrique avec quelques modèles	04
I.3 Sources d'énergie renouvelable	06
I.3.1 Les panneaux solaire	06
I.3.2 Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque	06
I.3.3 Applications des panneaux photovoltaïque	07
I.3.4 Turbine d'air (éolienne)	08
I.4 Freinage régénératif	11
I.5 Systèmes embarqués dans les véhicules	12
I.6 Impact environnemental	19
I.7 Conclusion	23

Chapitre II : Conception de la cyber car

II.1 Introduction	24
II.2 Véhicules électriques	24
II.2.1 Électronique portable	24
II.2.2 Systèmes de stockage d'énergie	24
II.2.3 Autres applications	25
II.3 Principe de la Cyber-Car	25
II.4 Technique d'énergie	26
II.5 Système calculateur	27
II.6 Système énergie - batterie	27
II.7 Architecture complète du système énergétique pour véhicule	28
II.8 Système de communication	30
II.9 Développement de l'architecture du système	32
II.10 Modélisation du système de gestion de Batteries ‘‘BMS’’	34
II.11 Modélisation et développement des systèmes de contrôle de batteries à combustible	35
II.12 Types de batteries pour véhicules électriques et leurs applications	37
II.13 Conclusion	39

Chapitre III : Simulation et interprétation des résultats

III.1 Introduction	40
--------------------	----

III.2 Alimentation de la MRV	41
III.3 L'effet de la résistivité	46
III.4 Générateur éolien	46
III.4.1 L'avantage de générateur éolien	47
III.4.2 Types d'aérogénérateur dans les systèmes éoliens	47
III.4.3 Système de Récupération d'Énergie Cinétique (KERS)	49
III.4.4. Résultats du système de freinage énergétique	50
III.4.5 Comparaison des stratégies d'utilisation du système électrique	51
III.5 Système d'énergie PV	53
III.5.1 Ferme photovoltaïque et son modèle de simulation	53
III.5.2 Résultats de l'énergie récupérée	54
III.6 Système éolien	56
III.7 Système global	59
III.7.1 Modélisation complète d'un véhicule électrique	61
III.7.2 Analyse de la puissance et de l'énergie	61
III.7.3 Modèle de véhicule	63
III.7.4 Système automatique de gestion basé sur Arduino	63
III.7.5 Système de gestion énergétique	64
III.8 Conclusion	65
Conclusion générale	66
Bibliographie	68

Liste des figures

Liste des figures

I.1	Modèle d'une voiture électrique électro_hybride	06
I.2	Schéma de principe de fonctionnement d'un panneau photovoltaïque	07
I.3	Convention de l'énergie cinétique du vent	09
I.4	Convension de l'énergie cinétique du vent	09
I.5	Freinage régénératif	11
I.6	Schéma du système régénératif de l'Audi e-tron	12
I.7	La carte Arduino UNO	15
I.8	Changement de méthode de communication automobile	16
I.9	Représentation d'un calculateur moteur et ses interactions	18
II.2	Algorithme du système global	30
II.3	L'architecture globale d'un système de gestion électro-hybride	31
II.4	Le système frein actif énergétique	33
II.5	Schéma présentant le fonctionnement du système de frein énergétique	36
III.5	La chaîne de traction du véhicule électrique	41
III.2	Schéma de la structure générale du convertisseur en demi-pont asymétrique	42
III.3	Schéma de la structure générale du convertisseur de Miller	43
III.4	Schéma de la structure générale du convertisseur à dissipation passive « R-Dump »	44
III.5	Résultats de la récupération l'énergie cinétique au niveau des freins	50
III.6	Résultats issus de l'enregistrement Simulink du système de freinage énergétique	51
III.7	Comparaison des stratégies d'utilisation du système électrique lors de l'accélération	52

III.8	Architecture de System globale l'energie PV	53
III.9	Le comportement dynamique d'un système de propulsion hybride destiné à un véhicule	55
III.10	Le comportement dynamique d'un système de propulsion hybride destiné	56
III.11	La réponse dynamique éoliennes face aux variations naturelles du vent	58
III.12	Le comportement énergétique d'un véhicule hybride	59
III.13	L'application de référence pour véhicule électrique (EV)	61
III.14	Simulation de double fonctionnement de moteur électrique (frein actif)	63

Liste des tableaux

Liste des tableaux

I.1	Chronologie du véhicule électrique avec quelques modèles	04
I.2	Classification réseaux selon la SAE	17
I.3	Exemples d'actionneur	18
I.4	Exemples de capteurs	19
III.5	Séquences de conduction du convertisseur à demi-pont asymétrique	42
III.6	Séquences de conduction du convertisseur de Miller	44
III.7	Séquences de conduction du convertisseur à dissipation passive « R Dump »	44
III.8	Comparaison des trois convertisseurs pour l'alimentation du MRV	45
III.9	Avantages et inconvénients de chaque type de convertisseur	45

Liste des abréviations

Liste des abréviations

3D	Trois Dimensions
AC	Courant Alternatif (Alternating Current)
BMS	Système de gestion de batterie (Battery Management System)
CAN	Controller Area Network (Réseau de contrôle de zone)
CO	Dioxyde de Carbone
DC	Courant Continu (Direct Current)
ENR	Énergie(s) Renouvelable(s)
GPS	Système de Positionnement Global
GW	Gigawatt
Imp	Courant au point de puissance maximale
kW	Kilowatt
kWh	Kilowatt-heure
LiDAR	Détection et Mesure par Laser
MW	Mégawatt
PV	Panneaux Pho-voltaïques
PWM	Pulse Width Modulation (Modulation de largeur d'impulsion)
RADAR	Détection et Localisation Radio
SONAR	Navigation et Localisation Sonore
VE	Véhicule Électrique
VH	Véhicule Hybride
Vmp	Tension au point de puissance maximale
Voc	Tension en circuit ouvert
VT	Véhicule Thermique

Introduction générale

Introduction Générale

Le monde est confronté à une crise énergétique et environnementale sans précédent, causée en grande partie par une dépendance excessive aux énergies fossiles. Ces dernières, bien qu'ayant permis le développement industriel et économique des sociétés modernes, présentent de graves inconvénients : épuisement des ressources, instabilité des marchés, dépendance géopolitique, et surtout, des impacts environnementaux dévastateurs tels que : le réchauffement climatique, la pollution atmosphérique et la dégradation de la biodiversité.

Dans ce contexte, la transition vers des sources d'énergie durables et propres est devenue une priorité mondiale. Le secteur du transport, et notamment celui de l'automobile, est l'un des principaux contributeurs aux émissions de gaz à effet de serre. Pour répondre à cette problématique, des efforts importants ont été engagés dans le développement de technologies de propulsion alternatives. Parmi elles, le véhicule électrique s'impose comme une solution prometteuse offrant une mobilité plus propre et silencieuse. Cependant, son adoption à grande échelle se heurte encore à certains défis, notamment en matière d'autonomie, de temps de recharge, et de dépendance aux sources d'électricité encore souvent issues de combustibles fossiles.

Pour rendre **le véhicule électrique véritablement écologique et autonome**, l'intégration directe des **énergies renouvelables embarquées** représente une avancée majeure. En combinant **l'énergie solaire**, **l'énergie éolienne** et la **récupération d'énergie de freinage**, il est possible de concevoir un **système énergétique innovant et intelligent**, capable de produire, stocker et gérer efficacement l'énergie nécessaire à la propulsion du véhicule.

Ce mémoire s'inscrit dans cette dynamique de recherche et d'innovation. Il a pour objectif de concevoir et simuler un **système énergétique hybride pour un véhicule**, intégrant :

Des **panneaux photovoltaïques** pour capter l'énergie solaire et la convertir en électricité utilisable ou stockable.

Des **turbines éoliennes miniatures intégrées** dans la structure du véhicule, exploitant l'air en mouvement pour produire de l'énergie, notamment lors de la conduite à grande vitesse.

Un **système de freinage régénératif**, permettant de récupérer l'énergie cinétique lors des phases de décélération et de freinage.

Dans le cadre de notre travail, nous proposons un système qui repose sur un **calculateur central intelligent** chargé de surveiller et d'optimiser la répartition et l'utilisation de l'énergie. Il prend en compte différents paramètres tels que : l'état de charge des batteries, la disponibilité des sources d'énergie, les conditions de conduite ou encore les prévisions météorologiques. Ce système est composé d'un générateur photovoltaïque GPV, et des convertisseurs DC/DC et DC/AC commandés par la **commande MPPT** assurant la poursuite de la **puissance maximale**. Ce dernier

alimente une machine asynchrone à partir d'un **onduleur** commandé par la **commande MLI**. Nous avons présenté la modélisation mathématique d'un système PV et d'un système éolien ainsi que les **caractéristiques $I(V)$ et $P(V)$** simulées sous **Matlab/ SIMULINK**. Le mémoire est structuré en trois chapitres, chacun explorant une facette essentielle des véhicules électriques hybrides.

Dans le premier chapitre nous allons nous pencher sur les bases théoriques en retraçant l'histoire des véhicules électriques, en détaillant les diverses sources d'énergie renouvelable envisageables, en présentant les systèmes embarqués, et en soulignant les enjeux environnementaux. C'est une immersion complète dans le contexte et les fondements qui sous-tendent cette étude.

Le deuxième chapitre est entièrement dédié à la conception du système énergétique embarqué. Il en décrit l'architecture globale et le fonctionnement de chaque module, qu'il s'agisse du photovoltaïque, de l'éolien ou du freinage régénératif. Une attention particulière est portée à la modélisation précise des batteries et à l'intégration de systèmes de contrôle intelligents, essentiels pour une gestion énergétique optimale et pour garantir la fiabilité du système.

Le troisième chapitre se consacre à la simulation et à l'interprétation des résultats. Des outils robustes comme MATLAB/Simulink sont employés pour valider le fonctionnement du système, analyser ses performances énergétiques et comparer différentes stratégies de gestion. L'objectif final de cette recherche est de démontrer concrètement la faisabilité et la pertinence d'une approche énergétique hybride embarquée. Une telle solution permettrait d'augmenter significativement l'autonomie des véhicules électriques tout en contribuant activement à la lutte contre le changement climatique, marquant ainsi une étape importante vers une mobilité plus durable et respectueuse de l'environnement

Enfin, nous terminons ce manuscrit par une conclusion générale et les perspectives offertes par ce travail.

Chapitre I : Fondements Théoriques

I.1 Introduction

Le véhicule électrique est une technologie qui ne date pas d'aujourd'hui, il existe depuis environ un siècle et demi et il ne cesse de se développer. En effet, les premiers véhicules électriques motorisés ont fait leurs apparitions à la fin du 19ème siècle, dans un premier temps, pour être une alternative à la traction humaine. Le premier véhicule fait son apparition dès 1881, Charles Jeantaud démarre avec sa Tilbury, mais hélas, au bout de 100 m la voiture part en fumée. Une décennie plus tard, soit en 1899, le belge Camille Jeanatzy inventa la célèbre voiture de course « la jamais contente » qui établit un record à l'époque avec une vitesse de 100km/h, mais cela ne pouvait voiler des inconvénients majeurs tel le manque d'autonomie et la difficulté de commande de ce type de véhicule d'où le fait qu'il n'a pas pu s'imposer comme un moyen efficace de transport, cette situation s'aggrava encore avec le développement d'un autre type de véhicule, cette fois-ci à propulsion thermique, robuste et plus autonome, cette technologie a vite été adoptée par le marché et le public pour devenir le moyen de mobilité routière le plus utilisé. Néanmoins, après des années de domination, des inconvénients commençaient à apparaître même pour celle-ci puisque il s'avérait qu'elle est dépendante de plusieurs paramètres variables et parfois incontrôlables tel le fait que sans pétrole ;élément généralement importer par les grandes industries et qui se fait rare en temps de guerre comme ce fut le cas lors de la deuxième guerre mondiale (1939 et 1945), on ne peut utiliser un véhicule thermique ainsi que lors de crise avec les chocs pétroliers (1973 et 1990), ajouté à cela, la pollution qu'engendre une utilisation massive de la propulsion thermique. Tout cela fait que la solution de l'électrique n'a jamais été oubliée et les recherches n'ont jamais cessé d'aller dans ce sens mais juste qu'on en parlait vraiment de cette solution qu'en temps de crise, cette logique a changé depuis que les effets de la pollution menacent la planète [3].

De ce fait, une autre approche plus sérieuse et plus volontaire est engagée dans la recherche et l'amélioration de la technologie de l'automobile électrique et ce depuis déjà les années 70, ce qui a permis de concevoir des prototypes et des modèles variés, toutefois, ils restent toujours incapable de fournir des performances au moins proche de celle d'un véhicule thermique. Dans les années 90, une nouvelle solution qui consistait en un compromis entre l'amélioration de ces performances et la réduction des polluants a été trouvée, réunir la technologie thermique et celle électrique dans un même véhicule qu'on appela alors la technologie hybride.

L'apparition du véhicule hybride a ouvert de nouvelles perspectives, au bout de quelques années, de nombreux constructeurs ont mis sur le marché des prototypes qui pour certains on était une référence et un succès commercial tel la Prius hybride conçue par TOYOTA en 1998. Le 21ème siècle s'annonce prometteur pour le véhicule hybride et plus encore pour le véhicule tout électrique vu que de nouvelles conceptions de plus en plus développées et améliorées ne cessent d'apparaître d'année en année [5].

I.2 Chronologie du véhicule électrique avec quelques modèles

Depuis 1981 à ce jour, plusieurs voitures électriques ont été conçues, de nombreux constructeurs ont proposé leurs prototypes. Le tableau 1.1 expose une chronologie réduite pour ces derniers [6].

Années	Constructeur/inventeur	Autonomie	Vitesse
1981	Charles Jean Taud	100m	
1894	Henry.G.Morris&Pedro.G. Salomon	40km	32km/h
1899	Camille Jenatzy		100km/h
1911	Detroit electric	130km	
1940	Paul Arzens	100km	70km/h
1941	Jean Albert Gregoire	250km	42km/h
1941	Pugeot	250km	42km/h
1947	Nissan Toyota electric	65km	35km/h
1959	Renault	60km	60km/h
1967	Frod	40à60km	64km/h
1984	Peugeot	140km	100km/h
1985	Renault	120km	80km/h
1997	Toyota		
2003	Renault	140km	
2010	BMW		

Tableau I.1 : Chronologie du véhicule électrique avec quelques modèles.

I.2.1 Fonctionnement des systèmes de navigation autonome

Le véhicule automatisé est équipé de plusieurs capteurs qui lui permettent de savoir où il est (capteur de localisation), s'il va heurter un obstacle (capteur de détection) et quel est l'obstacle qu'il risque de heurter (capteurs d'identification). Aux stades 2 et 3 d'automatisation, ces capteurs sont principalement [7].

I.2.2 Des sonars à ultrason « Sound Navigation and Ranging »

Ils émettent régulièrement des ondes sonores qui, une fois réfléchies, permettent de mesurer la distance entre l'émetteur-récepteur du véhicule et l'objet. Ce capteur est peu perturbé par les conditions atmosphériques. Leur portée est faible, ils ne peuvent pas mesurer les vitesses mais ils sont efficaces pour les mesures en trois dimensions à faible distance. Ils sont petits et peu chers [9].

I.2.3 Des caméras

A haute résolution, elles sont capables de transmettre au véhicule des pixels en très grand nombre. Elles permettent l'identification et la classification des objets ou personnes à l'extérieur du véhicule. Mais elles peuvent être aveuglées par une lumière trop forte, ou lorsqu'il fait nuit, la scène à observer doit être éclairée [10].

I.2.4 Des scanners lasers (LiDAR ou Light Détection and Ranging)

Ils permettent par l'émission d'une lumière dans le spectre infrarouge de mesurer une distance avec la réflexion de la lumière émise.

Utilisant des miroirs en rotation, les scanners laser 3D ont un large champ d'observation et peuvent mesurer une distance entre 2 mètres au minimum et 350 mètres au maximum. Cependant, ils peuvent être sensibles aux conditions météorologiques difficiles.

Ce sont des capteurs lourds et extrêmement chers (plusieurs dizaines de milliers d'euros) mais les fabricants sont en passe de proposer des capteurs plus petits et bien moins chers [3].

I.2.5 Des caméras 3D

Elles permettent d'avoir des images en couleurs en trois dimensions, sans toutefois avoir une très grande portée.

I.2.6 Des radars « Radio Detection and Ranging »

Petits et peu chers, ils mesurent la distance grâce à la réflexion des ondes émises.

Ils peuvent mesurer les vitesses relatives et les distances relatives des objets extérieurs. Ils ont une bonne portée, mais leur résolution est faible.

Les radars peuvent fonctionner à très courtes distances mais moins bien que les sonars. Ils sont principalement utilisés pour prévenir les collisions [13].

I.2.7 Des caméras infrarouges

Elles permettent de voir la nuit. Il en existe deux types: pour l'infrarouge lointain (« far infrared » ou FIR) et pour l'infrarouge proche (« near infrared » ou NIR).

I.2.8 Des capteurs de localisation

Le GPS qui donne la localisation dans l'espace à trois dimensions, ainsi que la vitesse et le cap du véhicule, ou le GPS différentiel plus précis.

I.3 Sources d'énergie Renouvelable**I.3.1 Les Panneaux Solaire**

L'électricité est générée à partir des rayons du soleil collectés grâce à l'installation de panneaux solaires.

Ils sont généralement mis en place sur les toits des habitations et reliés à des onduleurs chargés de changer le courant continu produit par les panneaux en courant alternatif. Ce dernier est ensuite envoyé jusqu'à un compteur électrique de production permettant de mesurer l'énergie produite. Certains modèles de panneaux sont équipés de moteurs afin de les réorienter à loisir pour suivre la course du soleil [7].



Figure I.1 : Modèle d'une voiture électrique elctro_hybride " Tesla Model Y"

I.3.2 Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque est un appareil électronique qui convertit l'énergie lumineuse, la lumière, en énergie électrique. C'est-à-dire qu'il absorbe les photons de la lumière pour libérer des électrons qu'il peut utiliser dans un courant électrique.

Les panneaux solaires ne sont rien de plus que plusieurs cellules travaillant ensemble

pour générer un plus grand potentiel électrique. Certains panneaux ont 36 cellules ou plus. Ces dispositifs sont constitués de deux types de matériaux semi-conducteurs, l'un avec une charge positive (p) et l'autre Figure 1.V : caractéristique résultante de p cellules en parallèle avec une charge négative (n). Lorsqu'ils sont exposés à la lumière, ils permettent à un photon de la lumière du soleil d'« arracher » un électron, l'électron libéré laisse un « trou » qui sera rempli par un autre électron qui a été à son tour arraché à son propre atome. Le travail de la cellule est de faire passer les électrons libres d'un matériau semi-conducteur à un autre à la recherche d'un «trou» à combler. Cela produit une différence de potentiel et donc un courant électrique, c'est-à-dire qu'un flux d'électricité se produira du point de potentiel le plus élevé au point de potentiel le plus bas jusqu'à ce que le potentiel soit le même aux deux points [13].

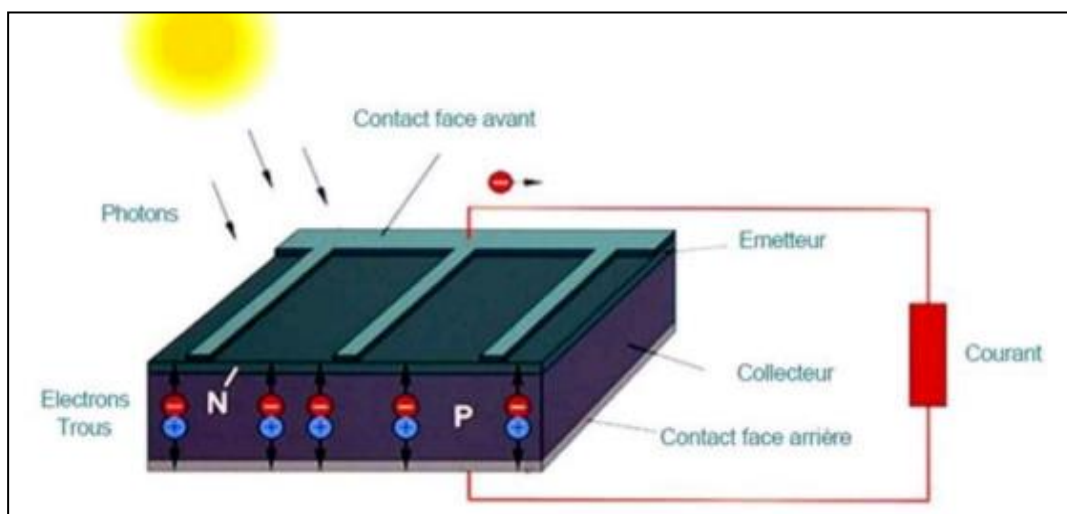


Figure I.2 : Schéma de principe de fonctionnement d'un panneau photovoltaïque.

I.3.3 Applications des panneaux photovoltaïque

I.3.3.1 Production d'électricité à grande échelle (centrales solaires)

Les centrales solaires photovoltaïques, qui utilisent des milliers de panneaux solaires pour produire de l'électricité à grande échelle sont l'une des applications les plus courantes des panneaux solaires. Ces installations peuvent être terrestres ou flottantes (sur des plans d'eau). Elles fournissent une énergie propre pour alimenter des réseaux électriques entiers.

Les panneaux solaires sont largement utilisés dans les foyers pour produire de l'électricité, réduisant ainsi la dépendance aux réseaux électriques. Ces systèmes peuvent être installés sur les toits des maisons et sont souvent associés à des batteries de stockage pour une utilisation nocturne ou lors de périodes de faible ensoleillement [19].

I.3.3.2 Applications dans les véhicules solaires

Les véhicules solaires, qu'il s'agisse de voitures, de bateaux ou de véhicules tout-terrain, utilisent des panneaux solaires pour alimenter leurs moteurs électriques. Ces véhicules sont particulièrement utiles dans les zones reculées où l'accès à d'autres sources d'énergie est limité [9].

I.3.3.3 Pompes solaires pour l'irrigation et l'approvisionnement en eau

Les pompes solaires sont utilisées dans les zones rurales pour alimenter les systèmes d'irrigation agricole ou fournir de l'eau potable dans les régions éloignées. Ces systèmes sont particulièrement efficaces dans les pays en développement où l'accès à l'électricité est limité [17].

I.3.3.4 Éclairage public solaire

Les panneaux solaires sont également utilisés pour alimenter des systèmes d'éclairage public dans les zones urbaines et rurales. Ces installations permettent de réduire les coûts énergétiques et d'augmenter l'efficacité énergétique des villes. Les lampes solaires sont souvent équipées de batteries pour stocker l'énergie pendant la journée et fournir de la lumière la nuit [11].

I.3.3.5 Alimentation d'objets électroniques portables

Les panneaux solaires sont utilisés pour alimenter des petits appareils électroniques, comme les téléphones portables, les ordinateurs portables, ou encore les montres et appareils portables. Des petits panneaux solaires portables permettent de charger ces appareils lors de voyages ou de randonnées [12].

I.3.4 Turbine d'air (éolienne)

L'énergie éolienne est une énergie "renouvelable" non dégradée, géographiquement diffuse, et surtout en corrélation saisonnière (l'énergie électrique est largement plus demandée en hiver et c'est souvent à cette période que la moyenne des vitesses des vents est la plus élevée). De plus, c'est une énergie qui ne produit aucun rejet atmosphérique ni déchet radioactif. Elle est toutefois aléatoire dans le temps et son captage reste assez complexe, nécessitant des mâts et des pales de grandes dimensions (jusqu'à 60 m pour des éoliennes de plusieurs mégawatts) dans des zones géographiquement dégagées pour éviter les phénomènes de turbulences [20].

Une éolienne est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique puis en énergie électrique, en retrouve dans les différentes configurations les éléments de base à savoir :

- *- L'hélice qui transforme le vent en énergie mécanique.
- *- La transmission mécanique par l'arbre.
- *- La génératrice qui fait la conversion mécanique-électrique.

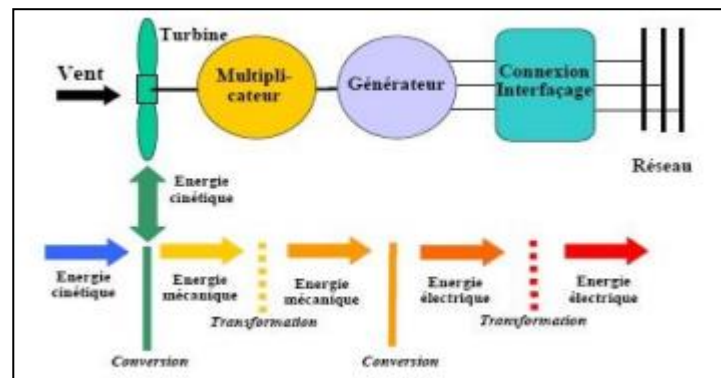


Figure I.3 : Convention de l'énergie cinétique du vent.

I.3.4.1 Principe de fonctionnement d'une éolienne

Pour convertir l'énergie disponible dans le vent en énergie électrique, les turbines éoliennes doivent être composées d'une partie mécanique et d'une partie électrique. La partie mécanique sert à capter l'énergie cinétique disponible dans le vent et à la transformer en énergie mécanique rotative. Cette dernière est transmise via un système d'entraînement, habituellement composé d'une boîte de vitesse, à une génératrice électrique. La conversion d'énergie mécanique en énergie électrique est effectuée via la génératrice électrique [14].

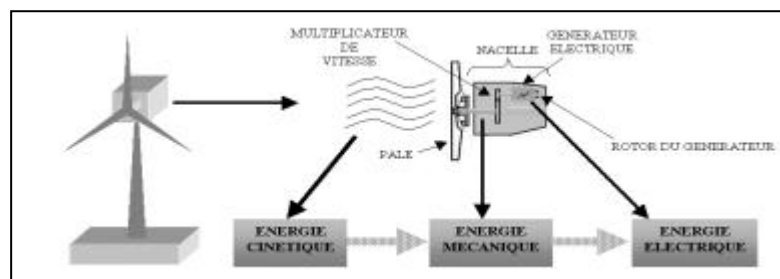


Figure I.4 : Conversion de l'énergie cinétique du vent.

I.3.4.2 Efficacité de turbine d'air

A) Le rendement théorique de Betz

Le rendement théorique maximal des turbines à air est défini par la limite de Betz, formulée par l'ingénieur allemand Albert Betz en 1919. Selon cette loi, une turbine éolienne ne peut capter plus de **59,3%** de l'énergie cinétique du vent, car une partie de l'énergie doit rester dans le vent pour permettre à celui-ci de continuer à circuler à travers les pales de la turbine. Cela signifie qu'aucune turbine ne peut être 100 % efficace [15].

B) Les facteurs influençant l'efficacité des turbines

L'efficacité réelle des turbines dépend de plusieurs facteurs pratiques :

B.1 Vitesse du vent

Une turbine fonctionne de manière optimale lorsque la vitesse du vent est modérée. Si la vitesse est trop faible, la turbine ne génère pas suffisamment d'énergie, et si elle est trop forte, la turbine peut être mise en arrêt pour éviter des dommages [16].

B.2 Conception des pales

La forme, la taille et l'angle des pales influencent l'efficacité de la turbine. Les pales bien conçues permettent de mieux capter l'énergie du vent.

B.3 Hauteur de la turbine

Les turbines installées plus haut peuvent capter des vents plus forts et plus réguliers, ce qui améliore leur efficacité.

B.4 Réduction des turbulences

Les turbulences causées par des obstacles (comme des bâtiments ou des arbres) peuvent réduire l'efficacité des turbines, car elles perturbent l'écoulement du vent.

I.3.4.3 Efficacité en fonction des conditions réelles

En réalité, le rendement des turbines éoliennes est souvent inférieur à leur rendement théorique. Le rendement moyen des turbines commerciales varie généralement entre **30% et 40%** de l'énergie maximale théoriquement capturable.

Cependant, dans des conditions idéales (vent constant et modéré), certaines turbines peuvent atteindre un rendement d'environ **50%**.

Le facteur de capacité, qui mesure la production d'énergie par rapport à la capacité maximale théorique, varie généralement entre **30% et 40%** pour les installations éoliennes modernes. Cela signifie que même si les turbines peuvent théoriquement produire beaucoup d'énergie, elles ne génèrent de l'électricité qu'une partie du temps, car la vitesse du vent n'est pas constante [20].

I.3.4.4 Limites de performance et avancées technologiques

Les progrès technologiques dans la conception des turbines (telles que l'amélioration des pales, des générateurs et des systèmes de contrôle) ont permis d'augmenter l'efficacité des turbines éoliennes. Ces améliorations permettent aux turbines modernes de mieux capter l'énergie du vent tout en minimisant les pertes liées aux turbulences et autres facteurs environnementaux [21].

I.4 Freinage régénératif

I.4.1 Principe de freinage régénératif

Pour mouvoir les voitures électriques, la batterie fournit l'énergie nécessaire au moteur. De ce mouvement va se créer de l'énergie cinétique. Pour arrêter l'auto électrique, le pied du conducteur se retire de l'accélérateur et c'est là que tout se joue. Contrairement à la voiture thermique, le modèle tout électrique n'a pas réellement besoin du frein pour s'arrêter. Le fait de retirer le pied de l'accélérateur entraîne déjà une décélération et se déclenche alors le processus inverse

Par un système de fonctionnement ingénieux, l'énergie cinétique fait tourner le moteur électrique par les roues, en effectua lieu d'activer les freins, l'essieu des roues vient donc entraîner les aimants du ou des moteurs électriques puis, le moteur se comportant comme une sorte de générateur et s'oppose ainsi à la rotation des roues, ce qui va les ralentir ainsi que la vitesse du véhicule. Au même moment, l'énergie cinétique des roues va se transformer en énergie électrique, laquelle sera récupérée et stockée dans la batterie, puis réutilisée lorsque la voiture électrique démarrera. La plupart des modèles affichent la recharge sur une jauge voire un schéma sur écran pour comprendre quand la récupération est active [22].

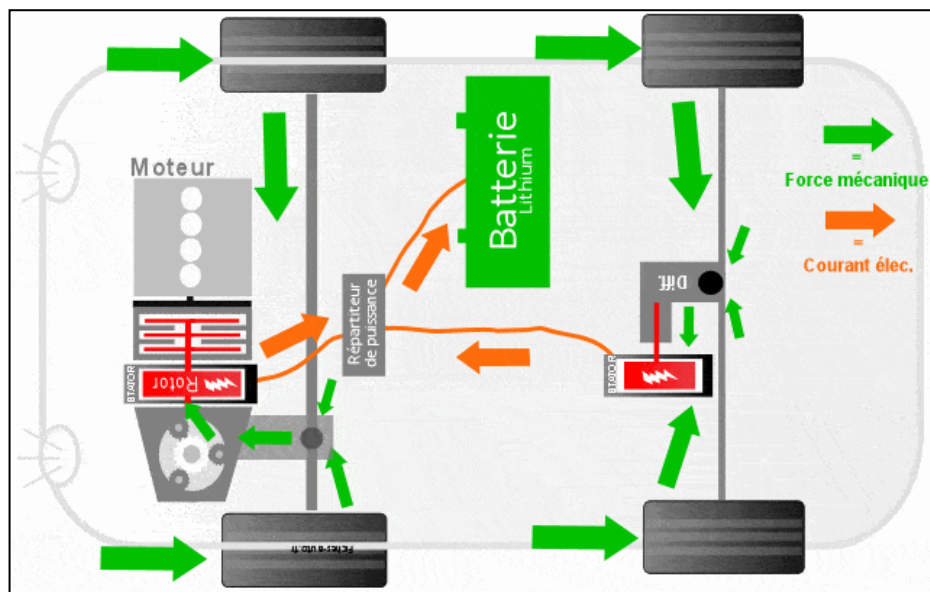


Figure I.5 : Freinage régénératif.

La récupération d'énergie par le freinage régénératif consiste lors des périodes de freinage, à inverser le sens du couple à fournir par la machine électrique, soit par inversion du sens du courant inducteur (cas d'une machine à courant continu ou d'une machine synchrone à rotor bobiné) ou du courant d'induit seul (cas d'une machine à courant continu), soit par inversion du sens d'alimentation des phases du stator (par inversion du sens du courant instantané dans les

enroulements statoriques) dans le cas des machines à courant alternatif (machine synchrone à rotor bobiné, machine synchrone à aimants, machine asynchrone) [23].

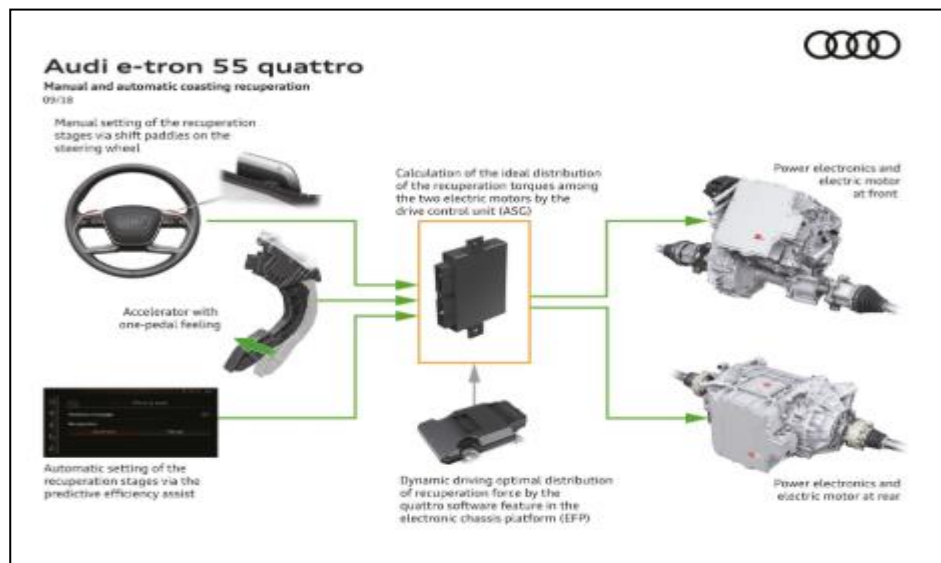


Figure I.6: Schéma du système régénératif de l'audi e-tron.

I.5 Systèmes Embarqués dans les véhicules

I.5.1 Définition

Un système embarqué est un ensemble d'éléments informatiques et électroniques interagissant entre eux de façon autonome et complémentaire. Ces systèmes sont conçus de manière à pouvoir répondre spécifiquement aux besoins de leur environnement respectif.

Le terme « système » désigne l'ensemble des éléments qui constituent le système embarqué, souvent ces systèmes sont composés de sous-systèmes étant donné leur complexité.

Le terme « embarqué » représente la mobilité et l'autonomie du système en interaction directe avec son environnement dans l'exécution de tâches précises, afin de répondre à la finalité de celui-ci.

Contrairement aux systèmes classiques, les systèmes embarqués sont conçus pour réaliser des tâches bien précises. Certains doivent répondre à des contraintes de temps réel pour des raisons de fiabilité et de sécurité, indispensables selon l'utilisation du système.

Un système embarqué regroupe à la fois la partie software (logicielle) et la partie hardware (matériaux) étroitement liées afin de produire les résultats escomptés.

I.5.2 Arduino

Le système Arduino est un outil pour fabriquer de petits ordinateurs qui peuvent capter et contrôler davantage de choses du monde matériel que votre ordinateur de bureau. C'est une plateforme open-source d'électronique programmée qui est basée sur une simple carte à microcontrôleur (de la famille AVR), et un logiciel, véritable environnement de développement intégré, pour écrire, compiler et transférer le programme vers la carte à microcontrôleur.

Arduino peut être utilisé pour développer des objets interactifs, pouvant recevoir des entrées d'une grande variété d'interrupteurs ou de capteurs, et pouvant contrôler une grande variété de lumières, moteurs ou toutes autres sorties matérielles. Les projets Arduino peuvent être autonomes, ou bien ils peuvent communiquer avec des logiciels tournant sur votre ordinateur (tels que Flash, Processing ou MaxMSP).

Les cartes électroniques peuvent être fabriquées manuellement ou bien être achetées pré-assemblées; le logiciel de développement open-source peut être téléchargé gratuitement. Le langage de programmation Arduino est une implémentation de Wiring, une plateforme de développement similaire, qui est basée sur l'environnement multimédia de programmation Processing [24].

I.5.3 Pourquoi Arduino ?

Il y'a de nombreux microcontrôleurs et de nombreuses plateformes basées sur des microcontrôleurs disponibles pour l'électronique programmée. Parallax Basic Stamp, Netmedia's BX-24, Phidgets, MIT's Handyboard, et beaucoup d'autres qui offrent des fonctionnalités comparables. Tous ces outils prennent en charge les détails compliqués de la programmation des microcontrôleurs et les intègrent dans une présentation facile à utiliser. De la même façon, le système Arduino simplifie la façon de travailler avec les microcontrôleurs, tout en offrant plusieurs avantages pour les enseignants, les étudiants et les amateurs intéressés par les autres systèmes :

- *- **Pas cher** : les cartes Arduino sont relativement peu coûteuses comparativement aux autres plateformes. La moins chère des versions du module Arduino peut être assemblée à la main, et même les cartes Arduino pré-assemblées coûtent moins de 25 Euros (microcontrôleur inclus...).

- *- **Multi-plateforme** : Le logiciel Arduino, écrit en Java, tourne sous les systèmes d'exploitation Windows, Macintosh et Linux. La plupart des systèmes à microcontrôleurs sont limités à Windows.

- *- **Un environnement de programmation clair et simple** : L'environnement de programmation Arduino (= le logiciel Arduino) est facile à utiliser pour les débutants, tout en étant assez flexible pour que les utilisateurs avancés puisse en tirer profit également. Pour les

enseignants, il est basé sur l'environnement de programmation processing: les étudiants qui apprennent à programmer dans cet environnement seront déjà familiarisés avec l'aspect du logiciel Arduino.

***- Logiciel open source et extensible** : Le logiciel Arduino et le langage Arduino sont publiés sous licence open source, disponible pour être complété par des programmeurs expérimentés. Le langage peut être aussi étendu à l'aide de bibliothèques C++, et les personnes qui veulent comprendre les détails techniques peuvent reconstruire le passage du langage Arduino au langage C pour microcontrôleur AVR sur lequel il est basé. De la même façon, on peut ajouter du code du langage AVR-C directement dans vos programmes Arduino.

***- Matériel Open source et extensible** : Les cartes Arduino sont basées sur les microcontrôleurs Atmel ATMEGA8, ATMEGA168, ATMEGA 328, etc... Les schémas des modules sont publiés sous une licence Creative Commons, et les concepteurs de circuits expérimentés peuvent réaliser leur propre version des cartes Arduino, en les complétant et en les améliorant. Même les utilisateurs relativement inexpérimentés peuvent fabriquer la version sur plaque d'essai de la carte Arduino, dans le but de comprendre comment elle fonctionne et pour économiser de l'argent [25].

I.5.4 La carte Arduino Uno

La carte Arduino Uno diffère de toutes les cartes car elle n'utilise pas le circuit intégré FTDI usb-vers-série. À la place, elle utilise un Atmega8U2 programmé en convertisseur USB-vers-série. "Uno" signifie un(1) en Italien et ce nom marque la venue prochaine de la version 1.0 du logiciel Arduino. La carte UNO et la version 1.0 du logiciel seront la référence des versions Arduino à venir. La carte Uno est la dernière d'une série de carte USB Arduino, et le modèle de référence des plateformes Arduino; pour une comparaison avec les versions précédentes, voir l'index des cartes Arduino. Elle contient tout ce qui est nécessaire pour le fonctionnement du microcontrôleur; Pour pouvoir l'utiliser et se lancer, il suffit simplement de la connecter à un ordinateur à l'aide d'un câble USB (ou de l'alimenter avec un adaptateur secteur ou une pile, mais ceci n'est pas indispensable, l'alimentation étant fournie par le port USB) [26].

***- Brochage de la carte Uno**

La carte Arduino Uno est une carte à microcontrôleur basée sur l'ATmega328. Elle dispose (voir figure I.7) :

1. Un microcontrôleur,
2. D'une connexion USB,

3. D'un connecteur d'alimentation jack,
4. LED de visualisation
5. a) De 14 broches numériques d'entrées/sorties (dont 6 peuvent être utilisées en sorties PWM)
b) De 6 entrées analogiques (qui peuvent également être utilisées en broches entrées/sorties numériques),
6. D'un quartz 16Mhz,
7. D'un connecteur ICSP (programmation "in-circuit"),
8. Un bouton de réinitialisation (reset) [27].

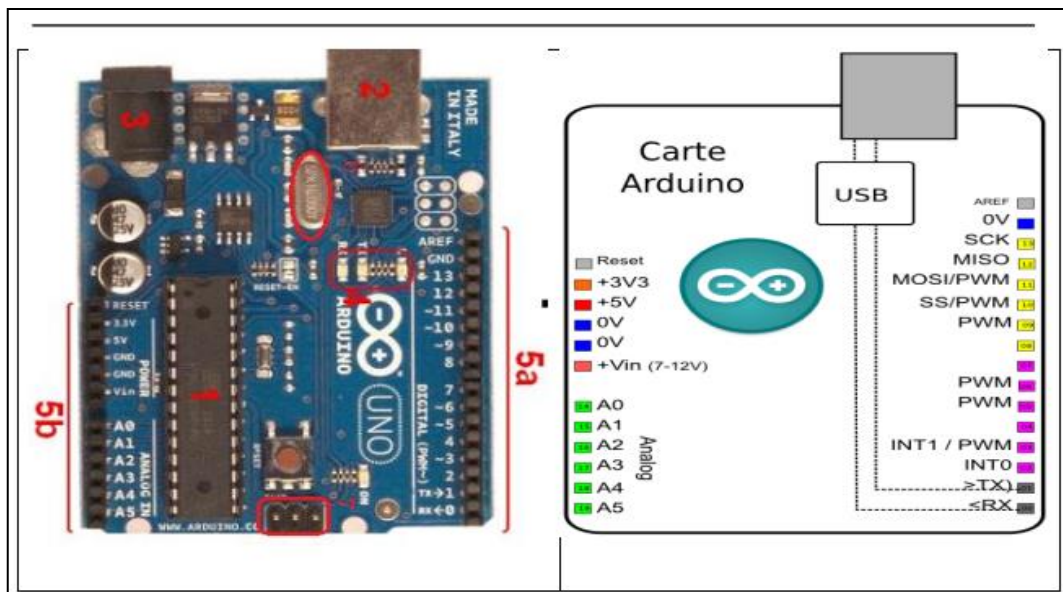


Figure I.7 : La carte Arduino UNO.

I.5.5 Architecture d'un système automobile

A) Communication -Multiplexage

Dans un véhicule, chaque ECU (ou calculateur) gère son propre système, cependant il est possible pour un système de pouvoir interagir et échanger des informations avec tous les autres calculateurs contenus dans le véhicule.

Pour ce faire, les calculateurs communiquent entre eux par types de langages différents suivants les fonctions qui leurs sont dédiées (gestion moteur, gestion habitacle...). Ceci représente un réseau multiplexé.

Lors de l'introduction des systèmes embarqués dans les véhicules, le réseau utilisé était point-to-point, c'est-à-dire que chaque système était relié directement à un autre par l'intermédiaire de câbles. Cette méthode convient lorsque peu de systèmes sont installés car elle nécessite un nouveau câblage à chaque composant ajouté.

Ainsi, lors de l'augmentation du nombre de systèmes embarqués dans les véhicules, des kilomètres de fils et de câbles se sont vus entasser dans les véhicules impliquant une forte

quantité de poids mais surtout un risque de panne plus élevé. Ceci représentait notamment un coût important de la part du constructeur ainsi qu'un espace restreint pour l'éventuel ajout de système.

C'est ainsi que le multiplexage a dû faire place permettant les transitions d'informations sur un seul câblage via des protocoles de langages dédiés [29].

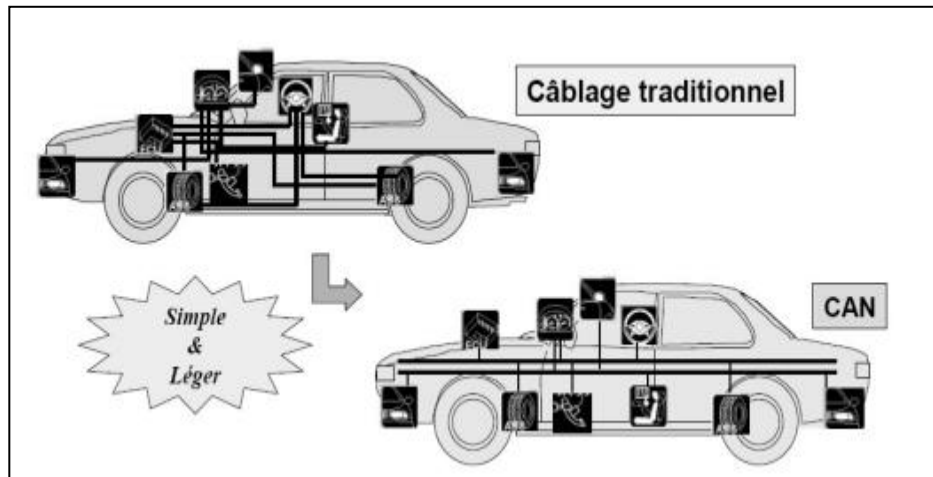


Figure I.8 : Changement de méthode de communication automobile.

CAN (Controller Area Network) fait partie des nombreux protocoles de communication d'un réseau multiplexé tels que le VAN, le LIN ou encore le MOST. Le bus CAN reste le protocole le plus utilisé dans les véhicules. Le protocole représente la manière dont sont encodées les informations circulant dans le bus.

Deux boîtiers (ou supercalculateurs) électroniques spécifiques à la communication du bus sont présents dans l'habitacle afin de traiter les informations contenues. Un premier permet simplement d'encoder les informations émises par les capteurs ou calculateurs selon le protocole de communication et de les envoyer au bus de communication. Un second permet le décodage de ces informations pour les trier et les transmettre aux autres systèmes, tels que des calculateurs ou actionneurs.

En effet, plusieurs protocoles peuvent être utilisés dans un même véhicule dépendant de la catégorie de fonctionnalités que propose le système ayant des besoins en termes de fiabilités, de débits et de coûts différents. Un réseau automobile peut se retrouver partagé en plusieurs sous-réseaux correspondant aux différents domaines de fonctionnalités.

Ces « familles » de spécifications ont été classifiées par la SAE (Society for Automotive Engineers) afin de déterminer les réseaux à adopter en fonction des besoins du système [30].

classe	Débit	Usage	Exemples
A	<10kb/s	Controlé l'habitacle	LIN
B	10kb/s↗ 125kb/s	Transfert de données non-critiques	CAN-B(Low-speed CAN)
C	125kb/s↘ 1Mb/s	Communication temps -réel critiques	CAN-C(High-speed CAN)
D	>1Mb/s	Multimédia ou X-by-wire	MOST, FlexRay

Tableau I.2 : Classification réseaux selon la SAE.

L'usage correspond aux domaines des fonctionnalités nécessitant un réseau multiplexé. Le débit utilisé au réseau va dépendre des critères de temps réel demandés par les systèmes. La fiabilité, le coût, la sécurité ou encore la qualité de service font partie intégrante du choix du réseau [31].

B) Communication entre capteurs et actionneurs

B.1 Calculateur

Le calculateur est l'élément principal d'un système embarqué automobile où régit la mémoire, la carte-mère ou encore le traitement logiciel. Chacun des calculateurs automobiles sont dédiés au pilotage d'une ou certaines tâches bien précises, ainsi de nombreux calculateurs sont présents dans les véhicules formant son système électronique.

Le calculateur correspond à un boîtier contenant des broches électriques dotées de nombreux ports d'entrées et de sorties afin de permettre à la gestion des instruments de bord. Une carte programmable composée de circuits imprimés contient tout le traitement informatique du système, principalement codé en langage C++ ou Java, et s'accompagne d'autres éléments formant le calculateur.

Nous pouvons les qualifier de systèmes « intelligents » due à leur capacité de prise de décision en fonction des paramètres d'entrées via des capteurs (ou sondes).

Dans le cas d'un calculateur moteur, son but précis sera d'assurer les fonctions de pilotage d'un moteur en ajustant en temps réel les besoins du moteur. En recevant des signaux électriques de la part des capteurs (sonde de température, capteur de pression...), le calculateur peut traiter ces informations pour les transformer en actions par l'intermédiaire d'actionneurs (injecteur, vanne EGR...) [32].

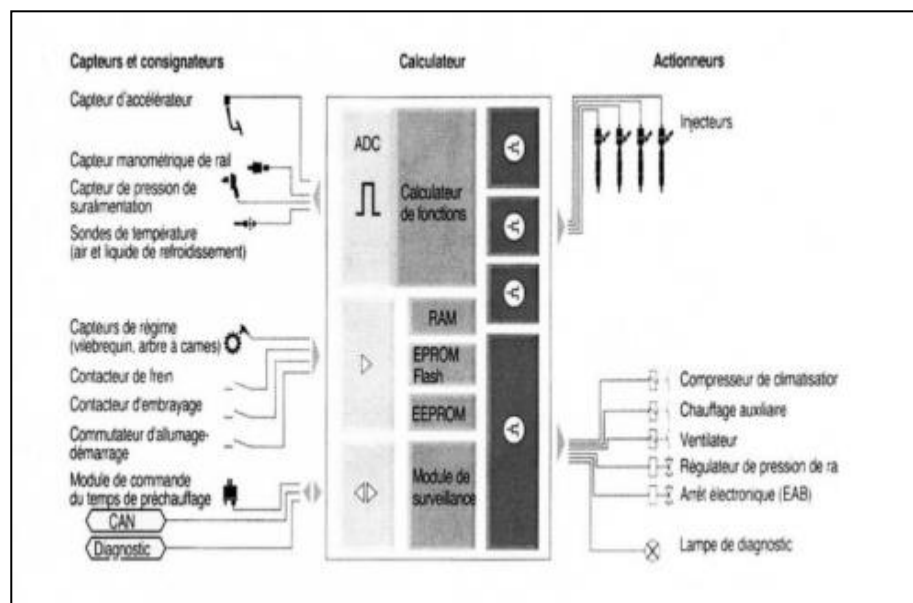


Figure I.9: Représentation d'un calculateur moteur et ses interactions.

B.2 Actionneurs

Lorsque le traitement est réalisé par le calculateur, un signal électrique est transmis aux actionneurs permettant une action physique sur le véhicule.

Paramètre	Actionneurs (ou actuateurs)
Temps d'injection <=	Injecteur
Étincelle de combustion <=	Bobine d'allumage
Suppression NOx (oxyde d'azote) <=	Vanne EGR
Pression turbo <=	Électrovanne turbo
Production de froid <=	Compresseur climatisation
Verrouillage des portières <=	Actionneur de porte
Mouvement des vitres <=	Moteur lève-vitre

Tableau I.3 : Exemples d'actionneur.

Ces actionneurs (ou actuateurs) transforment le signal électrique reçu en énergie mécanique. Cette transformation d'énergie peut être réalisée par moteur, de façon magnétique, hydraulique ou optique.

Les capteurs sont des éléments essentiels au fonctionnement des calculateurs puisque ce sont ces composants qui sont chargés de transmettre l'information afin d'être traitée de manière optimale.

Leur principal objectif est donc de renseigner le calculateur qui va pouvoir agir en temps réel avec l'environnement, c'est pourquoi, ces capteurs envoient de façon constante des informations en continu au calculateur relié. De plus en plus de capteurs sont élaborés grâce à la sophistication des nouveaux véhicules.

Précisément, leurs tâches consistent à pouvoir transformer une grandeur physique (température, pression...) en un signal électrique afin de le transmettre au calculateur. En effet, des interrupteurs peuvent être considérés comme des capteurs puisque les informations qui résultent de l'action émise par l'utilisateur sont directement transmises au calculateur [33].

Information de grandeur physique	Signaux électriques
Température =>	Sonde de température
Position / Vitesse =>	Capteur PMH
Débit d'air =>	Débitmètre
Pression =>	Capteur pression
Vibrations =>	Capteur cliquetis
Angle =>	Capteur gyroscopique
Taux d'oxygène =>	Sonde lambda
Taux d'humidité =>	Capteur de pluie
Lumière =>	Capteur de luminosité

Tableau I.4 : Exemples de capteurs.

B.3 Communication

Tous ces composants échangent entre eux par l'intermédiaire de faisceaux, ils correspondent à de petits câbles permettant la transmission des signaux électriques contenant les informations recueillies et à transmettre [34].

I.6 Impact environnemental

Les énergies renouvelables se révèlent être des alliées incontournables dans notre quête pour un avenir plus durable. Leur capacité à réduire les émissions de gaz à effet de serre est indéniable, mais comment chacune d'entre elles contribue-t-elle spécifiquement à cet objectif ? Plongeons dans l'univers fascinant du solaire, de l'éolien, de la biomasse et de l'hydroélectricité pour mieux comprendre leur impact environnemental [35].

I.6.1 Réduction des émissions grâce aux énergies renouvelables

A) L'énergie solaire : contribution à la diminution des émissions

L'énergie solaire transforme les rayons du soleil en électricité grâce aux panneaux photovoltaïques. En capturant cette source inépuisable d'énergie, nous réduisons notre dépendance aux combustibles fossiles, principaux responsables des émissions de CO₂. Imaginez une grande surface commerciale équipée d'un toit solaire : elle pourrait non seulement couvrir ses besoins énergétiques mais aussi injecter le surplus dans le réseau électrique local [36].

B) L'énergie éolienne : rôle dans la lutte contre les gaz à effet de serre

Les parcs éoliens, avec leurs immenses turbines qui capturent la force du vent, représentent une autre solution efficace. Chaque rotation produit une énergie propre et sans carbone. Les collectivités locales peuvent tirer parti des vents constants pour alimenter leurs infrastructures tout en réduisant considérablement leur empreinte carbone. L'éolien offre ainsi une alternative viable aux centrales thermiques polluantes [37].

C) Biomasse et hydroélectricité : impact combiné sur les émissions

La biomasse exploite la matière organique pour produire chaleur et électricité. En transformant les déchets agricoles ou forestiers en ressources énergétiques, elle diminue le volume des déchets tout en limitant l'usage des combustibles fossiles.

Parallèlement, l'hydroélectricité utilise la puissance hydraulique pour générer une énergie stable et fiable. Ces deux sources combinées offrent une réduction significative des émissions tout en soutenant un modèle énergétique circulaire.

En somme, chaque source d'énergie renouvelable apporte sa pierre à l'édifice écologique en contribuant activement à la réduction des émissions nocives. Alors que votre entreprise envisage sa transition énergétique, pourquoi ne pas explorer ces solutions prometteuses ? Les résultats pourraient bien dépasser vos attentes tant sur le plan économique qu'environnemental [38].

I.6.2 Analyse du cycle de vie des composants

Même si les énergies renouvelables sont propres à l'usage, leur analyse du cycle de vie (ACV) montre qu'il y a des impacts lors de :

- *- **Fabrication** des panneaux solaires, éoliennes, batteries.
- *- **Transport** des matériaux (souvent importés).
- *- **Installation** et maintenance.
- *- **Fin de vie** : recyclage ou mise en décharge.

Exemple : Panneau solaire

- *- **Fabrication** : extraction du silicium, consommation d'énergie.
- *- **Utilisation** : zéro émission directe.
- *- **Fin de vie** : jusqu'à 90 % des matériaux peuvent être recyclés (verre, aluminium, métaux rares)[39].

I.6.3 Efficacité technologique limitée

Certaines technologies renouvelables n'ont pas encore atteint leur plein potentiel en matière de rendement :

- A- Le rendement moyen des panneaux solaires** commerciaux est autour de **20 à 22 %**, bien qu'il existe des prototypes plus performants.
- B- Les turbines éoliennes** ont une efficacité maximale théorique (~59 %, limite de Betz), mais leur production dépend fortement du vent réel disponible.
- C- Stockage de l'énergie** : une technologie encore coûteuse.

I.6.4 Le principal défi technique des énergies renouvelables intermittentes

Les batteries lithium-ion sont aujourd'hui la solution la plus répandue, mais elles restent coûteuses, avec des limites de durée de vie.

D'autres technologies sont en développement (stockage thermique, hydrogène vert), mais pas encore matures à grande échelle.[40]

I.6.5 Coût et complexité des infrastructures

L'intégration des énergies renouvelables au réseau nécessite :

*- **Une modernisation des réseaux électriques** (smart grids), la construction de **nouvelles lignes de transport** pour relier les zones de production (souvent rurales) aux zones de consommation. Cela représente des **investissements lourds**, et des **délais administratifs parfois très longs**.

- *- Recyclage insuffisant des équipements
- *- Les technologies renouvelables génèrent des **déchets en fin de vie** (panneaux solaires, pales d'éoliennes, batteries).

Actuellement :

- Le **taux de recyclage** est encore **faible**, en particulier pour les pales d'éoliennes et certaines batteries.

- Les **solutions de recyclage industriel** sont en cours de développement, mais **pas encore généralisées**.

I.6.6 Innovations attendues

L'avenir du stockage énergétique repose sur des innovations prometteuses qui pourraient révolutionner notre approche actuelle. Par exemple, les batteries à flux redox offrent un potentiel considérable grâce à leur capacité à stocker d'importantes quantités d'énergie avec une longévité accrue et un faible impact environnemental.

Voici d'autres pistes explorées :

- **Batteries solides** : Ces dispositifs promettent une densité énergétique supérieure et une sécurité améliorée par rapport aux batteries lithium-ion traditionnelles.

- **Piles à hydrogène** : En convertissant l'hydrogène en électricité via une réaction chimique propre, elles offrent une solution potentielle pour un stockage longue durée sans émissions polluantes directes.

- **Nouveaux matériaux nanostructures** : Ils pourraient permettre la création de supercondensateurs capables de charger et décharger rapidement tout en offrant une grande capacité énergétique.

L'intégration réussie de ces technologies dépendra non seulement des avancées techniques, mais aussi du soutien réglementaire et financier adéquat. Pour que votre entreprise puisse tirer parti au maximum des énergies renouvelables tout en maîtrisant ses coûts énergétiques, il devient essentiel d'anticiper ces évolutions technologiques et stratégiques dès aujourd'hui.

A) Système de conversion de l'énergie solaire

Le système photovoltaïque dans une voiture électrique repose sur l'intégration de cellules solaires, généralement sur la carrosserie (toit, capot), pour convertir directement la lumière du soleil en électricité. Ces cellules sont composées de matériaux semi-conducteurs qui génèrent une différence de potentiel sous l'effet des photons solaires. L'énergie électrique ainsi produite est ensuite acheminée vers un système de stockage, le plus souvent des batteries lithium-ion, via un convertisseur continu/continu. L'objectif est de recharger la batterie principale du véhicule, augmentant son autonomie et réduisant le besoin de se brancher au réseau électrique. Bien que la surface disponible sur une voiture limite la quantité d'énergie solaire collectable, les avancées dans le rendement des cellules photovoltaïques (silicium polycristallin, films minces) et les technologies de gestion de l'énergie permettent une contribution significative, en particulier pour les trajets quotidiens ou pour maintenir la charge du véhicule à l'arrêt. Des exemples comme la Lightyear One ou des prototypes ont démontré la viabilité de cette approche.

B) Système de conversion de l'énergie éolienne

L'intégration de l'énergie éolienne directement sur un véhicule en mouvement est un défi complexe en raison de la nature dynamique du flux d'air et de la nécessité d'une infrastructure de capture efficace. Contrairement aux éoliennes terrestres ou maritimes qui exploitent des vents constants et puissants, une voiture est soumise à des vents relatifs variables en direction et en intensité. Des concepts académiques explorent l'utilisation de petites turbines aérodynamiques ou de systèmes de récupération d'énergie cinétique du vent généré par le mouvement du véhicule lui-même. L'énergie mécanique captée par ces mini-turbines est ensuite convertie en électricité par un générateur et stockée dans la batterie. Ce système pourrait potentiellement offrir une source d'énergie supplémentaire, notamment à des vitesses élevées ou lors de stationnement dans des zones venteuses, mais des recherches approfondies sont nécessaires pour optimiser leur rendement et leur intégration sans compromettre l'aérodynamisme et la sécurité du véhicule.

C) Système de récupération de l'énergie au freinage (régénératif)

La récupération d'énergie au freinage, ou freinage régénératif, est une technologie déjà largement éprouvée et intégrée dans les véhicules électriques et hybrides. Lors des phases de décélération ou de freinage, le moteur électrique, au lieu de consommer de l'énergie, fonctionne comme un générateur. L'énergie cinétique du véhicule, qui serait normalement dissipée sous forme de chaleur par les freins conventionnels, est convertie en énergie électrique. Cette électricité est ensuite stockée dans la batterie du véhicule. Ce système permet non seulement de recharger la batterie, augmentant ainsi l'autonomie du véhicule, mais aussi de réduire l'usure des plaquettes de frein traditionnelles. L'efficacité du freinage régénératif dépend de plusieurs facteurs, notamment la topographie de la route, le style de conduite et l'état de charge de la batterie. Des systèmes avancés incluent des stratégies de contrôle pour optimiser la récupération d'énergie en fonction des conditions de la route et du glissement des roues.

I.7 Conclusion

En somme, ce chapitre a permis de poser les bases nécessaires à la compréhension des véhicules électro-hybrides. L'étude des systèmes embarqués, des sources d'énergie renouvelables comme le solaire, l'éolien et freinage et des dispositifs de récupération d'énergie tel que : le freinage régénératif montre une évolution vers des technologies de plus en plus intelligentes, performantes et durables. Cette base théorique servira de socle à l'analyse et à la conception du système énergétique intégré que nous allons explorer dans le deuxième chapitre.

Chapitre II : Conception de la cyber cat

II.1 Introduction

Dans la continuité des fondements théoriques abordés précédemment, ce chapitre se consacre à la conception d'un système énergétique hybride innovant pour les véhicules électriques. Ce système combine intelligemment l'énergie photovoltaïque, l'énergie éolienne et la récupération d'énergie de freinage afin d'augmenter l'autonomie, l'efficacité énergétique et la durabilité du véhicule. Une attention particulière est portée à l'architecture globale du système, à la gestion de l'énergie, au stockage via batteries, ainsi qu'à l'implémentation de modèles de simulation sous MATLAB/Simulink, qui permettent d'optimiser la performance globale.

II.1.1 Véhicules Électriques

Le Cœur Battant de la Mobilité Durable Pour les véhicules électriques (VE), le système de batterie est ni plus ni moins le cœur battant du véhicule. C'est lui qui stocke l'énergie nécessaire pour alimenter le moteur électrique et, par extension, déterminer l'autonomie, la puissance et le temps de recharge du véhicule. Dans une "super voiture électrique" qui intègre des sources d'énergie renouvelable comme le solaire et l'éolien, la batterie est le point de convergence de toutes ces énergies. Elle doit être capable de gérer des cycles de charge et de décharge complexes, souvent rapides, et de maintenir une performance optimale sur de longues périodes. Les avancées dans les technologies de batteries, notamment les lithium-ion, ont été le catalyseur de la croissance fulgurante du marché des VE, rendant ces véhicules de plus en plus pratiques et performants.

II.1.2 Électronique Portable

L'Énergie à Portée de Main; L'essor des appareils électroniques portables est directement lié aux progrès des batteries. Des téléphones intelligents aux ordinateurs portables, en passant par les tablettes, les montres connectées et les écouteurs sans fil, la miniaturisation et l'amélioration de la densité énergétique des batteries ont permis de créer des appareils toujours plus puissants et autonomes. Sans des batteries compactes et performantes, la mobilité et la connectivité que nous connaissons aujourd'hui seraient impensables. Les batteries lithium-ion dominent ce secteur grâce à leur légèreté et leur capacité à stocker une grande quantité d'énergie dans un petit volume.

II.1.3 Systèmes de Stockage d'Énergie

Stabiliser le Réseau et Optimiser les Renouvelables, Les systèmes de stockage d'énergie (SSE) jouent un rôle de plus en plus crucial dans la transition énergétique mondiale. Ils permettent d'enregistrer l'énergie produite à partir de sources intermittentes comme le solaire et l'éolien, qui ne produisent de l'électricité que lorsque le soleil brille ou que le vent souffle. Cette énergie peut ensuite être libérée lorsque la demande est élevée ou que les sources renouvelables sont inactives, contribuant ainsi à la stabilité du réseau électrique [17]. Au niveau résidentiel, les SSE pour les

maisons équipées de panneaux solaires permettent aux propriétaires d'être plus autonomes en énergie, de réduire leurs factures et même de vendre l'excédent d'énergie au réseau. Ces systèmes, souvent à base de batteries lithium-ion de grande capacité, sont essentiels pour maximiser l'utilisation des énergies renouvelables et réduire la dépendance aux combustibles fossiles.

II.1.4 Autres Applications

Au-delà de ces applications majeures, les systèmes de batteries trouvent leur place dans une multitude d'autres domaines :

II.1.4.1 Applications industrielles

Robots mobiles, chariots élévateurs électriques, outils électriques sans fil, équipements de surveillance à distance.

Applications médicales: Défibrillateurs portables, pompes à perfusion, fauteuils roulants électriques et autres dispositifs médicaux nécessitant une alimentation fiable et portable.

Aérospatiale: Satellites, drones, équipements militaires portables où la fiabilité et la performance énergétique sont critiques.

Systèmes de secours et d'alimentation sans interruption (UPS): Assurant la continuité de l'alimentation électrique pour les serveurs informatiques, les hôpitaux ou les systèmes de sécurité en cas de panne de courant.

II.1.5 Véhicules Électriques

Pour les véhicules électriques (VE), le système de batterie est ni plus ni moins le cœur battant du véhicule. C'est lui qui stocke l'énergie nécessaire pour alimenter le moteur électrique et, par extension, déterminer l'autonomie, la puissance et le temps de recharge du véhicule. Dans une "super voiture électrique" qui intègre des sources d'énergie renouvelable comme le solaire et l'éolien, la batterie est le point de convergence de toutes ces énergies. Elle doit être capable de gérer des cycles de charge et de décharge complexes, souvent rapides, et de maintenir une performance optimale sur de longues périodes. Les avancées dans les technologies de batteries, notamment les lithium-ion, ont été le catalyseur de la croissance fulgurante du marché des VE, rendant ces véhicules de plus en plus pratiques et performants [6].

II.1.6 Électronique Portable

L'essor des appareils électroniques portables est directement lié aux progrès des batteries. Des téléphones intelligents aux ordinateurs portables, en passant par les tablettes, les montres connectées et les écouteurs sans fil, la miniaturisation et l'amélioration de la densité énergétique des batteries ont permis de créer des appareils toujours plus puissants et autonomes. Sans des batteries compactes et performantes, la mobilité et la connectivité que nous connaissons

aujourd'hui seraient impensables. Les batteries lithium-ion dominent ce secteur grâce à leur légèreté et leur capacité à stocker une grande quantité d'énergie dans un petit volume.

II.1.7 Systèmes de Stockage d'Énergie

Les systèmes de stockage d'énergie (SSE) jouent un rôle de plus en plus crucial dans la transition énergétique mondiale. Ils permettent d'enregistrer l'énergie produite à partir de sources intermittentes comme le solaire et l'éolien, qui ne produisent de l'électricité que lorsque le soleil brille ou que le vent souffle. Cette énergie peut ensuite être libérée lorsque la demande est élevée ou que les sources renouvelables sont inactives, contribuant ainsi à la stabilité du réseau électrique. Au niveau résidentiel, les SSE pour les maisons équipées de panneaux solaires permettent aux propriétaires d'être plus autonomes en énergie, de réduire leurs factures et même de vendre l'excédent d'énergie au réseau. Ces systèmes, souvent à base de batteries lithium-ion de grande capacité, sont essentiels pour maximiser l'utilisation des énergies renouvelables et réduire la dépendance aux combustibles fossiles.

II.1.8 Quelques Applications

Au-delà de ces applications majeures, les systèmes de batteries trouvent leur place dans une multitude d'autres domaines :

A. Applications industrielles: Robots mobiles, chariots élévateurs électriques, outils électriques sans fil, équipements de surveillance à distance.

B. Applications médicales: Défibrillateurs portables, pompes à perfusion, fauteuils roulants électriques et autres dispositifs médicaux nécessitant une alimentation fiable et portable.

C. Aéronautique: Satellites, drones, équipements militaires portables où la fiabilité et la performance énergétique sont critiques.

Alors on dit que systèmes de secours et d'alimentation sans interruption (UPS) Assurant la continuité de l'alimentation électrique pour les serveurs informatiques, les hôpitaux ou les systèmes de sécurité en cas de panne de courant.

II.2 Technique d'énergie

L'énergie photovoltaïque sera exploitée à l'aide de panneaux solaires installés sur le toit du véhicule, convertissant l'énergie solaire en électricité grâce à l'effet photovoltaïque. Cette énergie sera utilisée pour alimenter directement les moteurs électriques ou pour recharger les batteries en fonction des besoins. L'énergie éolienne, quant à elle, sera récupérée à travers de petites turbines aérodynamiques placées stratégiquement sur le véhicule, générant de l'électricité à partir du flux

d'air lorsque le véhicule est en mouvement. Enfin, l'énergie de freinage sera récupérée via un système de freinage régénératif, convertissant l'énergie cinétique du véhicule en électricité lors des décélérations, augmentant ainsi l'autonomie globale du système.

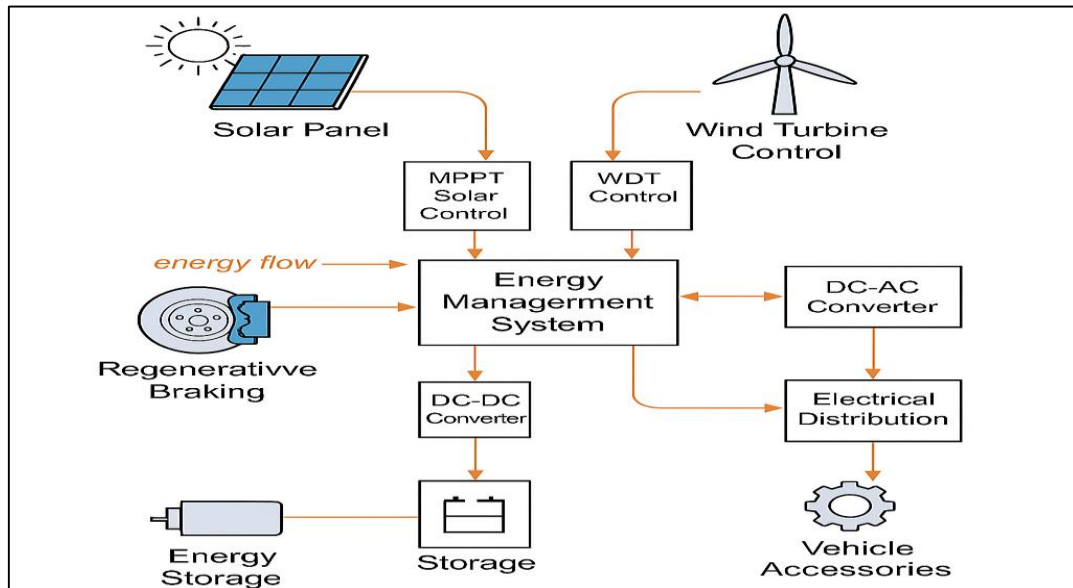


Figure II.1 : L'architecture du système global.

II.3 Système caculateur

Le système calculateur (ou unité de gestion d'énergie) sera chargé de surveiller, contrôler et optimiser la distribution de l'énergie entre les différentes sources. Il devra intégrer des algorithmes intelligents pour gérer efficacement les flux d'énergie, en tenant compte des conditions de conduite, des niveaux de charge des batteries et des prévisions météorologiques pour maximiser l'efficacité. Ce système sera également responsable de la communication entre les différentes composantes, comme les convertisseurs de puissance, les régulateurs de tension et les unités de stockage d'énergie, tout en assurant une protection contre les surcharges et les surchauffes [25].

II.4 Système Énergie- Batterie

Les batteries joueront un rôle central dans ce système, stockant l'énergie générée par les panneaux solaires, les turbines éoliennes et le freinage régénératif pour une utilisation ultérieure. Elles devront être capables de gérer des cycles de charge et de décharge fréquents, avec une capacité suffisante pour alimenter le véhicule sur de longues distances. Le système de gestion des batteries (BMS) sera crucial pour surveiller l'état de charge (SOC), l'état de santé (SOH) et la température des cellules, garantissant ainsi une performance optimale et une longue durée de vie des batteries [26].

II.5 Architecture complète du système énergétique pour véhicule

Le système énergétique proposé pour ce véhicule combine l'énergie photovoltaïque, l'énergie éolienne et l'énergie de freinage régénératif pour créer une solution durable et autonome. Cette architecture comprend plusieurs sous-systèmes interconnectés, chacun jouant un rôle essentiel dans la génération, le stockage et la gestion de l'énergie pour maximiser l'efficacité globale du véhicule.

II.5.1 Système de génération d'énergie

Le système de génération d'énergie est composé de trois principales sources :

II.5.1.1 Panneaux Photovoltaïques (PV)

Installés sur le toit et éventuellement sur d'autres surfaces extérieures du véhicule, les panneaux solaires convertissent la lumière du soleil en électricité grâce à l'effet photovoltaïque. Cette électricité est généralement en courant continu (DC) et peut être directement utilisée pour alimenter les moteurs électriques ou stockée dans les batteries.

II.5.1.2 Turbines Éoliennes Intégrées

De petites turbines aérodynamiques sont placées dans des zones de flux d'air élevé, comme les grilles frontales ou les passages de roues, pour convertir l'énergie cinétique du vent en électricité. Cette énergie est particulièrement efficace à haute vitesse ou dans des conditions venteuses.

II.5.1.3 Système de Récupération d'Énergie de Freinage

Ce système capture l'énergie cinétique du véhicule lors des décélérations et des freinages, la convertissant en électricité via des générateurs couplés aux roues ou aux moteurs électriques. Cette énergie est ensuite réinjectée dans le système de stockage pour augmenter l'autonomie du véhicule.

II.5.2 Système de Gestion de l'Énergie (EMS)

Le cœur de l'architecture est le système de gestion de l'énergie (EMS), qui surveille et contrôle l'ensemble des flux d'énergie. Il utilise des algorithmes intelligents pour décider en temps réel quelle source d'énergie est la plus appropriée en fonction des conditions de conduite, des niveaux de charge des batteries et des prévisions météorologiques. Ce système inclut également :

*- Convertisseurs DC/DC et DC/AC : Ils sont responsables de la conversion de l'électricité générée par les panneaux solaires, les turbines et les systèmes de freinage pour qu'elle soit compatible avec les moteurs électriques et les batteries.

*- Unités de Contrôle des Panneaux Solaires (MPPT) : Ces contrôleurs maximisent l'efficacité des panneaux solaires en ajustant leur point de fonctionnement pour capter le maximum de puissance, même dans des conditions d'éclairage variables.

*- Module de Gestion des Turbines : Gère l'activation et la désactivation des turbines en fonction de la vitesse du véhicule et des conditions de vent pour éviter la surcharge ou la résistance excessive.

II.5.3 Système de Stockage d'Énergie - Batterie

Les batteries sont le principal moyen de stockage d'énergie dans ce système. Elles doivent être robustes et capables de supporter des cycles de charge-décharge fréquents sans dégradation rapide. Le système de gestion des batteries (BMS) assure la surveillance continue de l'état de charge (SOC), de l'état de santé (SOH) et de la température des cellules pour garantir des performances optimales. Ce système inclut également des protections contre les surcharges, les décharges profondes et les surchauffes, avec des fonctionnalités comme :

*- Équilibrage des cellules : Pour maintenir une distribution uniforme de l'énergie entre les cellules, prolongeant ainsi leur durée de vie.

*- Isolation et Protection Thermique : Pour éviter les courts-circuits et les risques d'incendie en cas de surchauffe.

II.5.4 Système de Distribution et d'Utilisation d'Énergie

L'énergie stockée est distribuée vers les moteurs électriques pour la propulsion, ainsi que vers les systèmes auxiliaires du véhicule, comme les systèmes de climatisation, l'éclairage, et les équipements électroniques embarqués. Cette partie de l'architecture doit être conçue pour minimiser les pertes énergétiques et maximiser l'efficacité globale du véhicule.

II.5.5 Système de Surveillance et de Communication

Pour assurer un contrôle optimal, le système intègre une interface de communication entre les différents sous-systèmes. Cela permet au conducteur et au calculateur central de surveiller en temps réel les niveaux d'énergie, les performances des panneaux solaires, les vitesses des turbines et l'état des batteries. Ce système peut également être connecté à des plateformes en ligne pour le suivi à distance et l'analyse prédictive.

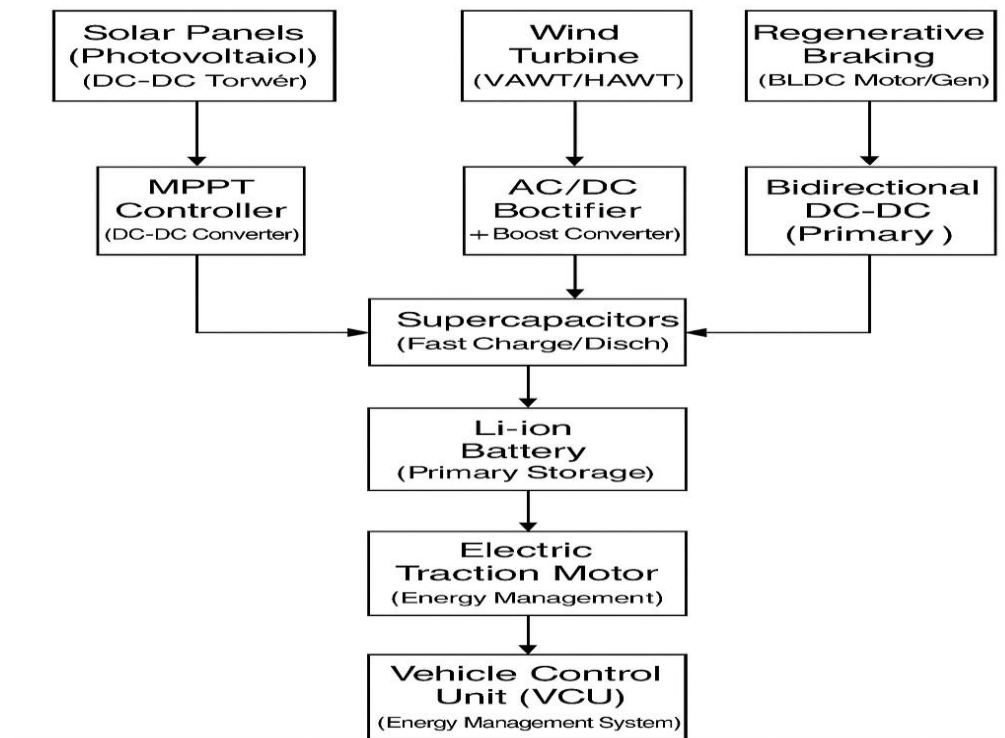


Figure II.2: Algorithme du système global.

II.6 Système de communication

MATLAB et Simulink offrent des outils puissants pour la conception et l'optimisation des architectures complexes de véhicules électriques (VE) en utilisant l'ingénierie des systèmes basée sur des modèles. Cette approche permet de développer des systèmes intégrés et optimisés pour améliorer l'efficacité et les performances des VE.

Les batteries, qui sont au cœur des véhicules électriques, peuvent être modélisées pour mieux comprendre leur comportement et concevoir des systèmes de gestion des batteries (BMS). Cela inclut la modélisation précise des paramètres de batterie pour garantir une utilisation sûre et efficace, ainsi que la gestion de l'énergie et des cycles de charge et de décharge.

Les systèmes de batterie à combustible (FCS) peuvent également être modélisés pour explorer leur dynamique et développer des systèmes de contrôle des batteries à combustible (FCCS). Ces systèmes sont essentiels pour les véhicules à hydrogène, offrant une alternative propre et efficace aux batteries classiques.

Les moteurs de traction, qui convertissent l'énergie électrique en énergie mécanique pour propulser le véhicule, peuvent être modélisés pour créer des unités de contrôle moteur (MCU)

performantes. Cela permet d'optimiser la dynamique du véhicule et de réduire les pertes énergétiques, améliorant ainsi l'autonomie et la réactivité.

Les algorithmes de contrôle peuvent être déployés, intégrés et testés de manière efficace, réduisant ainsi le temps de développement et les coûts associés. Cette étape est cruciale pour garantir la fiabilité et la robustesse des systèmes de contrôle en conditions réelles.

Les flux de travail basés sur les données et l'intelligence artificielle (IA) peuvent être utilisés pour accélérer le développement des véhicules électriques. L'IA permet de tirer parti des grandes quantités de données générées par les capteurs des véhicules pour optimiser les performances, la sécurité et l'efficacité énergétique.

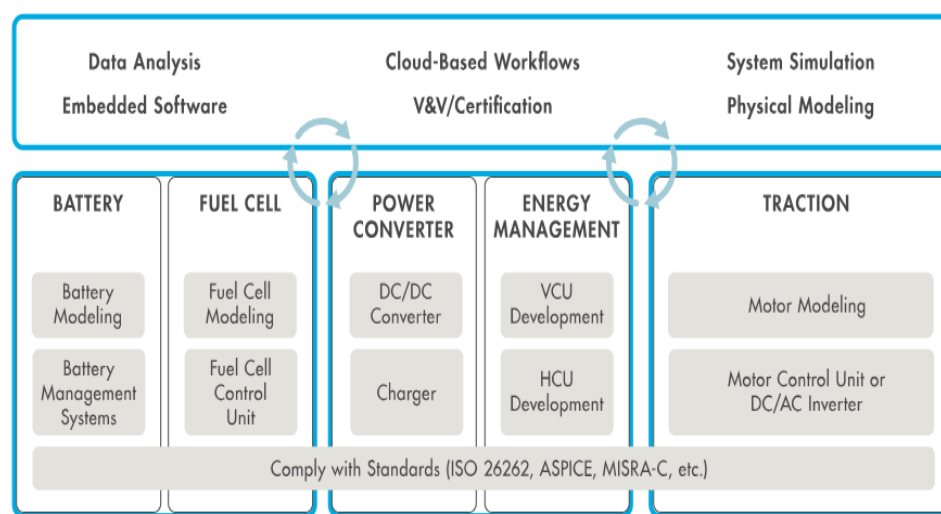


Figure II.3: L'architecture globale d'un système de gestion électro_hybride.

La figure II.3 présente une approche modulaire du développement de véhicules électriques, structurée autour de plusieurs blocs fonctionnels clés: Batterie, Pile à Combustible (Fuel Cell), Convertisseur de Puissance (Power Converter), Gestion de l'Énergie (Energy Management) et Traction. Chacun de ces modules représente un domaine d'ingénierie spécifique, avec des sous-composants ou des activités de développement dédiés. La présence de la "Pile à Combustible" en parallèle de la "Batterie" suggère une architecture potentiellement hybride ou à pile à combustible, où les deux sources d'énergie peuvent être utilisées pour alimenter le véhicule. Cette flexibilité souligne la capacité du système à s'adapter à différentes configurations de groupes motopulseurs propres.

*- Processus de Développement et Conformité aux Standards selon OMT

Au-dessus des modules fonctionnels respecter les normes de l'organisation mondial detransport (OMT), le diagramme met en évidence les activités de développement et les outils qui sous-tendent la conception et la validation de ces systèmes. Des éléments comme l'analyse de

données, le Logiciel Embarqué (Embedded Software), les Workflows Basés sur le Cloud, la Vérification et Validation/Certification (V&V/Certification) et la Simulation Système/Modélisation Physique sont représentés. Ceci indique une approche moderne de l'ingénierie des systèmes, s'appuyant sur des outils numériques avancés pour la conception, le test et l'optimisation. L'intégration de la simulation et de la modélisation physique dès les premières étapes du développement est cruciale pour prédire le comportement du système et identifier les problèmes potentiels avant la fabrication physique. La conformité aux standards tels que ISO 26262 (sécurité fonctionnelle automobile), ASPICE (amélioration des processus logiciels automobiles) et MISRA-C (directives de codage pour la sûreté du C) est explicitement mentionnée en bas du diagramme. Cela souligne l'importance primordiale de la sécurité, de la fiabilité et de la qualité logicielle dans le développement de véhicules électriques, en particulier pour les systèmes critiques comme la gestion de batterie et la traction.

II.6.1 Interconnexion et Flux d'Informations

Des flèches bidirectionnelles relient les niveaux supérieurs (processus de développement) aux modules inférieurs (composants fonctionnels), illustrant un flux d'informations et d'interactions constant. Par exemple, le "Logiciel Embarqué" et l'"Analyse de Données" sont essentiels pour le développement des "Systèmes de Gestion de Batterie" ou des "Unités de Contrôle Moteur". De même, les "Workflows Basés sur le Cloud" et la "V&V/Certification" sont appliqués à l'ensemble du système pour garantir sa robustesse et sa conformité. Cette interdépendance met en lumière la nature itérative et collaborative du développement, où les retours d'information et les résultats des simulations sont constamment utilisés pour affiner la conception de chaque composant. L'ensemble du diagramme dépeint un écosystème de développement intégré, visant à créer des véhicules électriques sûrs, performants et fiables.

II.7 Développement de l'architecture du système

Les véhicules électriques nécessitent une conception et une analyse au niveau du véhicule, impliquant l'intégration de systèmes multidomains. Avec MATLAB, Simulink et Simscape, on peut rapidement mettre en place des simulations complètes de véhicules électriques, incluant les moteurs, les générateurs et les composants de stockage d'énergie, en utilisant des applications de référence préconçues pour les configurations courantes de chaînes de traction. Ces applications offrent une base solide pour démarrer les projets de conception de véhicules électriques, réduisant ainsi le temps de développement et les coûts initiaux.

Dans la simulation avancée, on peut effectuer des analyses approfondies telles que l'évaluation des compromis d'architecture, le dimensionnement des moteurs et des batteries, ainsi que l'optimisation des paramètres de contrôle. Ces analyses sont essentielles pour garantir que

chaque composant fonctionne de manière optimale et en harmonie avec le reste du système, maximisant ainsi l'efficacité énergétique et la performance du véhicule.

L'intégration, l'analyse et les tests de systèmes multi domaines sont facilités grâce à un environnement unique, permettant de capturer l'architecture du système, les conceptions détaillées et les détails de mise en œuvre avec une traçabilité numérique à travers les différents modèles et étapes du processus de conception. Cette approche garantit la cohérence des modèles tout au long du cycle de développement, de l'architecture initiale à la validation matérielle en boucle , en passant par l'analyse et la simulation.

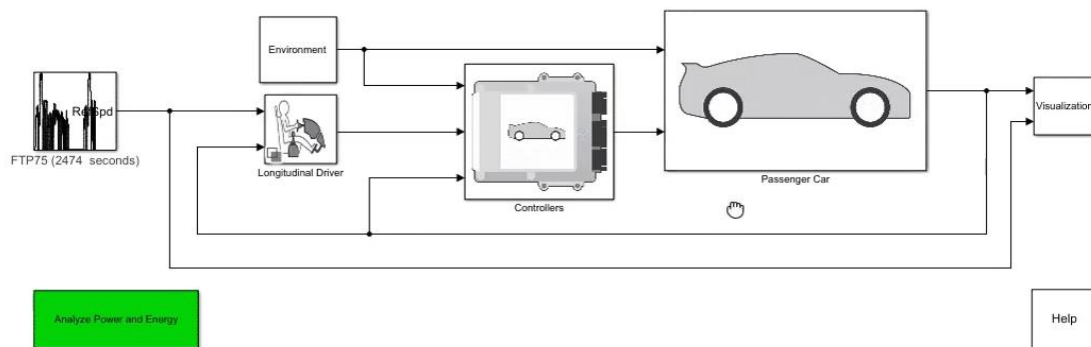


Figure II.4: Le système frein actif énergétique (actif).

La figure II.4 présente le système frein actif énergétique, elle représente en réalité un modèle de simulation de véhicule plus global, probablement un véhicule électrique ou hybride, dans un environnement de modélisation typique comme Simulink. Le système de freinage actif, s'il est intégré, serait une partie des contrôleurs ou des composants du véhicule, plutôt que le système global.

II.8.1 Architecture Générale du Modèle de Simulation

Figure II.4 illustre une chaîne de simulation complète pour évaluer les performances et l'efficacité énergétique d'une voiture particulière. Au départ, le bloc "FTP75 (2474 seconds)" indique l'utilisation d'un 'cycle de conduite standardisé', tel que le Federal Test Procedure 75 (FTP-75). Ce cycle de conduite est une séquence prédéfinie de vitesses et d'accélérations que le véhicule doit suivre, permettant de simuler un trajet urbain typique sur une durée de 2474 secondes. Ce cycle sert de référence pour évaluer la consommation d'énergie et les émissions du véhicule dans des conditions normalisées.

II.8.1.1 Interaction entre le Conducteur, l'Environnement et les Contrôleurs

Le signal du cycle de conduite est transmis à un bloc "Longitudinal Driver". Ce "conducteur longitudinal" représente l'algorithme qui simule les actions d'un conducteur réel, ajustant l'accélérateur et le frein pour que le véhicule suive la vitesse cible définie par le cycle de conduite. Il reçoit également des informations de l'Environnement (environnement), qui pourrait inclure des facteurs tels que la pente de la route, la résistance de l'air ou la température ambiante. Les sorties du "Longitudinal Driver" et de l'"Environnement" sont ensuite envoyées au bloc "Controllers". Ce bloc "Controllers" est le cerveau du véhicule, englobant tous les systèmes de commande : gestion du moteur électrique, gestion de la batterie, et très probablement, le 'système de freinage actif et énergétique'. C'est ici que les commandes de couple moteur et de freinage sont générées pour que le véhicule réponde aux exigences du conducteur simulé tout en optimisant la consommation d'énergie.

II.8.1.2 Le véhicule et la visualisation des résultats

Les commandes issues du bloc "Controllers" sont appliquées au modèle de "Passenger Car" (voiture particulière), qui représente la dynamique physique du véhicule. Ce modèle de voiture calcule le mouvement du véhicule en réponse aux forces motrices et de freinage, ainsi qu'aux résistances externes (aérodynamique, roulement). Les données de sortie du "Passenger Car" (vitesse, consommation d'énergie, etc.) sont ensuite transmises au bloc "Visualization" (visualisation), qui permet d'afficher les résultats de la simulation sous forme de graphiques ou d'animations, facilitant ainsi l'analyse des performances. Le bloc "Analyze Power and Energy" (Analyser la puissance et l'énergie) en bas à gauche souligne que l'objectif principal de cette simulation est l'évaluation de l'efficacité énergétique et de la consommation de puissance du véhicule sur le cycle de conduite donné.

II.8 Modélisation du système de gestion de Batteries "BMS"

La modélisation précise des batteries est essentielle pour anticiper et optimiser le développement des batteries et des systèmes de gestion des batteries (BMS) dans des conditions variées de charge-décharge et d'environnement. Avec MATLAB, Simulink et Simscape, on peut créer des modèles de batteries réalistes, prenant en compte les caractéristiques électriques et thermiques pour mieux prévoir leur comportement et prolonger leur durée de vie.

On peut modéliser et simuler des batteries en utilisant des circuits équivalents, tout en augmentant la précision grâce à des topologies de circuits plus complexes. Cette approche permet de capturer les non-linéarités, les effets thermiques, l'état de charge (SOC), l'état de santé (SOH) et les phénomènes de dégradation des batteries, offrant ainsi une vision plus complète de leur performance.

En parallèle, le développement des BMS est facilité grâce à des outils pour créer la logique de contrôle, générer automatiquement du code et réaliser des simulations en boucle fermée pour les flux de travail conformes à AUTOSAR et aux certifications industrielles. Cela permet de valider les stratégies de gestion des batteries dès les premières phases du développement, réduisant les risques et les coûts.

Les BMS conçus avec ces outils peuvent inclure des fonctionnalités critiques telles que la surveillance des tensions et des températures, la protection thermique et contre les surcharges, ainsi que l'équilibrage et l'isolation des cellules. Ces fonctions sont essentielles pour garantir la sécurité et la fiabilité des batteries dans des applications exigeantes, comme les véhicules électriques et les systèmes de stockage d'énergie.

II.9 Modélisation et développement des systèmes de contrôle de batteries à combustible

La modélisation précise des systèmes à batterie à combustible (FCS), comme les batteries à membrane échangeuse de protons (PEM), est cruciale pour anticiper le développement des FCS et des systèmes de contrôle des batteries à combustible (FCCS) dans des conditions de fonctionnement et d'environnement variées. Avec MATLAB, Simulink et Simscape, on peut créer des modèles réalistes pour mieux comprendre et optimiser le fonctionnement des batteries à combustible, en intégrant des principes électrochimiques ou des données expérimentales pour capturer le comportement dynamique des cellules.

Les batteries à combustible PEM peuvent être modélisées à partir de principes fondamentaux, basés sur l'électrochimie, ou en utilisant des données expérimentales pour reproduire des phénomènes complexes comme la production d'électricité à partir de réactions chimiques, les échanges de chaleur et la gestion des flux de gaz. Cette approche permet de simuler les performances, la consommation de carburant et les effets thermiques des véhicules électriques à batterie à combustible (FCEV), contribuant à l'amélioration de leur efficacité énergétique et de leur autonomie.

Le développement des FCCS est également simplifié grâce à des outils pour créer la logique de contrôle, générer automatiquement du code et valider les systèmes en boucle fermée, tout en respectant les normes AUTOSAR et les exigences de certification. Cette intégration permet de réduire les délais de développement et de garantir la conformité aux standards industriels.

Ces systèmes peuvent intégrer des fonctionnalités critiques telles que la surveillance du courant, de la tension et de la puissance, ainsi que la gestion thermique, essentielles pour assurer la sécurité, la fiabilité et la longévité des batteries à combustible dans des applications exigeantes comme les véhicules électriques et les systèmes de production d'énergie verte.

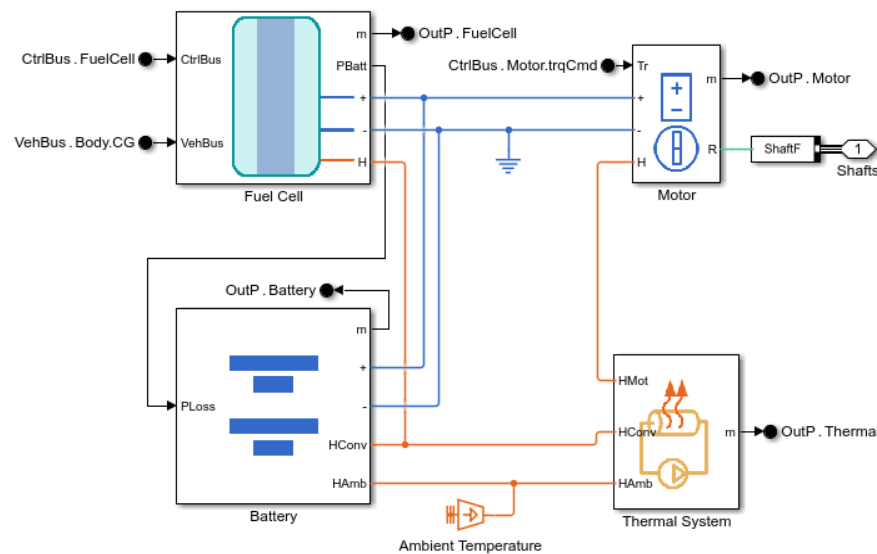


Figure II.5 : Schéma présentant le fonctionnement du système de frein énergétique.

La figure II.5 illustre une architecture de véhicule où l'énergie est principalement fournie par une Pile à Combustible (Fuel Cell) et une Batterie. Ces deux sources d'énergie sont connectées en parallèle et alimentent un Moteur électrique, qui à son tour entraîne les Arbres de transmission (Shafts) du véhicule. Un Système Thermique (Thermal System) est également intégré, soulignant l'importance de la gestion de la chaleur générée par les composants clés du système. Des bus de contrôle (CtrlBus) et des bus de données véhicule (VehBus) sont représentés, indiquant les flux d'informations de commande et d'état entre les différentes unités.

1. Pile à Combustible (Fuel Cell): Ce bloc reçoit des signaux de contrôle via "CtrlBus.FuelCell" et des informations sur le véhicule via "VehBus.Body/CG". Il produit une puissance électrique ("OutP.FuelCell") et génère de la chaleur ("H") qui est ensuite gérée par le système thermique. La puissance de la pile à combustible peut également charger la batterie, comme le suggère la connexion.

2. Batterie : Le bloc "Battery" reçoit la puissance de la pile à combustible et potentiellement d'autres sources. Il est caractérisé par des pertes de puissance ("PLoss") et une génération de chaleur ("HConv" et "HAmb") due à son fonctionnement. La batterie est chargée et déchargée pour compléter la pile à combustible et fournir l'énergie nécessaire au moteur, ou stocker l'énergie du freinage régénératif (bien que le flux de retour ne soit pas explicitement dessiné, il est implicite dans un tel système). Une sortie de puissance ("OutP.Battery") est fournie au bus électrique commun.

3. Moteur: Le bloc "Motor" reçoit des commandes de couple ("CtrlBus.Motor.TrqCmd") et est alimenté par la puissance électrique combinée de la pile à combustible et de la batterie. Il convertit cette énergie électrique en énergie mécanique pour entraîner les arbres de transmission ("ShaftF" et "Shafts"). Le moteur génère également de la chaleur ("HMot") qui est acheminée vers le système thermique.

A) Système Thermique (Thermal System)

Ce composant centralise la gestion de la chaleur de tous les autres éléments. Il reçoit les entrées de chaleur de la pile à combustible ("H"), de la batterie ("HConv", "HAmb") et du moteur ("HMot"). Il prend également en compte la "Température Ambiante (Ambient Temperature)". Le système thermique est crucial pour maintenir les composants à des températures de fonctionnement optimales, garantissant ainsi leur efficacité, leur durée de vie et leur sécurité. La sortie "OutP.Thermal" représente potentiellement le flux de chaleur dissipée ou gérée.

B) Interconnexions et Flux d'Énergie/Information

Les lignes bleues et oranges représentent les flux d'énergie et de chaleur. Les lignes bleues indiquent les connexions électriques entre la pile à combustible, la batterie et le moteur, formant un bus électrique commun. Les lignes oranges indiquent les flux de chaleur vers le système thermique. Les lignes fines représentent les signaux de commande et les informations. L'ensemble du diagramme montre une architecture énergétique complexe où la pile à combustible et la batterie travaillent de concert (probablement dans une configuration hybride série ou parallèle) pour alimenter le véhicule, tandis que le système thermique gère la dissipation de la chaleur pour assurer le bon fonctionnement de l'ensemble. Cette modélisation permet d'étudier l'efficacité globale du système, l'impact des différentes stratégies de gestion d'énergie (EMS) et l'optimisation des performances thermiques.

II.10 Types de Batteries pour Véhicules Électriques et Leurs Applications

Le choix de la technologie de batterie est crucial pour la performance, l'autonomie et le coût d'une super voiture électrique. Chaque type a ses propres caractéristiques en termes de densité énergétique, de puissance, de durée de vie et de sécurité.

A. Batteries au Plomb

Historiquement, les batteries au plomb-acide (ou "batteries au plomb") ont été et sont toujours largement utilisées. On les trouve principalement dans les véhicules automobiles comme batteries de démarrage pour les moteurs à combustion interne, où elles fournissent un courant élevé sur de courtes périodes. Elles sont également prévalentes dans les systèmes de secours (onduleurs,

alimentations sans interruption) en raison de leur faible coût, de leur robustesse et de leur capacité à fournir des courants importants. Cependant, pour une application de traction dans un véhicule électrique moderne, leurs limitations sont significatives : une faible densité énergétique (elles sont lourdes et volumineuses pour l'énergie qu'elles stockent) et une durée de vie relativement courte lorsqu'elles sont soumises à des cycles de décharge profonde fréquents. Elles ne sont donc pas adaptées aux besoins d'une super voiture électrique axée sur la performance et l'autonomie [41].

B. Batteries au Lithium-ion

Les batteries au lithium-ion (Li-ion) sont devenues le standard incontournable pour les véhicules électriques et l'électronique portable (smartphones, ordinateurs portables). Leur popularité repose sur plusieurs avantages clés :

C. Haute Densité Énergétique

Elles peuvent stocker beaucoup plus d'énergie par unité de poids ou de volume par rapport aux batteries au plomb, ce qui est essentiel pour maximiser l'autonomie des véhicules électriques.

1. **Densité de Puissance Élevée:** Elles peuvent délivrer et accepter des courants élevés, permettant des accélérations rapides et une récupération d'énergie efficace lors du freinage régénératif.

2. **Longue Durée de Vie:** Elles supportent un grand nombre de cycles de charge/décharge, ce qui est vital pour la durabilité d'un véhicule.

D. Faible Taux d'Auto décharge: Elles conservent leur charge plus longtemps lorsqu'elles ne sont pas utilisées.

Il existe différentes chimies au sein de la famille Li-ion, comme le NMC (Nickel Manganèse Cobalt), le LFP (Lithium Fer Phosphate) ou le NCA (Nickel Cobalt Aluminium), chacune offrant un compromis différent entre densité énergétique, sécurité, coût et durée de vie. Les progrès continus dans cette technologie sont la clé de l'évolution des véhicules électriques.

II.11 Autres Technologies

Bien que moins dominantes pour les véhicules électriques modernes, d'autres technologies de batteries ont eu leur rôle ou sont toujours en développement :

A. Nickel-Cadmium (Ni-Cd): Autrefois utilisées dans l'électronique portable, elles sont aujourd'hui moins courantes en raison de l'effet mémoire (perte de capacité si non déchargées complètement avant recharge) et de la toxicité du cadmium. Elles offrent une bonne densité de puissance mais une densité énergétique limitée.

B. Nickel-Métal-Hydrure (Ni-MH): Ces batteries ont remplacé les Ni-Cd dans de nombreuses applications et sont encore utilisées dans certains véhicules hybrides (comme les premières Toyota Prius). Elles offrent une meilleure densité énergétique que les Ni-Cd et sont moins toxiques, mais restent en deçà des performances des Li-ion pour les véhicules entièrement électriques.

C. Technologies Émergentes: La recherche continue d'explorer des alternatives prometteuses telles que les batteries à l'état solide (qui promettent une densité énergétique encore plus élevée et une sécurité améliorée), les batteries lithium-soufre, ou d'autres chimies comme les batteries sodium-ion. Ces technologies pourraient à terme offrir des avancées significatives pour les futures générations de véhicules électriques.

II.12 Conclusion

Ce chapitre a permis de détailler l'architecture complète du système énergétique hybride proposé, en montrant l'interaction cohérente entre les sources d'énergie, le système de gestion centralisé, et les dispositifs de stockage. La modélisation numérique et la simulation ont permis de valider la faisabilité technique et de préfigurer les performances du véhicule dans différents scénarios. Ce système représente une avancée concrète vers une mobilité propre, intelligente et plus autonome, répondant aux défis énergétiques et environnementaux actuels.

Chapitre III : Simulation et interprétation des résultats

III.1 Introduction

Dans le contexte de la traction électrique, l'efficacité énergétique de l'ensemble de la transmission est primordiale. En effet, la machine électrique doit offrir un rendement élevé et un couple avec de faibles ondulations en régime établi sur toute la plage de vitesses. La chaîne de traction du véhicule électrique (Voir figure III.1) est composée d'une machine électrique reliée mécaniquement à la charge du véhicule par l'intermédiaire d'une transmission différentielle.

L'alimentation de la machine électrique est assurée par un convertisseur de puissance associé à une série de batteries [48]. La propulsion du véhicule est assurée par le conducteur via la pédale d'accélération et la pédale de frein mécanique. Les positions de ces deux pédales sont transmises à l'unité de contrôle afin de fournir les couples de références en mode moteur et en mode génératrice (freinage de récupération). En effet, les machines électriques utilisées pour la traction de véhicules sont contrôlées avec le couple. Dans le cas d'une machine synchrone et asynchrone, ce couple est lisse, tandis que, dans la machine à réluctance variable, ce couple est ondulatoire en raison de la forme saillante du rotor. Une ondulation de couple élevé entraîne donc un bruit acoustique et dégrade les performances de la chaîne de traction électrique ainsi que le confort du conducteur.

La figure III.1 illustre la chaîne de traction d'un véhicule électrique, mettant en évidence l'interaction entre la machine électrique, la transmission et l'unité de contrôle. Cette configuration permet une gestion optimisée du couple moteur selon la demande du conducteur via les pédales. L'algorithme de commande intégré dans l'unité centrale assure une transition fluide entre les phases de traction et de récupération d'énergie, tout en minimisant les pertes d'énergie mécanique et en maximisant l'autonomie du véhicule.

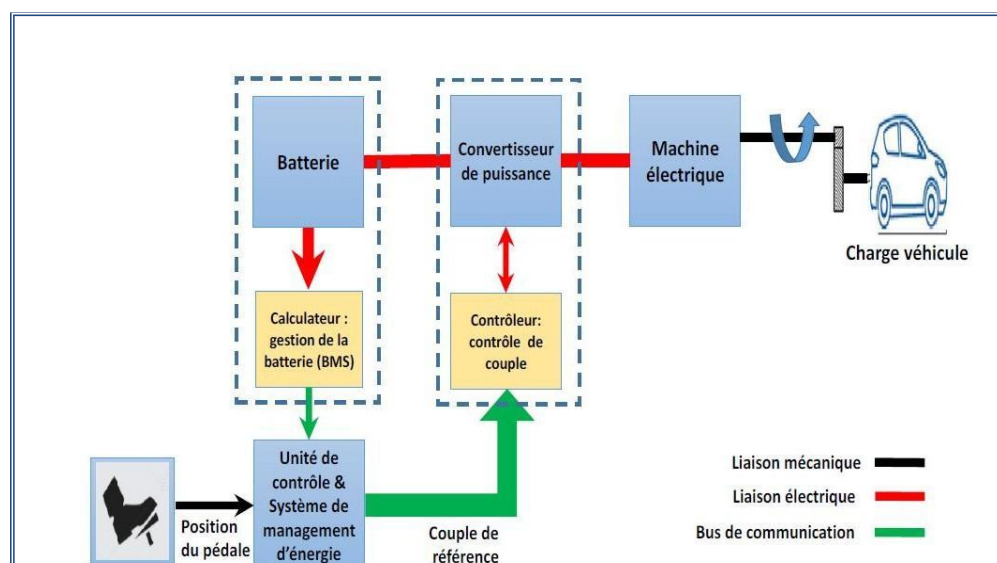


Figure III.1: La chaîne de traction du véhicule électrique.

III.2 Alimentation de la MRV

La conception et le dimensionnement de la **machine à réluctance variable** sont indissociables de ceux de leurs convertisseurs. En effet, les exigences imposées à la puissance pour l'application de traction électrique sont souvent celles de la simplicité et de la réduction des coûts tout en maintenant les critères de performance, de couple et de vitesse. Il existe plusieurs topologies de convertisseurs destinés à l'alimentation des MRV. Nous détaillerons les plus utilisées dans cette section [2].

III.2.1 Convertisseurs en demi-pont asymétriques

Contrairement aux machines synchrones et asynchrones, le sens du couple de la machine à réluctance variable ne dépend pas du signe du courant. C'est pourquoi l'utilisation du convertisseur unidirectionnel est possible pour alimenter cette machine.

La structure du convertisseur unidirectionnel la plus citée dans la littérature est la structure asymétrique à demi pont [49], dans laquelle un hacheur de tension alimente chaque phase. Chaque hacheur est considéré comme un bras du convertisseur composé de deux transistors et de deux diodes (roue libre ou récupération selon le type de commande des transistors). Pour une machine de " m " phases, la structure du convertisseur est représentée sur la figure III.1 [3].

La figure III.2 représente le convertisseur demi-pont asymétrique montre une structure électronique utilisée pour alimenter la machine à réluctance variable (MRV). Cette configuration est constituée de deux transistors et deux diodes par phase, permettant un contrôle indépendant des phases. L'analyse des séquences de conduction démontre la possibilité d'optimiser la magnétisation et la démagnétisation des phases pour maximiser le couple moteur et limiter les pertes énergétiques, ce qui est crucial pour une application dans les véhicules électriques.

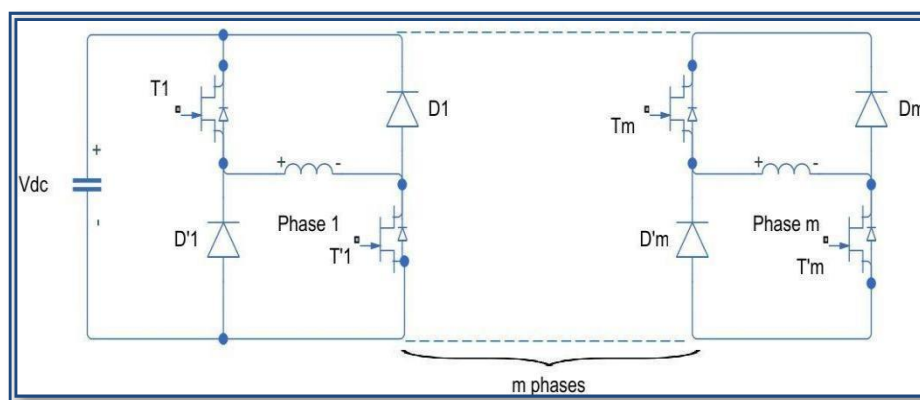


Figure III.2: Schéma de la structure générale du convertisseur en demi-pont asymétrique.

Le fonctionnement d'un seul bras du convertisseur est décrit dans le tableau suivant:

Cas	T_1	T_1	Tension de la phase
1	Conducteur	Conducteur	$+V_{dc}$ (phase de magnétisation)
2	Bloqué	Conducteur	0 (phase de roue libre)
3	Conducteur	Bloqué	0 (phase de roue libre)
4	Bloqué	Bloqué	$-V_{dc}$ (phase de démagnétisation)

Tableau III.1: Séquences de conduction du convertisseur à demi pont asymétrique.

Ce type de convertisseur rend la machine plus fiable grâce à sa possibilité d'alimenter indépendamment les phases. De plus, cette structure permet l'alimentation du MRV dans les quatre quadrants du plan couple-vitesse et peut fonctionner dans une grande gamme de vitesse

III.2.2 Convertisseur de Miller (Topologie m+1)

Une autre solution utilisée pour alimenter le MRV est le convertisseur de Miller (figure III.3). Cette structure présente l'avantage d'un nombre réduit d'interrupteurs (" $m + 1$ " pour un convertisseur de " m " phases) et d'un prix réduit [4].

Le convertisseur de Miller présenté dans cette figure est une alternative au convertisseur asymétrique, réduisant le nombre de composants à $m+1$ interrupteurs pour m phases. Cette simplification diminue le coût et l'espace requis, mais au détriment du contrôle indépendant de chaque phase. Cette figure illustre comment cette architecture est particulièrement adaptée pour les applications à coût réduit, tout en maintenant des performances convenables dans un contexte de traction électrique.

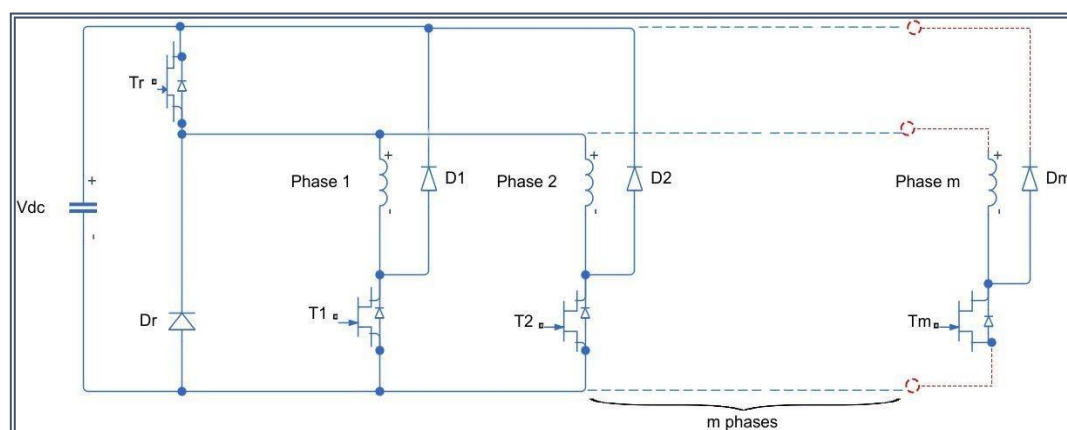


Figure III.3: Schéma de la structure générale du convertisseur de Miller.

Le convertisseur de Miller a été développé sur la base du celui à demi-pont asymétrique avec l'idée principale de réduire le nombre de composants. La partie inférieure du convertisseur est identique au convertisseur à demi-pont asymétrique, les commutateurs supérieurs étant remplacés par un seul dispositif commun à tous les bras. La phase à activer est sélectionnée à l'aide des commutateurs inférieurs $\square\square_1, \square\square_2, \dots, \square\square_n$, dans la mesure où le commutateur supérieur Tr connecte l'autre extrémité de l'enroulement sous tension. Pour une phase j , les quatre états de fonctionnement sont résumés dans le tableau [5].

Cas	Tr	Ti	Tension de la phase
1	Conducteur	Conducteur	$+V_{dc}$ (phase de magnétisation)
2	Bloqué	Conducteur	0 (phase de roue libre)
3	Conducteur	Bloqué	0 (phase de roue libre)
4	Bloqué	Bloqué	$-V_{dc}$ (phase de démagnétisation)

Tableau III.2: Séquences de conduction du convertisseur de Miller.

III.2.3 Convertisseur à dissipation passive « R—Dump »

C'est un convertisseur avec un seul commutateur par phase. Sa structure est simple et peu coûteuse. Cependant, cette structure a un faible rendement en raison de l'utilisation d'une résistance "R" pour accélérer la dissipation d'énergie. La capacité "Cr" a pour rôle de fournir la tension nécessaire au blocage de la diode T1 lors de la conduction du transistor T'1. La structure générale du convertisseur R Dump.

La figure III.4 du convertisseur R-Dump montre une structure simplifiée avec une résistance de dissipation d'énergie. Bien qu'économique et compacte, ce type de convertisseur engendre un rendement moindre à cause des pertes thermiques dans la résistance. Cette figure permet de comprendre pourquoi ce convertisseur est rarement utilisé dans les applications haute performance comme les véhicules électriques.

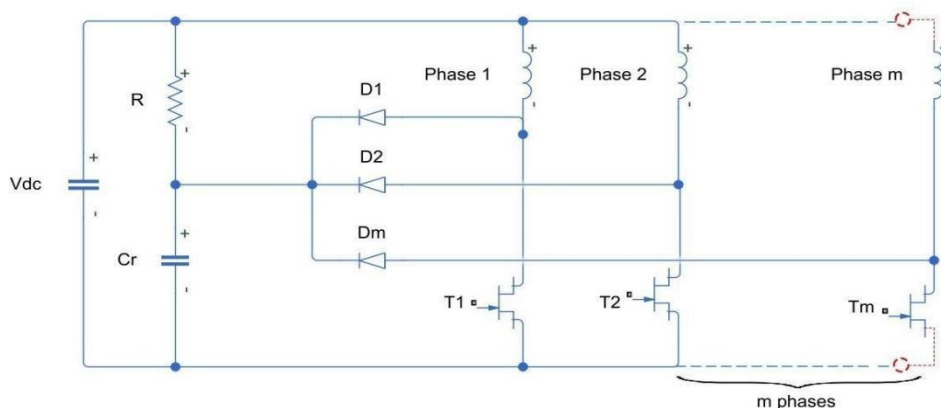


Figure III.4 : Schéma de la structure générale du convertisseur à dissipation passive « R-Dump ».

Ce convertisseur a deux modes de fonctionnement indiqués dans le tableau III.3 suivant :

Cas	Tj	Tension de la phase
1	Conducteur	$+V_{dc}$ (phase de magnétisation)
2	Bloqué	$V_{dc} - V_{cr}$ (phase de démagnétisation)

Tableau III.3 : Séquences de conduction du convertisseur à dissipation passive « R Dump »

III.2.4 Comparaison des trois convertisseurs pour l'alimentation du MRV

Une comparaison qualitative de trois convertisseurs en fonction des critères spécifiques pour la traction électrique est résumée dans le tableau [7].

Convertisseur Critère	R-Dump	Miller	Demi-ponts asymétriques
Indépendance entre les phases	Complet	Partiel	Complet
Fonctionnement en roue libre	Permis	Permis	Permis
Nombre d'interrupteur	M	m+1	2 x m
Performance	Moyenne	Bien	Très bien
Contrôle	Simple	Complexe	Simple
Rendement	Faible	Élevé	Élevé
Tolérance aux défauts	Faible	Faible	Haute

Tableau III.4: Comparaison des trois convertisseurs pour l'alimentation du MRV.

Cette étude montre que le convertisseur demi-ponts asymétriques est le mieux adapté pour l'alimentation de la machine à réluctance variable pour une application à la traction électrique. Malgré le nombre de transistors est relativement grand, ce type de convertisseur offre plus d'avantages que les autres convertisseurs, tels que son contrôle simple, sa robustesse et ses performances élevées. Le tableau III.5 ci-dessous résume les avantages et les inconvénients de chaque type de convertisseur [8].

Type de convertisseur	Avantages	Inconvénients
Demi-ponts asymétriques	Contrôle indépendant des phases ; Idéal pour les hautes performances en courant et en couple ; Permet une grande flexibilité dans le contrôle du courant de la machine; La tension des transistors est limitée à V_{max} Performances de fonctionnement identiques Dans les quatre quadrants.	Pertes dans les transistors; Commande complexe.
Miller	Convertisseur compact; Coût non élevé grâce au nombre réduit de transistors et de diodes.	Perte du contrôle indépendant des phases; Robustesse faible.
R-Dump	Convertisseur très compact; Coût moins élevé (un transistor par phase)	Pertes de puissance élevées ; Démagnétisation lente.

Tableau III.5 : Avantages et inconvénients de chaque type du convertisseur.

III.2.5 Commande classique PI

Dans cette section, nous nous intéressons à la commande classique PID pour la synthèse des régulateurs de vitesse. Cette régulation est très connue par les industriels pour sa simplicité, sa robustesse ainsi que sa facilité d'implémentation. Pour la machine à réluctance variable de la chaîne de traction des VE, les régulateurs choisis est de type PI pour les boucles de régulation en cascade vitesse dont le signal de commande est donné par :

$$U_c(t) = k_p \cdot e(t) + k_i \int e(t) \tau \quad (III.1)$$

Où $e(t)$ est l'erreur entre la consigne et la mesure de la variable à contrôler. Les termes K_p et K_i sont respectivement les gains proportionnel et intégral. Le calcul de ces gains pour la boucle de vitesse est basé sur le modèle du MRV ou nous allons utiliser l'équation mécanique pour le régulateur PI vitesse [9].

III.3. L'effet de la résistivité

La résistivité des matériaux joue un rôle crucial dans le rendement des systèmes de conversion d'énergie, qu'ils soient photovoltaïques, éoliens ou basés sur la récupération d'énergie de freinage. Dans les panneaux photovoltaïques, une résistivité élevée des matériaux conducteurs entraîne des pertes ohmiques au niveau des connexions et des cellules solaires, réduisant ainsi le courant généré et par conséquent la puissance électrique produite. De même, dans les générateurs éoliens, une mauvaise conductivité des bobinages ou des circuits de distribution interne peut provoquer un échauffement et une diminution de l'efficacité de la conversion de l'énergie mécanique en électricité. Enfin, pour l'énergie de freinage (généralement récupérée sous forme d'énergie cinétique convertie en énergie électrique), des pertes par effet Joule dues à une résistivité excessive dans les circuits de récupération limitent la quantité d'énergie pouvant être stockée ou réutilisée. Une gestion optimisée de la résistivité des matériaux utilisés dans ces systèmes est donc essentielle pour maximiser les performances globales de la production et de la récupération d'énergie [10].

III.4 Générateur éolien

Un système éolien ou un aérogénérateur ou encore une éolienne peut être défini comme étant : un système composé d'éléments aptes à transformer une partie de l'énergie cinétique du vent (fluide en mouvement) en énergie mécanique puis en énergie électrique.

La plupart des aérogénérateurs commerciaux, surtout les grands, sont à axe horizontal. La part de marché représentée par les systèmes à axe vertical est minuscule. Les aérogénérateurs de grande taille sont parfois construits isolément ou rassemblés en groupes (parcs d'éoliennes) comportant dix éléments ou plus, parfois même des centaines.

Les différents éléments d'une éolienne sont conçus d'une manière à maximiser la conversion énergétique, pour cela, une bonne adéquation entre les caractéristiques couple/vitesse de la turbine et de la génératrice électrique est nécessaire [11].

III.4.1 l'avantage de générateur éolien

L'utilisation d'un générateur éolien sur une voiture électrique présente plusieurs avantages, principalement liés à la production d'énergie verte et à la réduction de l'empreinte carbone. En combinant les technologies éoliennes et électriques, on peut augmenter l'autonomie et la durabilité de la voiture tout en réduisant la dépendance aux énergies fossiles.

III.4.2 Types d'aérogénérateur dans les systèmes éoliens

La conversion de l'énergie mécanique du vent en énergie électrique est assurée par l'aérogénérateur, élément central d'un système éolien. Le choix du générateur électrique utilisé est déterminant et permet d'identifier plusieurs types d'aérogénérateurs. On distingue principalement les générateurs à vitesse fixe et les générateurs à vitesse variable. Les aérogénérateurs à vitesse fixe, généralement équipés de générateurs asynchrones à cage d'écureuil, fonctionnent à une vitesse de rotation constante, ou très proche de constante, quelle que soit la vitesse du vent. Ils sont robustes et simples, mais leur rendement n'est optimal que pour une plage de vent limitée. Ils sont souvent connectés directement au réseau, ce qui peut générer des fluctuations de puissance et de tension.

III.4.2.1 Générateur asynchrone

C'est une machine à induction asynchrone qui transforme de l'énergie mécanique en énergie électrique. Pour réaliser la génération de l'énergie électrique la machine doit être entraînée au-delà de la vitesse de synchronisme (variable suivant la charge) le cas d'une génératrice à cage d'écureuil. Son rotor peut être à cage d'écureuil ou bobinée. La puissance nécessaire à sa magnétisation est fournie par le réseau lorsqu'elle est couplée en parallèle ou par une batterie de condensateurs dans le cas d'une utilisation isolée. Pour les petites puissances, le rotor est à cage d'écureuil, pour des puissances plus importantes, le rotor est bobiné, relié à l'extérieur via un collecteur simplifié à trois bagues, et court-circuité en fonctionnement normal. Mais on peut aussi modifier les propriétés électromécaniques du générateur en agissant sur le rotor par ces connexions « Machine Asynchrone Double Alimentée MADA ».

Cependant, pour les machines asynchrones à cages, il faut néanmoins fournir la puissance de magnétisation "puissance réactive" correspondant à une composante du courant réactif. Ce courant peut être emprunté au réseau mais peut aussi bien être obtenu de façon statique en branchant en parallèle à la machine une batterie de condensateurs. En outre, en ajustant ces condensateurs de façon précise, il est possible, dans certaines conditions, d'utiliser une génératrice asynchrone en dehors d'un réseau, en fonctionnement autonome, pour alimenter une charge isolée. Son emploi est réservé aux générateurs de puissance moyenne dont l'arbre d'entraînement tourne à des vitesses fortement variables : mini centrale hydraulique, éolienne, turbine ou moteur à gaz de récupération, certains groupes électrogènes, ... etc.

Les machines asynchrones à rotor bobiné permettent, par un réglage dynamique du glissement, de s'adapter aux variations de puissances fournies par la turbine. La partie mécanique peut généralement subir les variations brutales du régime de vent, ce type de contraintes devient inacceptable pour les fortes puissances. La variation de vitesse devient donc de plus en plus

justifiée à mesure qu'on augmente la puissance de l'éolienne [13].

III.4.2.2 Générateur synchrone

La génératrice synchrone (ou alternateur) n'a pas besoin de magnétisation extérieure pour créer son champ magnétique. Celui-ci est créé par des bobines ou par des aimants permanents, placés sur le rotor tournant induisant un courant dans le stator bobiné. Cette génératrice étant indépendante du réseau, elle fournit une fréquence variable en fonction de la vitesse de rotation, donc de la vitesse du vent. Le raccordement au réseau, qui lui exige une fréquence fixe, s'effectue par un convertisseur qui comporte un étage redresseur, un bus continu et un onduleur : on reconstruit donc une onde sinusoïdale parfaite, ce qui permet aussi de gérer plus facilement la qualité de l'énergie produite.

La régulation de puissance s'effectue en partie au niveau de ce convertisseur. Elle permet un fonctionnement à vitesse variable, donc à rapport d'avance constant et rendement optimal. Elle permet aussi de limiter les efforts dynamiques en autorisant le rotor à accélérer en cas de forte rafale (stockage d'une partie de l'énergie cinétique du vent dans l'inertie du rotor). Plus complexe à construire et plus chère (aimants permanents, convertisseur), la génératrice synchrone est relativement peu utilisée [14].

III.4.2.3. Génératrice électrique à courant continu

La génératrice à courant continu (à excitation séparée) est une machine tournante qui transforme de l'énergie mécanique en énergie électrique apparaissant sous forme de tension et courant continu. Elle comporte deux circuits bobinés :

L'un est un circuit inducteur, porté par le stator, et il crée un champ de direction fixe sous les pôles de la machine ; il est pour cela appelé « circuit de champ » ou encore « Circuit d'excitation », et l'autre est un circuit induit ou circuit d'armature, porté par l'armature du rotor ; il crée des forces électromotrices induites 'F.E.M'. Ce résultat illustre le contrôle d'un onduleur photovoltaïque (PV) monophasé triphasé à l'aide d'un bloc de commande solaire PV (triphasé). Dans une centrale solaire connectée au réseau, le contrôleur PV a pour rôle d'extraire la puissance maximale fournie par le champ photovoltaïque et de l'injecter dans le réseau électrique. Pour assurer cette extraction optimale de l'énergie solaire, le contrôleur utilise une méthode de poursuite du point de puissance maximale, connue sous le nom de MPPT (Maximum Power Point Tracking) [15].

III.4.3 Système de Récupération d'Énergie Cinétique (KERS)

Cet exemple illustre le fonctionnement d'un système de récupération d'énergie cinétique (KERS) utilisé sur une voiture de Formule 1. Le modèle permet d'analyser les avantages de cette technologie. Lors des phases de freinage, l'énergie est stockée dans une combinaison de batterie

lithium-ion et de super condensateur.

Il est supposé qu'un maximum de 400 kJ d'énergie peut être récupéré et utilisé sur un tour, avec une puissance maximale de 60 kW. Les paramètres de conception incluent la masse de la batterie, du super condensateur et du moteur-générateur. Lorsque ces masses sont réduites à une valeur symbolique de 0,01 kg, le temps au tour est de 95,0 secondes — ce qui correspond à une voiture sans système KERS. Avec les valeurs par défaut du modèle, environ un quart de seconde est gagné sur le tour en utilisant l'énergie électrique disponible en dehors des phases de freinage. Une utilisation du KERS uniquement dans certains virages nécessite un super condensateur plus grand pour produire un avantage notable.

La figure III.5 illustre le schéma du système régénératif de freinage. Il met en évidence le flux d'énergie inversé du moteur vers la batterie lors de la décélération. Ce mécanisme permet de récupérer une partie de l'énergie cinétique pour prolonger l'autonomie du véhicule. L'analyse du système montre l'importance d'un contrôle précis de l'électronique de puissance pour assurer une récupération efficace sans compromettre le confort de conduite.

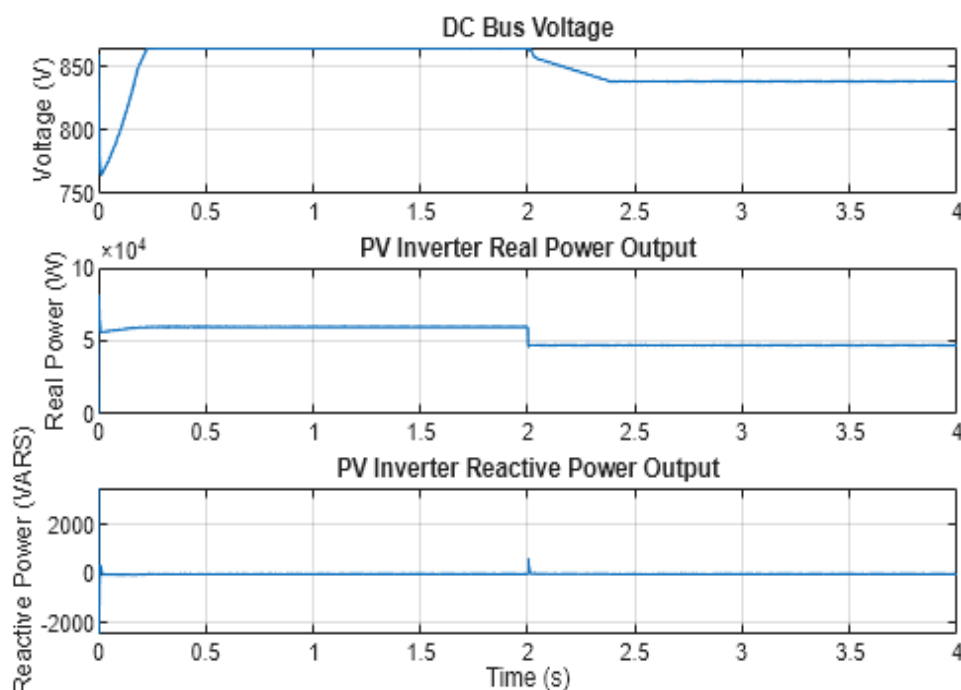


Figure III-5: Résultats de la récupération l'énergie cinétique au niveau des freins.

Ce modèle montre comment **Simulink™** peuvent être utilisés pour concevoir des systèmes à un niveau global, mais nous avons les simuler en simulink pour varier et simuler le système en top performance. Les performances du KERS résultent d'un compromis complexe entre les masses

des trois composants principaux (batterie, supercondensateur et moteur-générateur) et la stratégie de gestion de l'énergie.

Le système KERS augmente la masse globale du véhicule, ce qui réduit son accélération sous la seule action du moteur thermique. Ainsi, l'énergie électrique stockée lors du freinage doit compenser cette perte. Les batteries lithium-ion présentent une densité énergétique élevée (énergie par unité de masse) mais une faible densité de puissance. À l'inverse, les supercondensateurs ont une faible densité énergétique mais une très bonne densité de puissance, ce qui les rend particulièrement adaptés à ce type d'application [17].

III.4.4 Résultats issus de l'enregistrement Simulink de système de freinage énergétique

Le graphique ci-dessous illustre l'évolution de la vitesse du véhicule tout au long d'un tour de piste. Dans ce modèle, le conducteur est conscient des vitesses maximales à ne pas dépasser dans les virages du circuit, et applique donc les freins de manière stratégique afin de ralentir le véhicule à ces moments précis.

En d'autres termes, le modèle simule un comportement de conduite réaliste, où la décélération dans les virages est anticipée pour maintenir une vitesse optimale, à la fois sécuritaire et performante. Cette approche permet de mieux analyser le comportement dynamique du véhicule, notamment en présence de systèmes de récupération d'énergie comme le KERS. Ces données permettent également de valider les algorithmes de commande embarqués, notamment ceux liés à la gestion de l'énergie et à la stratégie de freinage, tout en mettant en évidence les interactions entre la vitesse, les conditions de conduite et l'efficacité des dispositifs électromécaniques intégrés dans le véhicule [18].

La figure III.6 présente les résultats de la simulation d'un système KERS dans un véhicule de course. Le graphe met en relation la vitesse du véhicule avec les zones d'activation du KERS. L'interprétation met en évidence l'amélioration marginale du temps au tour grâce à la récupération d'énergie. Elle montre aussi l'importance de la gestion intelligente de l'énergie pour obtenir un compromis entre performances dynamiques et stockage énergétique.

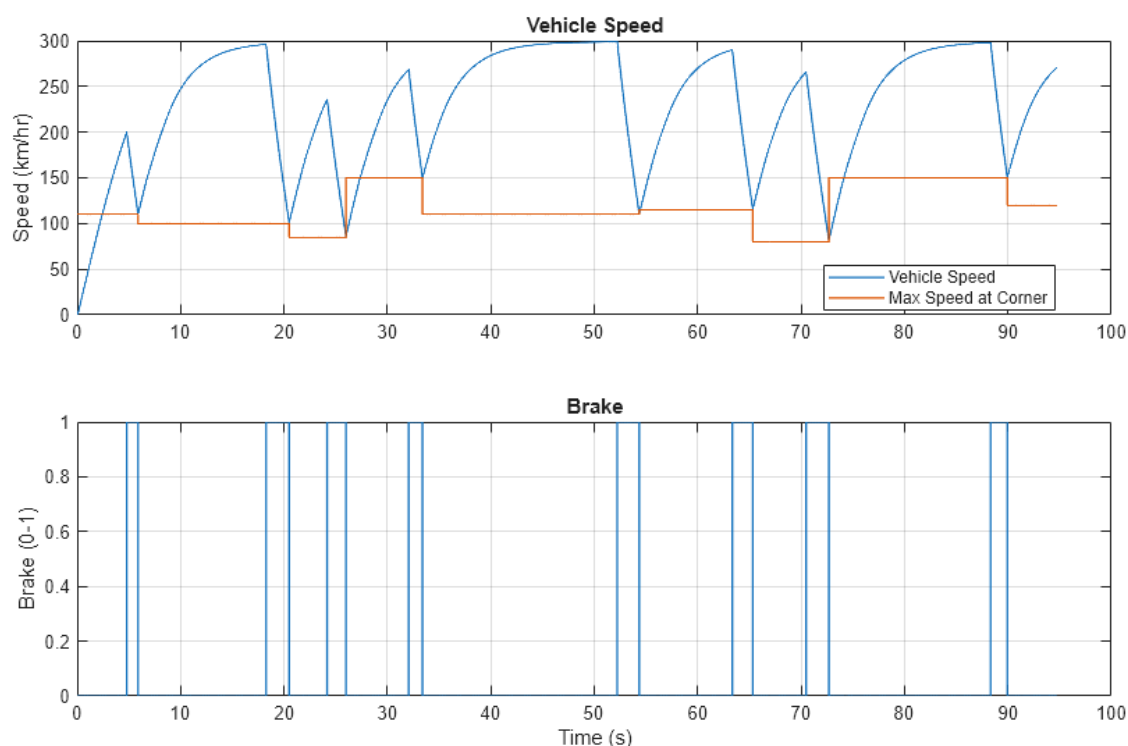


Figure III.6 : Résultats issus de l'enregistrement Simulink de système de freinage énergétique .

III.4.5 Comparaison des stratégies d'utilisation du système électrique lors de l'accélération

Le graphique de la figure III.7 ci-dessous compare deux stratégies d'utilisation de la chaîne de traction électrique durant les phases d'accélération. La première stratégie consiste à exploiter la motorisation électrique dans tous les virages, tandis que la seconde l'active uniquement dans des virages spécifiques. Cette distinction est particulièrement visible dans le graphique représentant le couple moteur : la stratégie basée sur des virages sélectionnés affiche un couple nul dans plusieurs virages du circuit, indiquant une absence d'assistance électrique durant ces phases de décélération rapide suivie d'une accélération.

Ce comportement met en évidence l'impact de la gestion intelligente de l'énergie sur les performances globales du véhicule. En sélectionnant précisément les zones du circuit où l'assistance électrique est réellement bénéfique, on optimise l'utilisation des ressources énergétiques tout en réduisant les pertes inutiles. Cela permet non seulement d'améliorer le rendement énergétique global du système, mais également de mieux préserver la durée de vie des composants comme les batteries et les supercondensateurs. Cette approche stratégique s'inscrit dans les logiques avancées de gestion énergétique adoptées dans les véhicules de course de haute performance.

La figure III.7 du modèle de ferme photovoltaïque montre une configuration multi-générateurs reliés à un réseau de distribution. Chaque générateur contribue à la puissance totale injectée dans le réseau. Cette figure permet de comprendre comment le dimensionnement des panneaux et l'algorithme MPPT influencent directement la quantité d'énergie disponible pour le véhicule.

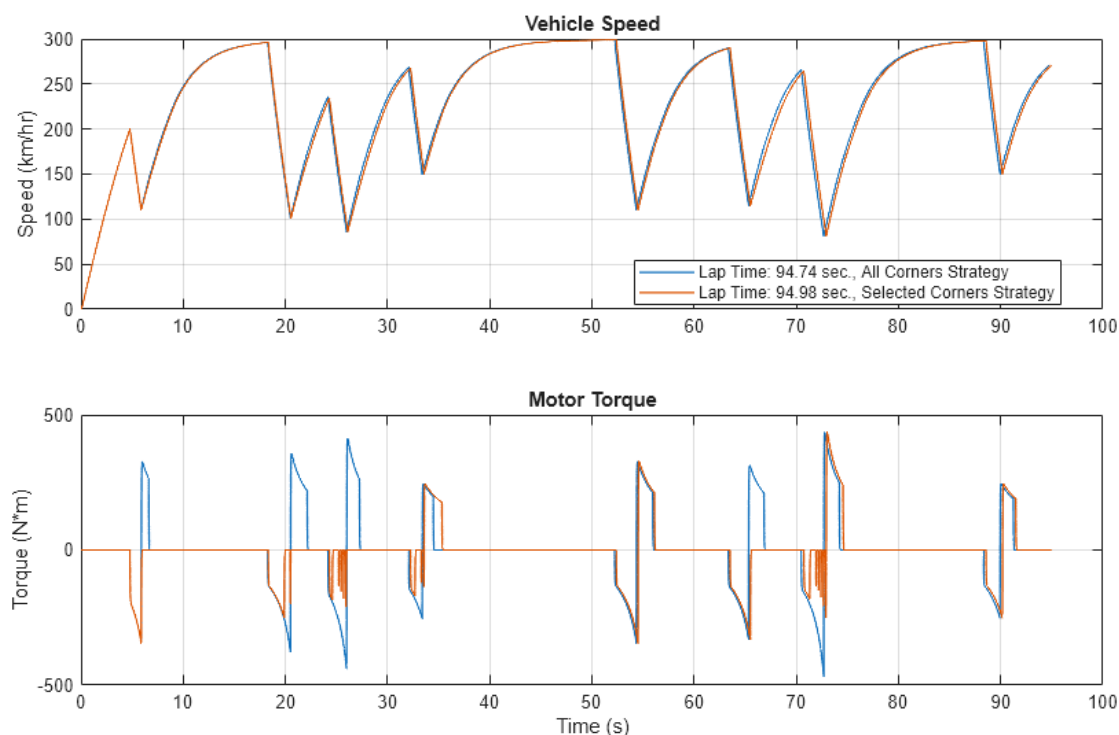


Figure III.7: Comparaison des stratégies d'utilisation du système électrique lors de l'accélération.

III.4.6 Système d'énergie PV

La figure III.8 présente un système intègre un champ photovoltaïque (PV) à un convertisseur continu-alternatif (DC/AC) mono et triphasé, lequel est raccordé à un réseau électrique. Le champ PV est constitué des chaînes parallèles, chacune comprenant 7 modules 'SunPower SPR' connectés en série ; ses caractéristiques électriques peuvent être visualisées. Le convertisseur, modélisé par un pont à 3 niveaux, utilise une inductance de lissage RL et un petit filtre harmonique, et est connecté au réseau via un transformateur de 250 kVA.

Le graphe comparatif des stratégies d'accélération électrique illustre l'impact d'une activation ciblée du moteur électrique dans les virages. La stratégie optimisée, en limitant l'usage du moteur aux virages critiques, permet de réduire la consommation énergétique globale tout en maintenant des performances compétitives. Cela illustre l'importance de l'optimisation logicielle dans la gestion des ressources d'un véhicule électrique.

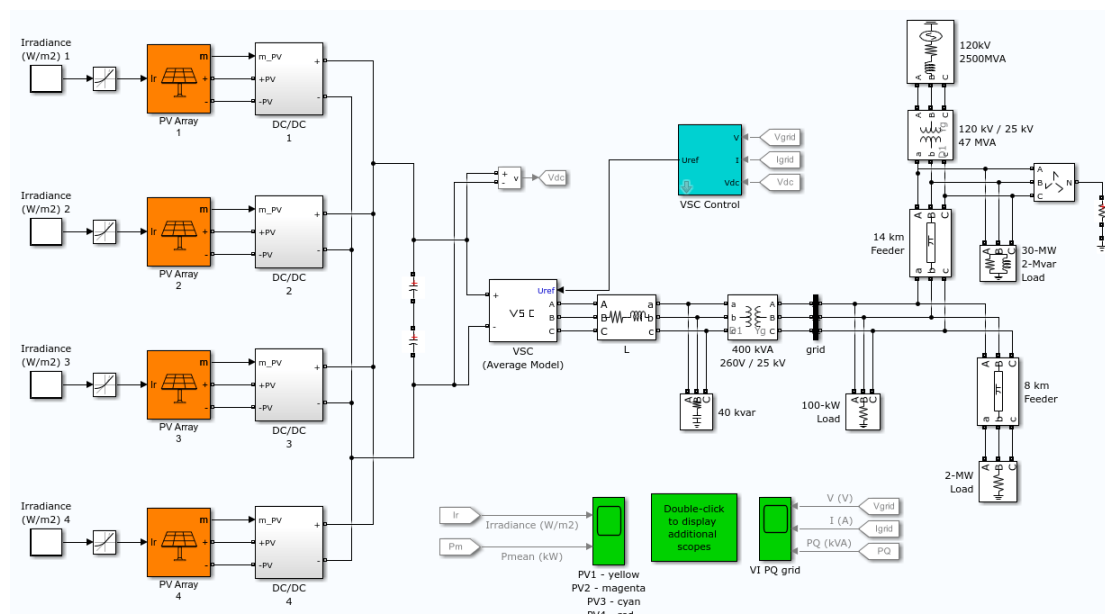


Figure III.8: Architecture du système global de l'énergie PV.

III.4.7 Ferme photovoltaïque et son modèle de simulation

La ferme solaire est constituée de quatre générateurs photovoltaïques (PV) capables de délivrer chacun une puissance maximale de 100 W sous une irradiation solaire de 1000 W/m^2 . Chaque générateur est composé de 64 micro-chaînes en parallèle, et chaque chaîne contient 5 modules SunPower SPR-315E connectés en série.

Chaque générateur photovoltaïque est relié à un convertisseur DC/DC de type boost, modélisé ici par un modèle moyen. Ces convertisseurs élèvent la tension en sortie des modules PV et s'acheminent vers un bus continu commun de 500 V. Chacun de ces convertisseurs est piloté par un suiveur de point de puissance maximale (MPPT) indépendant, utilisant l'algorithme de "Perturb and Observe" (P&O). Cet algorithme ajuste la tension aux bornes des panneaux solaires pour obtenir la puissance maximale disponible.

La conversion de l'énergie continue en énergie alternative est assurée par un onduleur triphasé de type Voltage Source Converter (VSC), qui transforme les 500 V DC en 260 V AC tout en maintenant un facteur de puissance unitaire. Le réseau modélisé comprend une infrastructure de distribution en 25 V, ainsi qu'un système de transport équivalent en 120 V.

Dans ce modèle de simulation dit "moyen", les convertisseurs boost et VSC sont représentés par des sources de tension équivalentes produisant une tension moyenne sur un cycle de commutation. Ce type de modélisation ne tient pas compte des harmoniques, mais reproduit fidèlement la dynamique du système de commande ainsi que les interactions entre le système de

conversion et le réseau électrique. Cette approche permet d'utiliser un pas de temps plus important (50 microsecondes), ce qui accélère considérablement le temps de simulation tout en conservant la précision dynamique essentielle [20].

III.4.8 Résultats de l'énergie récupérée

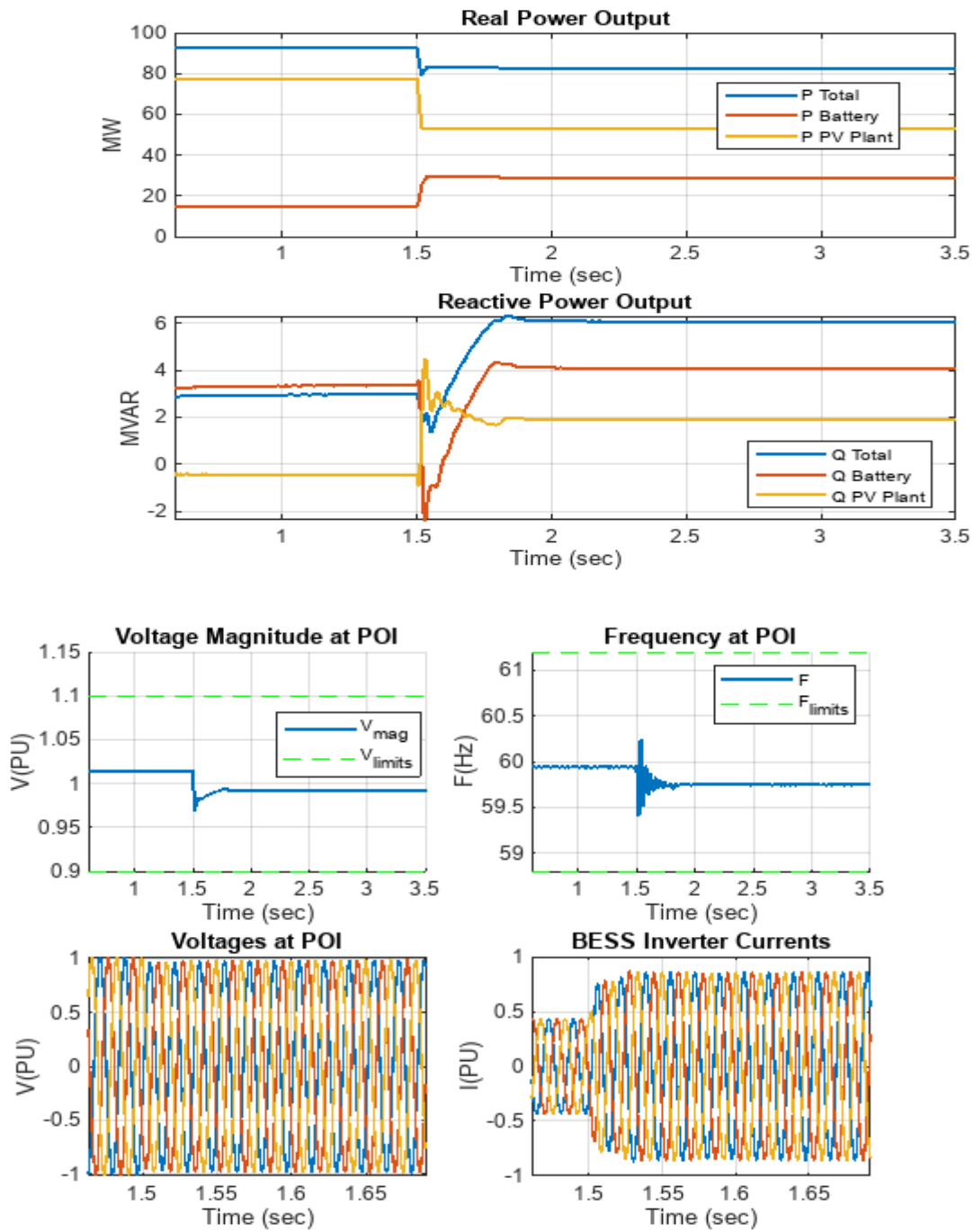


Figure III.9 : Le comportement dynamique d'un système de propulsion hybride destiné à un véhicule électrique.

La figure III.9 illustre le comportement dynamique d'un système de propulsion hybride destiné à un véhicule électrique, alimenté conjointement par une ferme photovoltaïque et un système de batterie. L'objectif principal de ce système est d'assurer une alimentation électrique stable, même en cas de perturbations soudaines, comme une baisse brutale de l'irradiation solaire affectant la production PV. Cette stabilité est cruciale pour garantir la performance et la sécurité d'un véhicule électrique fonctionnant dans diverses conditions climatiques.

Le premier sous-graphe (Real Power Output) met en évidence la réponse immédiate du système suite à une chute soudaine de la puissance produite par les panneaux solaires. Environ à 1,45 seconde, la puissance générée par le champ PV chute fortement, ce qui simule un scénario typique de passage nuageux ou ombrage partiel. Face à cette baisse, le système de batterie (BESS) entre automatiquement en action, injectant une puissance active équivalente afin de compenser cette perte. Ainsi, la puissance totale disponible pour le véhicule reste stable, évitant toute interruption ou perte de performance.

Dans le deuxième sous-graphe (Reactive Power Output), la même logique s'applique à la puissance réactive. Le BESS adapte également son injection de puissance réactive pour maintenir la stabilité du réseau embarqué. Cette capacité à gérer à la fois la puissance active et réactive est essentielle pour la performance des composants électroniques de puissance embarqués dans le véhicule, ainsi que pour maintenir un facteur de puissance optimal.

Les deux sous-graphes suivants, qui affichent respectivement la magnitude de la tension et la fréquence au point d'interconnexion (POI), montrent que ces deux paramètres clés restent dans les limites admissibles malgré la perturbation. La tension chute brièvement mais reste dans une plage de sécurité, tandis que la fréquence, bien que légèrement perturbée, est rapidement corrigée. Ces résultats démontrent la robustesse du système de commande et de régulation, qui garantit un fonctionnement stable du moteur électrique du véhicule même en présence de variations dans la source d'alimentation.

Le sous-graphe des tensions triphasées au POI révèle que la qualité de la tension est maintenue pendant toute la durée de la transition. Les formes d'onde restent équilibrées et sinusoïdales, ce qui est crucial pour éviter les pertes supplémentaires ou les dysfonctionnements des composants de traction du véhicule. De même, les courants de l'onduleur du BESS montrent une forte augmentation immédiate après la chute de puissance PV, preuve de la réactivité du système de stockage. Ces courants se stabilisent ensuite rapidement, indiquant que le système retourne à un état d'équilibre après avoir compensé l'événement.

Ce système hybride, intégrant une ferme photovoltaïque et une batterie embarquée, s'avère particulièrement efficace pour l'alimentation d'un véhicule électrique. Il assure une réponse rapide

aux variations de l'environnement énergétique, maintient la stabilité électrique, et garantit la continuité et la qualité de l'alimentation, contribuant ainsi à la fiabilité globale du véhicule. Cette approche permet non seulement d'optimiser l'efficacité énergétique, mais aussi d'exploiter les énergies renouvelables dans le secteur de la mobilité [21].

III.4.9 Système éolien

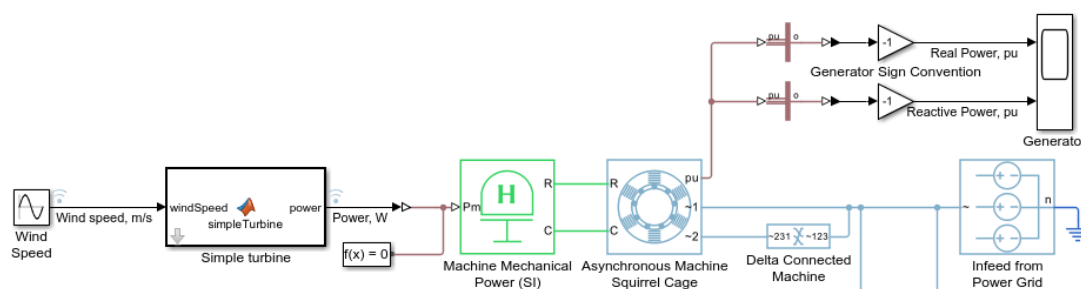


Figure III.10: Système de production d'énergie utilisant une génératrice asynchrone triphasée.

La figure III.10 représente un système de production d'énergie utilisant une génératrice asynchrone triphasée, couramment utilisée dans les installations éoliennes. Le cœur du système est basé sur une machine à induction qui fonctionne comme génératrice lorsqu'elle est entraînée mécaniquement par une éolienne. La conversion de la vitesse du vent en puissance mécanique utilisable est réalisée à l'aide d'un bloc simplifié appelé "Simple Turbine", qui utilise une caractéristique de puissance de sortie en fonction de la vitesse du vent. Ce modèle reflète fidèlement le comportement réaliste d'une éolienne.

Dans ce système, la production d'énergie active dépend de la vitesse du vent. Lorsque celle-ci est inférieure à la vitesse de démarrage (cut-in speed) ou dépasse la vitesse maximale admissible (cut-out speed), la génératrice ne produit aucune puissance active. Cela reflète les limitations opérationnelles des turbines éoliennes, qui ne démarrent pas sous un certain seuil de vent et doivent s'arrêter pour éviter les dommages en cas de vents trop violents.

La machine à induction consomme en permanence de la puissance réactive, même lorsqu'elle génère de la puissance active. Pour compenser cette demande en puissance réactive et éviter d'affecter la stabilité du réseau, un bloc de compensation réactive est intégré dans le système. Ce dernier est conçu pour fournir jusqu'à 90 kVAR lorsque la tension triphasée à ses bornes est de 440 V entre phases.

Le système comprend également une charge locale constante qui consomme 75 kW. La production de l'éolienne est prioritairement utilisée pour alimenter cette charge. En cas de déficit de production (lorsque la puissance éolienne est inférieure à 75 kW), le réseau électrique fournit

la puissance manquante. À l'inverse, si la production excède cette demande locale, le surplus est automatiquement injecté dans le réseau, contribuant à l'alimentation du système électrique global.

Ce modèle est représentatif d'un scénario typique d'intégration de l'énergie éolienne décentralisée dans un réseau local ou isolé, avec gestion intelligente de l'énergie active et réactive. Il met en avant l'importance des dispositifs de compensation pour assurer une qualité de tension stable, et montre également la flexibilité de la machine asynchrone pour fonctionner dans des conditions de vent variables [22].

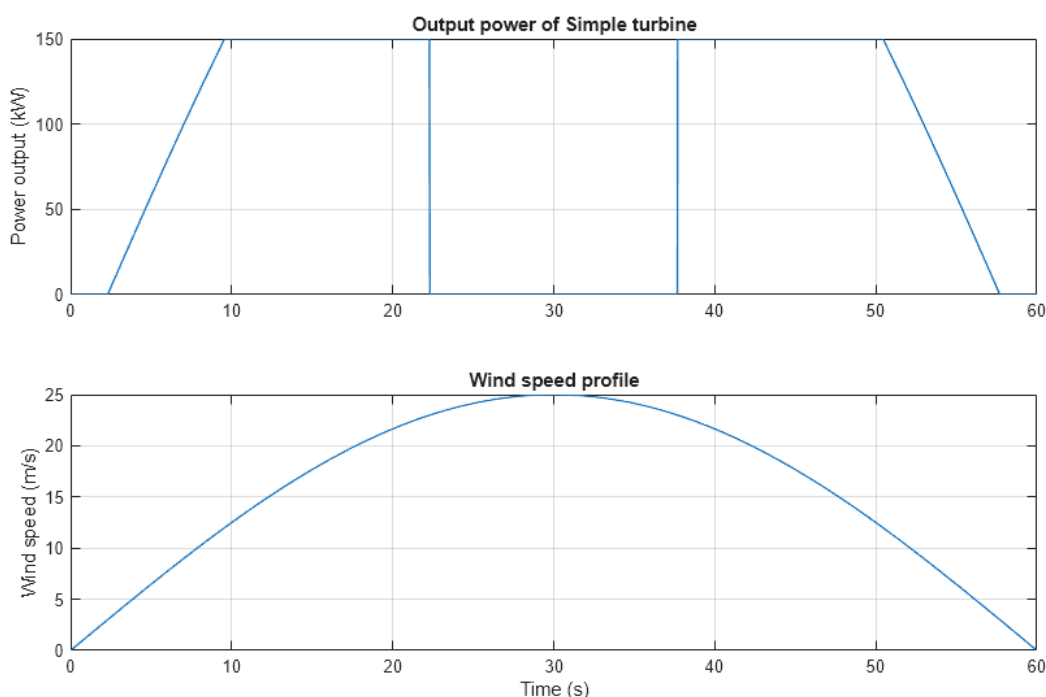


Figure III.11: La réponse dynamique éoliennes face aux variations naturelles du vent.

Le profil de vitesse du vent, représenté dans l'axe des X le Temps, évolue de manière progressive sur une période de 60 secondes. Au départ, la vitesse du vent est nulle puis augmente progressivement jusqu'à atteindre un maximum de 25 m/s aux alentours de 30 secondes. Ensuite, la vitesse du vent diminue symétriquement jusqu'à revenir à zéro à la fin de la simulation. Ce profil en forme de cloche est typique des scénarios de simulation utilisés pour analyser la réponse dynamique des éoliennes face aux variations naturelles du vent.

En parallèle, le premier graphique montre la puissance de sortie de la turbine éolienne. Celle-ci reste nulle au début de la simulation, car la vitesse du vent est encore inférieure à la vitesse de démarrage (cut-in speed) de la turbine. À partir d'environ 9 secondes, lorsque le vent dépasse ce seuil minimal, la turbine commence à produire de l'énergie. La puissance augmente rapidement jusqu'à atteindre la valeur maximale de 150 kW, qui correspond à la puissance nominale de la machine. Ce plateau se maintient tant que la vitesse du vent reste dans la plage opérationnelle

sécurisée.

Cependant, entre 22 et 36 secondes, la puissance chute brusquement à zéro malgré la présence de vent. Cela indique que la vitesse du vent a dépassé la vitesse de coupure (cut-out speed), déclenchant l'arrêt automatique de la turbine pour éviter tout dommage mécanique. Une fois que la vitesse du vent retombe sous ce seuil critique, la turbine redémarre et reprend sa production maximale. À la fin du cycle, alors que le vent continue de diminuer, la puissance suit une pente descendante jusqu'à s'annuler complètement, traduisant une vitesse de vent insuffisante pour maintenir la génération électrique.

Ce comportement caractéristique reflète le fonctionnement typique d'un générateur asynchrone triphasé utilisé dans une voiture hybride alimentée en partie par une turbine éolienne. L'ensemble du système est conçu pour convertir efficacement l'énergie cinétique du vent en énergie électrique, tout en respectant les contraintes de sécurité imposées par les seuils de vitesse. Grâce à ce dispositif, la production d'énergie renouvelable embarquée peut contribuer à l'alimentation du véhicule tout en réduisant sa dépendance aux sources fossiles [23].

III.4.10 Système global

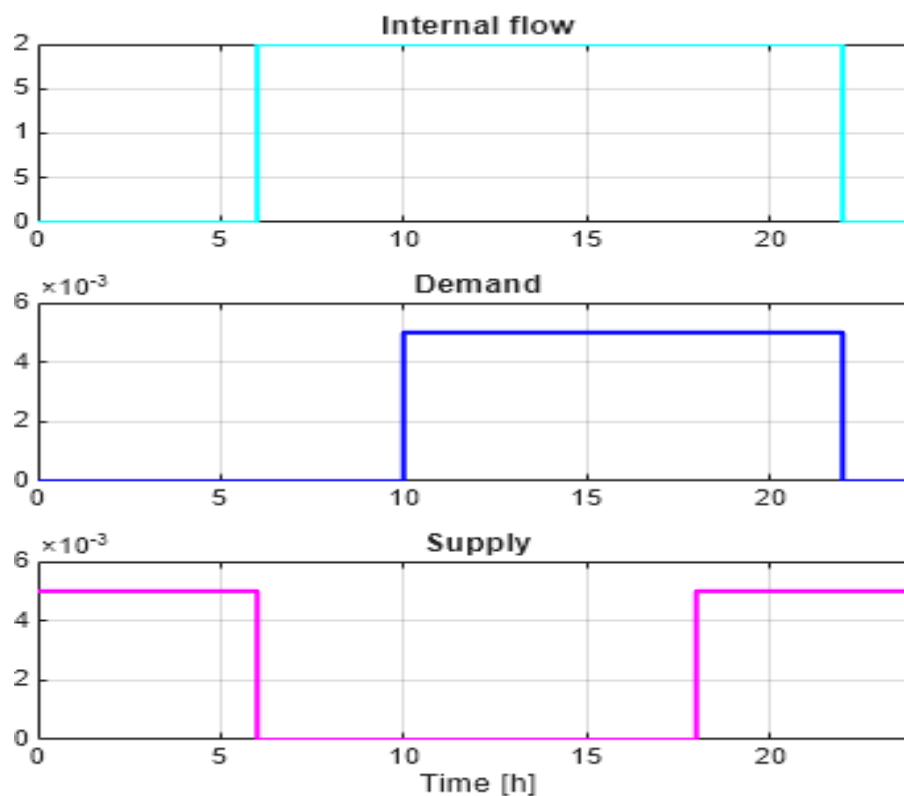


Figure III.12: Le comportement énergétique d'un véhicule hybride au cours d'un trajet typique comprenant trois phases.

La figure III.12 illustre le comportement énergétique d'un véhicule hybride au cours d'un trajet typique comprenant trois phases : sortie du garage, période de circulation à l'extérieur, puis retour sur une ligne droite (ou plateau). Le graphique montre l'évolution de trois sources d'énergie distinctes qui alimentent le véhicule.

*- La ligne rose représente l'énergie de freinage régénérative. Elle est active principalement lors des décélérations du véhicule, notamment au moment de quitter ou d'approcher le garage, ainsi que durant les phases de ralentissement sur le trajet. Cette source d'énergie est intermittente et dépend directement de la dynamique de conduite : elle permet de récupérer une partie de l'énergie cinétique du véhicule lors des freinages, réduisant ainsi la consommation globale.

*- La ligne bleue correspond à l'énergie générée par la turbine éolienne embarquée. Elle varie en fonction des conditions de vitesse du vent rencontrées pendant le trajet extérieur. Lors de la phase centrale du trajet, la voiture circule en extérieur, exposée aux flux ir suffisants pour activer la production éolienne. Cette production suit le profil typique d'une turbine asynchrone : nulle au démarrage, croissante avec l'intensité du vent, puis limitée par la vitesse de coupure pour préserver la sécurité du système.

*- La ligne bleu ciel, quant à elle, indique l'énergie solaire produite par les panneaux photovoltaïques intégrés au véhicule. Cette source est relativement stable et suit une courbe douce, car elle dépend principalement de l'ensoleillement et de la position du soleil au cours de la journée. Contrairement à l'énergie de frein ou à celle du vent, l'énergie solaire est disponible en continu pendant la phase extérieure, tant que les conditions d'ensoleillement sont favorables.

Cette simulation démontre l'efficacité d'un système hybride embarqué combinant énergie éolienne, énergie solaire et récupération au freinage. Chaque source d'énergie joue un rôle complémentaire selon les phases de déplacement. Cette architecture permet d'optimiser la consommation, de prolonger l'autonomie du véhicule et de réduire son empreinte environnementale [24].

III.4.11 Modélisation complète d'un véhicule électrique

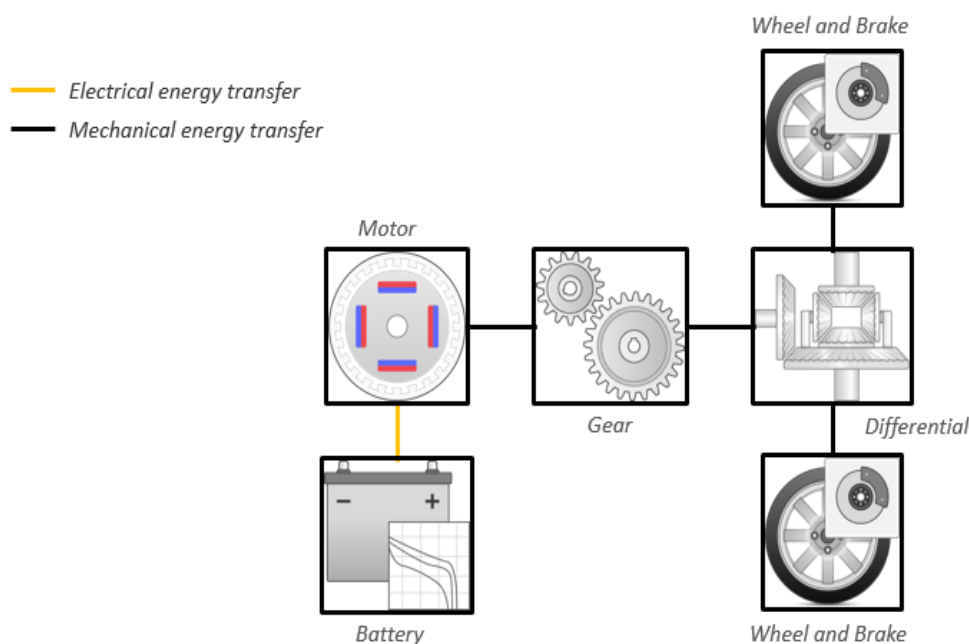


Figure III.13: L'application de référence pour véhicule électrique (EV) représente un modèle complet d'automobile 100 % électrique.

La figure III.13 présente l'application de référence pour véhicule électrique (EV) représente un modèle complet d'automobile 100 % électrique. Cette architecture comprend un moteur-générateur, une batterie, une transmission à entraînement direct, ainsi que des algorithmes de contrôle dédiés à la gestion du groupe motopropulseur. Ce modèle est destiné à plusieurs usages, tels que l'analyse de correspondance entre les composants du groupe motopropulseur, le choix optimal des éléments techniques, la conception des algorithmes de commande et de diagnostic, ainsi que les essais en boucle fermée (HIL - Hardware-In-the-Loop). Pour démarrer une copie de travail de ce projet de véhicule conventionnel, une commande dédiée permet d'ouvrir l'environnement de simulation [25].

III.4.12 Analyse de la puissance et de l'énergie

Un script interactif (live script) nommé Analyze Power and Energy est disponible pour l'évaluation énergétique du véhicule. En l'exécutant, on obtient une analyse détaillée de la consommation de puissance et d'énergie à la fois au niveau de chaque composant et à l'échelle du système global. Ce script fournit un résumé énergétique global pouvant être exporté vers un tableau Excel®. Il permet aussi d'évaluer le rendement énergétique des sous-systèmes tels que le groupe motopropulseur et la chaîne de traction. De plus, des fonctionnalités de journalisation de données

permettent d'utiliser l'outil *Simulation Data Inspector* pour analyser les signaux liés à l'efficacité énergétique et au transfert de puissance [26].

A) Scénarios de conduite

Le modèle comprend un sous-système dédié aux scénarios de conduite. Ce dernier génère des signaux de consigne pour la vitesse, la trajectoire et les actions du conducteur selon différentes manœuvres prédéfinies, via des variantes spécifiques [27].

B) Modèle de l'environnement

Un autre sous-système simule les conditions environnementales agissant sur le véhicule. Il intègre la pente de la route, la vitesse du vent, la température ambiante et la pression atmosphérique. Selon les conditions, le modèle peut générer des signaux représentatifs d'environnements et de terrains particuliers [28].

C) Commandes du conducteur

Ce module simule les commandes classiques d'un conducteur humain. Il produit des signaux d'accélération, de freinage, de passage de vitesses et de direction. Ces signaux sont générés à partir d'interactions typiques comme l'usage de la pédale d'accélérateur, de frein ou du levier de transmission [29].

D) Systèmes de commande

Le sous-système de commande regroupe l'unité de contrôle du véhicule (VCU – *Vehicle Control Unit*) et le système de gestion de la batterie (BMS – *Battery Management System*). Un contrôleur superviseur y est implanté pour déterminer les consignes de couple moteur et de pression de freinage. Plus précisément, le module de commande du groupe motopropulseur (PCM – *Powertrain Control Module*) prend en charge les fonctions suivantes :

- *- Gestion du freinage régénératif pour maximiser la récupération d'énergie cinétique lors du ralentissement.
- *- Attribution du couple moteur et distribution intelligente de la puissance.
- *- Conversion du signal de la pédale d'accélérateur en demande de couple moteur.
- *- Transformation du signal de la pédale de frein en consigne de pression, par multiplication avec une pression maximale de freinage.
- *- Mise en œuvre d'un système virtuel de gestion de la batterie qui détermine dynamiquement

les limites de puissance de charge et de décharge, selon l'état de charge (SOC) de la batterie.

- *- Implémentation d'un algorithme de gestion de puissance veillant à ce que les limites de la batterie ne soient jamais dépassées [30].

III.4.13 Modèle de Véhicule

Le véhicule simulé est une voiture particulière équipée d'un moteur-générateur, d'une batterie, et d'une transmission à entraînement direct. La configuration du véhicule peut être modifiée à l'aide de l'outil *Virtual Vehicle Composer* qui permet de choisir différentes configurations de chaîne de traction et de modèle de véhicule selon les besoins de l'analyse [31].

A) Système de contrôle

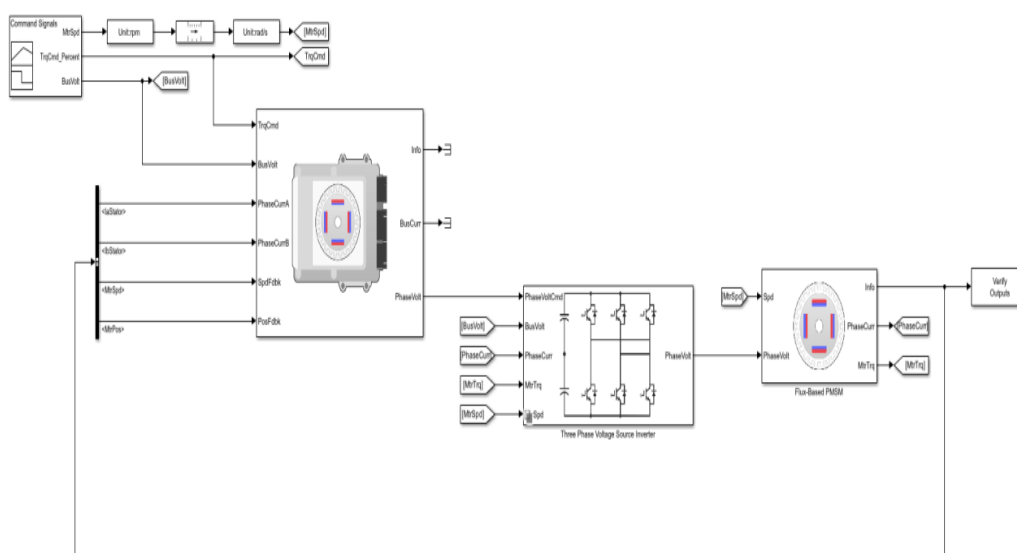


Figure III.14 : Simulation de double fonctionnement de moteur électrique et leur fonctionnement de frein actif.

III.4.14 Système automatique de gestion basé sur Arduino

Pour assurer la coordination intelligente des différentes sources d'énergie et optimiser leur exploitation en temps réel, un système automatique basé sur une carte Arduino est intégré dans l'architecture du véhicule. Ce microcontrôleur joue un rôle central dans la supervision des opérations énergétiques, en collectant les données provenant des capteurs solaires, éoliens et de freinage, puis en prenant des décisions logiques pour gérer la distribution et le stockage de l'énergie. Il contrôle les servomoteurs pour orienter les panneaux solaires selon l'angle optimal, surveille la vitesse du vent pour activer ou désactiver la turbine éolienne, et régule la récupération

d'énergie cinétique pendant les phases de freinage.

Le système Arduino exécute en temps réel des algorithmes de gestion énergétique, permettant ainsi de maximiser le rendement global, d'éviter la surcharge de la batterie et d'assurer une alimentation continue et équilibrée du moteur électrique. Grâce à ce pilotage automatisé, le véhicule devient plus autonome, intelligent et économe en énergie, tout en offrant une solution facilement adaptable pour des prototypes de recherche ou des applications commerciales [32].

III.4.15 Système de gestion énergétique

Le système hybride de gestion énergétique étudié ici repose sur l'intégration de trois sources principales d'énergie dans un véhicule électrique : l'énergie solaire via des panneaux photovoltaïques (PV), l'énergie éolienne à petite échelle, et l'énergie cinétique récupérée lors du freinage (freinage régénératif). Ce concept vise à maximiser l'autonomie, améliorer l'efficacité énergétique globale, et réduire la dépendance à la recharge externe, tout en assurant un fonctionnement plus durable et respectueux de l'environnement [33].

L'énergie solaire est captée à l'aide de panneaux photovoltaïques fixés sur le toit et/ou le capot du véhicule. Ces panneaux convertissent la lumière du soleil en énergie électrique, stockée ensuite dans la batterie du véhicule. L'avantage majeur de cette source est qu'elle permet une recharge passive, particulièrement utile lorsque le véhicule est stationné à l'extérieur. Le rendement dépend toutefois des conditions d'ensoleillement, de l'angle d'incidence solaire et de la surface des panneaux [34].

Pendant les trajets en extérieur, cette source permet d'alimenter partiellement le moteur ou les systèmes auxiliaires du véhicule, réduisant ainsi la sollicitation directe de la batterie. Dans les simulations effectuées, la production d'énergie solaire atteint un pic durant les périodes d'ensoleillement maximal, représentée par une courbe bleu clair. Elle contribue de manière significative à la recharge en conditions favorable [35].

L'intégration de mini-turbines éoliennes dans le véhicule constitue une approche innovante. Ces turbines, généralement installées à l'avant ou sur le toit, exploitent le déplacement du véhicule pour générer de l'électricité. Le principe est que lorsque la voiture roule à une vitesse suffisante, l'air entrant dans les turbines provoque une rotation, convertie en énergie électrique par un générateur. Cette énergie est ensuite dirigée vers la batterie [36].

La production éolienne est particulièrement utile lors des phases de déplacement à vitesse constante ou élevée. Elle est représentée dans le graphique par la ligne bleue foncée. Bien que moins puissante que les panneaux solaires, l'énergie éolienne embarquée constitue une source

complémentaire non négligeable, surtout dans les environnements venteux ou sur autoroute [37].

Le système de freinage régénératif transforme l'énergie cinétique générée lors des décélérations et freinages en énergie électrique. Au lieu de dissiper cette énergie sous forme de chaleur, comme dans les systèmes classiques, le moteur électrique fonctionne temporairement comme un générateur, envoyant l'électricité récupérée vers la batterie [38].

Ce procédé est crucial dans les environnements urbains où les arrêts fréquents sont courants. Il améliore le rendement global du véhicule et prolonge l'autonomie sans recharge externe. Dans le graphique fourni, cette énergie est représentée par la ligne rose. Elle présente des pics lors des phases de ralentissement ou de freinage, notamment au moment de la sortie du garage et lors du retour sur une surface plane. La simulation réalisée dans cet environnement modélise un scénario où la voiture sort d'un garage, circule dans un environnement extérieur avec différentes conditions (ensoleillement, vent, phases d'accélération et de freinage), puis retourne sur une surface plane. Chaque source d'énergie est activée en fonction du contexte dynamique. Le système de contrôle intelligent régule la contribution de chaque source selon les besoins de puissance et l'état de charge de la batterie [39].

La complémentarité des trois sources permet une alimentation continue du moteur tout en optimisant les phases de recharge. L'énergie solaire agit de façon passive, l'éolienne dépend du mouvement du véhicule, et l'énergie de freinage intervient en récupération [40].

Ce système hybride innovant constitue une avancée prometteuse pour les véhicules électriques de nouvelle génération. En combinant des sources d'énergie renouvelables embarquées avec la récupération cinétique, on obtient une solution énergétique plus autonome, écologique, et adaptée aux besoins de mobilité durable. La simulation montre une synergie efficace entre les sources, confirmant la viabilité du modèle pour des applications pratiques [41].

III.5 Conclusion

Le système hybride étudié démontre une approche innovante et durable pour l'alimentation énergétique d'un véhicule électrique, en combinant intelligemment l'énergie solaire, l'énergie éolienne et la récupération d'énergie cinétique au freinage. Grâce à une gestion automatisée assurée par un microcontrôleur Arduino, le système garantit une exploitation optimale des ressources renouvelables, une autonomie accrue du véhicule et une réduction significative de la dépendance aux sources d'énergie conventionnelles. Ce concept ouvre la voie à de nouvelles perspectives pour le développement de véhicules propres, intelligents et respectueux de l'environnement.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

Dans ce travail, nous avons modélisé et simulé, un **système hybride intelligent** destiné à **l'alimentation énergétique d'un véhicule électrique**. Ce système repose sur la combinaison de trois sources d'énergie: **l'énergie solaire** captée par des panneaux photovoltaïques (PV), **l'énergie éolienne** générée par une petite turbine embarquée, et **l'énergie cinétique** récupérée lors du freinage du véhicule.

L'ensemble du dispositif est géré par une plateforme de commande automatisée basée sur Arduino, assurant une coordination efficace et intelligente des différentes sources selon les besoins réels du véhicule et les conditions d'exploitation.

Nous avons introduit les concepts fondamentaux des énergies renouvelables appliquées au transport, en insistant sur la nécessité de développer des solutions écologiques et durables face à l'épuisement des combustibles fossiles et aux enjeux environnementaux. Ce chapitre a permis de justifier le recours à une approche hybride en soulignant les limites de chaque source utilisée individuellement. Il a également exposé les principes de fonctionnement de l'énergie photovoltaïque, de l'énergie éolienne, et du système de récupération d'énergie de freinage (KERS), ainsi que leur potentiel en milieu mobile, notamment pour les véhicules légers.

Nous avons modélisé les différentes sources d'énergie et décrit l'architecture énergétique du véhicule. À travers des schémas blocs sous Simulink et Simscape, nous avons simulé le comportement du véhicule lors d'un trajet-type incluant des phases de démarrage, d'accélération, de freinage et de stationnement.

L'énergie solaire a été exploitée via des **panneaux PV** connectés à des convertisseurs DC/DC avec suivi du **point de puissance maximale** (MPPT). L'énergie éolienne a été générée par **une turbine asynchrone triphasée**, dont la production dépend de la vitesse relative du véhicule.

Enfin, le **système KERS** a permis de stocker **l'énergie de freinage** dans une batterie et un supercondensateur. Chaque source a été intégrée à un bus DC commun, assurant l'alimentation continue du moteur électrique.

Nous avons illustré **l'implémentation de l'intelligence de commande** via une carte Arduino. Cette unité centrale a été programmée pour surveiller en temps réel les niveaux d'énergie disponibles, prioriser l'usage des sources selon leur disponibilité, et commuter dynamiquement entre elles sans intervention humaine.

L'algorithme de contrôle prend en compte la charge de la batterie, la production solaire instantanée, la vitesse du vent, ainsi que la décélération du véhicule pour activer la récupération d'énergie. Cette automatisation permet non seulement d'améliorer **l'autonomie du véhicule** mais

aussi de garantir **sa performance** et **sa fiabilité** dans divers contextes.

Pour une éventuelle continuité du présent travail, il est possible d'énumérer quelques perspectives comme suite de cette étude dont, nous pouvons citer :

***- L'intégration d'une petite éolienne embarquée directement** sur le véhicule offrirait une solution de recharge dynamique. Cette approche serait particulièrement pertinente pour les longs trajets ou les déplacements à vitesse modérée, où le vent pourrait générer une quantité d'électricité non négligeable pour la batterie. Alternativement, une éolienne complémentaire pourrait servir de source d'énergie d'appoint. Cette solution serait utile dans les situations où le vent est faible ou lors de trajets urbains, où le potentiel de l'éolienne embarquée serait limité. De plus, une éolienne complémentaire, qu'elle soit portable ou domestique, pourrait être utilisée pour recharger le véhicule lorsqu'il est stationné, offrant ainsi une flexibilité accrue.

***- L'intégration de ces trois sources d'énergie couplée à un système de gestion intelligent** ouvre la voie à des véhicules plus indépendants, plus respectueux de l'environnement et technologiquement avancés. La simulation a permis de valider le concept et d'identifier les points forts du système, notamment en termes d'efficacité énergétique, de réduction des pertes et d'optimisation des ressources. Ce travail pourrait servir de base à des recherches plus approfondies visant à miniaturiser les composants, améliorer les rendements et développer des prototypes réels pour une application industrielle.

Bibliographie

Bibliographie

- [1] M. Djamel et H. Kamal, *Étude et Stratégies de Commande d'un Véhicule Hybride Série*, Mémoire de Master, Univ. Mouloud Mammeri, Tizi Ouzou, 2013.
- [2] M. Thivillier, *Le véhicule autonome : Assurance automobile*, Mémoire, Univ. Jean Moulin Lyon III, 2021.
- [3] O. Sofiane et L. Ishaq, *Projet de fin d'études sur l'énergie éolienne*, thèse de Doctorat Univ. de Béjaïa, 2015.
- [4] M. T. Latreche, *Commande Floue de la Machine Synchrone à Aimant Permanent dans un Système Éolien*, Mémoire Master, Univ. de Biskra, 2018.
- [5] Y. Yahî, *Commande d'un robot mobile par interface cerveau-machine*, Journée Doctorale LTC, Univ. de Saïda, 2023.
- [6] M. Boudaoud, *Etude de la chaîne de traction d'un véhicule électrique*, mémoire master, Univ. de Sétif, 2017.
- [7] A. Remli, *Système de freinage régénératif pour voiture électrique*, mémoire master, Univ. de Laghouat, 2022.
- [8] L. Moussaoui, *Systèmes hybrides d'énergie pour véhicules autonomes*, mémoire master, Univ. de Constantine, 2019.
- [9] R. Khalfaoui, *Gestion intelligente des énergies renouvelables dans un véhicule cybernétique*, mémoire master, Univ. de Blida, 2020.
- [10] H. Bensalah, *Modélisation et simulation d'une ferme solaire connectée au réseau*, Thèse doctorat, Univ. de Tlemcen, 2015.
- [11] M. Toumi, *Commande de la machine à réluctance variable pour traction électrique*, Univ. de Batna, 2018.
- [12] A. Ferhat, *Automatisation d'un système énergétique hybride pour véhicule*, thèse Doctorat, Univ. d'Oran, 2021.
- [13] K. Abdelaziz, *Architecture intelligente pour système embarqué dans un véhicule électrique*, mémoire master, Univ. de Bechar, 2020.
- [14] N. Bachir, *Commande PI appliquée à un véhicule électrique*, mémoire master, Univ. de Biskra, 2023.
- [15] L. Hamdi, *Optimisation des convertisseurs DC/DC dans un système solaire embarqué*, Mémoire master, Univ. de Jijel, 2018.

Bibliographie

- [16] Y. Kaci, *Intégration des énergies solaires et éoliennes dans un véhicule autonome*, Mémoire master, Univ. de Skikda, 2020.
- [17] H. Arar, *algorithmes de gestion d'énergie dans les véhicules*, mémoire master, Univ. de Boumerdès, 2021.
- [18] T. Boukhenaf, *Simulation de la chaîne de traction avec MATLAB/Simulink*, Mémoire Master, Univ. de Tizi Ouzou, 2019.
- [19] S. Hachemi, *Architecture électronique embarquée dans les cyber-cars*, mémoire Master, Univ. de Sidi Bel Abbès, 2023.
- [20] I. Mesbah, *Véhicule à trois sources d'énergie (PV, éolienne, freinage)*, Mémoire master, Univ. de Saïda, 2024.
- [21] MathWorks, *Design Battery Management Systems with Simulink*, 2022. [En ligne]. Disponible sur: www.mathworks.com
- [22] MathWorks, *Electric Vehicle Modeling and Simulation*, 2023. [En ligne]. Disponible sur: www.mathworks.com
- [23] H. H. Hsieh et K. T. Lee, "Solar-Powered Electric Vehicles," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 51, pp. 108–122, 2015.
- [24] C. H. Chien et M. T. Cheng, "Portable Solar Charging Systems for Consumer Electronics," *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 2011.
- [25] M. K. Tripathi et M. Gaur, "Solar Lighting Systems: A Review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014.
- [26] T. Burton et al., *Wind Energy Handbook*, Article Wiley, 2011.
- [27] A. S. Abdel-Wahab et W. El-Khattam, "Solar-powered irrigation systems," *Energy*, vol. 59, pp. 43–52, 2013.
- [28] IEA, *Energy Storage Tracking Report*, 2023. [En ligne]. Disponible sur: www.iea.org
- [29] NREL, *A Comprehensive Study of Wind Turbine Efficiency*, 2015. [En ligne]. Disponible sur: www.nrel.gov
- [30] IRENA, *Renewable Power Generation Costs 2020*, 2020. [En ligne]. Disponible sur: www.irena.org
- [31] Beev, "Freinage Régénératif." [En ligne]. Disponible sur: <https://www.beev.co/glossaire/freinage-regeneratif>

Bibliographie

- [32] Neozone, "Tesla Model Y avec panneaux solaires." [En ligne]. Disponible sur: <https://www.neozone.org>
- [33] IRENA, *End-of-Life Management for PV Panels*, 2016. [En ligne]. Disponible sur: www.irena.org
- [34] ADEME, *Analyse du cycle de vie des énergies renouvelables*, 2020. [En ligne]. Disponible sur: www.ademe.fr
- [35] RTE, *Futurs énergétiques 2050*, 2022. [En ligne]. Disponible sur: www.rte-france.com
- [36] European Commission, *Fit for 55 - Infrastructure Needs*, 2021. [En ligne]. Disponible sur: europa.eu
- [37] WindEurope, *Accelerating Wind Turbine Blade Circularity*, 2021. [En ligne]. Disponible sur: www.windeurope.org
- [38] C. Poupinel, *Les calculateurs moteur pour voiture*, 2019.
- [39] J. Royer, T. Djiako, E. Schiller, *Pompage photovoltaïque – Manuel pour ingénieurs*, Bibliothèque nationale du Canada, 1998.[en ligne].
- [40] B. Equer, *Énergie solaire photovoltaïque*, Éditions Ellipses, 1993.[en ligne].
- [41] Fraunhofer ISE, *Photovoltaics Report*, 2023. [En ligne]. Disponible sur: www.ise.fraunhofer.de
- [42] SAE, *Vehicle Multiplexing Standards*, 2019. [En ligne]. Disponible sur: www.sae.org
- [43] MIT OpenCourseWare, *Fundamentals of Electric Vehicles*, 2022. [En ligne]. Disponible sur: ocw.mit.edu.
- [44] France-Renouvelables, *Perspectives des ENR en France*, 2023.
- [45] IRENA, *Renewable Energy Capacity Statistics*, 2019. [En ligne]. Disponible sur: www.irena.org
- [46] GWEC, *Global Wind Report 2023*, 2023. [En ligne]. Disponible sur: www.gwec.net
- [47] National Geographic, *Energy Systems Overview*, 2020.
- [48] E. Musk, Conference of *The Future of Sustainable Transport*, Tesla Inc., 2022.
- [49] A. Hachemi, *Architecture des convertisseurs pour VE*, Conférence internationale Éditions techniques ENSET, 2021.
- [50] Z. Boumediene, "Commandes intelligentes pour MRV," *Revue ST-SET*, 2018.