

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

ÉTUDE SUR LA COMMANDE EN PUISSANCE DANS LES SYSTÈMES DE  
RECHARGE DES VÉHICULES ÉLECTRIQUES

MÉMOIRE PRÉSENTÉ  
COMME EXIGENCE PARTIELLE DE LA  
MAÎTRISE EN GÉNIE ÉLECTRIQUE

PAR  
ISSAM KAMRI

MARS 2023

Université du Québec à Trois-Rivières

Service de la bibliothèque

Avertissement

L'auteur de ce mémoire, de cette thèse ou de cet essai a autorisé l'Université du Québec à Trois-Rivières à diffuser, à des fins non lucratives, une copie de son mémoire, de sa thèse ou de son essai.

Cette diffusion n'entraîne pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits de propriété intellectuelle, incluant le droit d'auteur, sur ce mémoire, cette thèse ou cet essai. Notamment, la reproduction ou la publication de la totalité ou d'une partie importante de ce mémoire, de cette thèse et de son essai requiert son autorisation.

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES  
MAÎTRISE EN GÉNIE ÉLECTRIQUE (M. Sc. A.)

**Direction de recherche :**

---

Prof. Alben Cardenas, Ph. D.,

Directeur de recherche

**Jury d'évaluation**

Prof. Adam Waldemar Skorek, Ph.D., UQTR,

Évaluateur UQTR

Dr. Mauricio Higuera Cano, Ph.D. Nergica

Évaluateur externe

---

Prof. Alben Cardenas Ph. D, UQTR,

Directeur de recherche

# Résumé

La recharge des véhicules électriques est devenue de nos jours un facteur majeur pour le développement de l'industrie de l'électrification. Le temps de recharge, la disponibilité des bornes de recharge, l'énergie propre et d'autres éléments sont des sujets d'étude qui appellent les chercheurs pour faciliter aux clients l'utilisation des véhicules électriques.

Dans ce mémoire nous étudions les différents types de véhicules électriques ainsi que les différentes topologies de recharge des batteries.

Ce mémoire présente :

Une revue globale sur les véhicules électriques, leur marché et perspective de déploiement;

Une revue des articles scientifiques récents sur les technologies de recharge des véhicules électriques;

Une étude du système de recharge, sa modélisation et sa commande. Ce qui permet aussi de faire une comparaison des performances des topologies de recharge.

Plus spécifiquement, l'étude comprend la commande du système de recharge utilisant des contrôleurs classiques de type proportionnel intégral. L'étude de modélisation est faite sous MATLAB/Simulink, et considère des batteries utilisées typiquement dans les véhicules électriques existants dans le marché.

## **Avant-propos**

*Je gratifie ALLÂH qui m'a procuré la vie, la santé et l'intelligence.*

*Je dédie ce travail*

*À mon professeur ALBEN CARDENAS qui m'a bien encadré dans ce projet*

*À mes professeurs de l'UQTR et à tous mes professeurs qui m'ont aidé dans ma vie  
scolaire.*

*Aux membres d'évaluateurs qui ont accepté de me consacrer une partie de leur temps  
pour examiner et juger mon travail*

*À ma mère, mes frères, ma femme, que je ne dédommagerai jamais pour tout ce qu'ils*

*ont fait pour moi, aucune vénération ne pourrait être à la hauteur de leurs sacrifices*

*immenses, de l'amour et de l'affection qu'elle ne m'a jamais cessé de m'apporter.*

# Table des matières

|   |      |
|---|------|
| Résumé.....   | i    |
| Avant-propos.....   | ii   |
| Table des matières.....                                     | iii  |
| Liste des tableaux.....                                     | vii  |
| Liste des figures.....                                      | viii |
| Liste des symboles.....                                     | xii  |
| Chapitre 1 - Introduction.....                              | 1    |
| 1.1 Introduction.....                                       | 1    |
| 1.2 Contexte et problématique.....                          | 3    |
| 1.3 Objectifs et méthodologie.....                          | 4    |
| 1.4 Organisation du mémoire.....                            | 4    |
| Chapitre 2 - Généralités sur les véhicules électriques..... | 6    |
| 2.1 Introduction.....                                       | 6    |
| 2.2 Véhicules purement électriques (VÉ).....                | 7    |

|   |   |    |
|---|---|----|
| 2.2.1   | Chronologie du véhicule électrique.....                     | 8  |
| 2.2.2   | Fonctionnement d'un véhicule électrique.....                | 10 |
| 2.3   | Véhicules hybrides (VH).....                                | 11 |
| 2.3.1   | Les différentes configurations des véhicules hybrides ..... | 11 |
| 2.3.1.1   | Configuration série.....                                    | 12 |
| 2.3.1.2   | Configuration parallèle.....                                | 12 |
| 2.3.1.3   | Configuration série-parallèle.....                          | 13 |
| 2.3.1.4   | Configuration mixte .....                                   | 15 |
| 2.4   | Véhicule électrique à pile à combustible (VÉPC).....        | 16 |
| 2.5   | Véhicules hybrides rechargeables (VHR) .....                | 17 |
| 2.6   | Conclusion.....   | 18 |
| Chapitre 3 - Systèmes de recharge pour les véhicules électriques..... |   | 19 |
| 3.1   | Introduction aux systèmes de recharge.....                  | 19 |
| 3.1.1   | La recharge en courant alternatif .....                     | 20 |
| 3.1.2   | Cadre normatif des chargeurs CA.....                        | 22 |
| 3.1.2.1   | Chargeur type 1 .....                                       | 23 |
| 3.1.2.2   | Chargeur type 2 .....                                       | 25 |
| 3.1.2.3   | Chargeur type 4 .....                                       | 25 |

|  |   |    |
|--|---|----|
| 3.1.3  | Temps de recharge CA.....                         | 26 |
| 3.1.4  | La recharge en courant continu.....               | 27 |
| 3.1.4.1  | Chargeur type 1 .....                             | 29 |
| 3.1.4.2  | Chargeur type 2 .....                             | 30 |
| 3.1.4.3  | Chargeur type 3 .....                             | 31 |
| 3.1.4.4  | Chargeur type 4 .....                             | 32 |
| 3.1.4.5  | Chargeur type 5 .....                             | 33 |
| 3.1.4.6  | Temps de recharge CC .....                        | 33 |
| 3.2  | Les batteries des véhicules électriques .....     | 35 |
| 3.2.1  | Batteries au Plomb-Acide .....                    | 35 |
| 3.2.2  | Batteries au Nickel .....                         | 36 |
| 3.2.3  | Batteries au Lithium-ion .....                    | 37 |
| 3.3  | Les convertisseurs statiques de puissance .....   | 38 |
| 3.4  | Le réseau de recharge au Québec .....             | 40 |
| 3.4.1  | Le réseau de recharge « Circuit électrique »..... | 40 |
| 3.4.2  | Le réseau de recharge de Tesla .....              | 41 |
| 3.5  | Conclusion.....                                   | 42 |
| Chapitre 4 - Simulation d'un système de recharge ..... |   | 43 |



|       |   |    |
|-------|---|----|
| 4.1   | Introduction .....                                | 43 |
| 4.2   | Analyse de topologies de convertisseurs .....     | 44 |
| 4.2.1 | Convertisseur élévateur conventionnel .....       | 46 |
| 4.2.2 | Convertisseur élévateur sans ponts .....          | 52 |
| 4.2.3 | Convertisseur élévateur entrelacé .....           | 56 |
| 4.2.4 | Convertisseur élévateur entrelacé sans ponts..... | 60 |
| 4.3   | Comparaison et discussion .....                   | 64 |
| 4.4   | Conclusion.....                                   | 68 |
|       | Chapitre 5 - Conclusion .....                     | 69 |
|       | Références .....                                  | 71 |
|       | Annexe .....                                      | 78 |

## Liste des tableaux

|   |    |
|---|----|
| Tableau 2-1 Immatriculations des automobiles neufs au Canada [11]. .....              | 7  |
| Tableau 3-1 Niveaux de recharge des VÉ et caractéristiques moyennes [33], [34]. ..... | 19 |
| Tableau 3-2 Tableau comparatif des batteries au nickel [55] .....                     | 37 |
| Tableau 3-3 Tableau comparatif des batteries au lithium-ion [58] .....                | 38 |

## Liste des figures

|  |    |
|--|----|
| Figure 2-1 Thomas Parker et son premier véhicule [16].....               | 9  |
| Figure 2-2 Composants d'un VÉ [17].....                                  | 10 |
| Figure 2-3 Configuration hybride-série .....                             | 12 |
| Figure 2-4 Configuration hybride-parallèle [23].....                     | 13 |
| Figure 2-5 Configuration série-parallèle [23]. .....                     | 14 |
| Figure 2-6 Configuration mixte [23].....                                 | 15 |
| Figure 2-7 Pile à combustible à hydrogène [25] .....                     | 16 |
| Figure 2-8 Toyota FCV [26]. .....  | 17 |
| Figure 2-9 Structure d'un véhicule hybride rechargeable [30]. .....      | 18 |
| Figure 3-1 Recharge CA [34].....   | 21 |
| Figure 3-2 Chargeur CA [34].....   | 22 |
| Figure 3-3 Chargeur type 1 [34]. .....                                   | 24 |
| Figure 3-4 Chargeur type 2 [34]. .....                                   | 25 |
| Figure 3-5 Chargeur type 4 [34]. .....                                   | 26 |
| Figure 3-6 La recharge CC [38].....                                      | 28 |
| Figure 3-7 Chargeur CC [34].....   | 28 |
| Figure 3-8 Combo 1 [34]. .....   | 30 |
| Figure 3-9 Combo 2 [34]. .....   | 30 |
| Figure 3-10 Chargeur type 3 [34].....                                    | 32 |
| Figure 3-11 Chargeur type 5 [34].....                                    | 33 |
| Figure 3-12 Charge et décharge d'une batterie au Plomb-acide [52]. ..... | 36 |
| Figure 3-13 Convertisseurs CC-CC et CC/CA dans un VÉ [63].....           | 39 |

|  |    |
|--|----|
| Figure 3-14 Carte de circuit électrique (29 Mars 2022) [66].   | 41 |
| Figure 3-15 Stations de super chargeurs TESLA (Décembre 2021) [67].  | 41 |
| Figure 4-1 Diagramme de blocs d'un chargeur universel [72].  | 43 |
| Figure 4-2 Caractéristiques de la batterie.  | 45 |
| Figure 4-3 Convertisseur élévateur conventionnel   | 46 |
| Figure 4-4 Architecture de commande du convertisseur   | 47 |
| Figure 4-5 Architecture de mesure utilisée pour l'analyse des performances   | 48 |
| Figure 4-6 Résultats de simulation convertisseur élévateur conventionnel –<br>puissance active et réactive                                   | 49 |
| Figure 4-7 Résultats de simulation convertisseur élévateur conventionnel –<br>courant et tension dans la diode.                              | 49 |
| Figure 4-8 Résultats de simulation convertisseur élévateur conventionnel –<br>courant et tension dans l'interrupteur contrôlé (MOSFET/IGBT). | 50 |
| Figure 4-9 Résultats de simulation convertisseur élévateur conventionnel –<br>Tension et état de charge de la batterie.                      | 51 |
| Figure 4-10 Résultats de simulation convertisseur élévateur conventionnel -<br>Courant de la batterie.                                       | 51 |
| Figure 4-11 Résultats de simulation convertisseur élévateur conventionnel -<br>Taux de distorsion harmonique.                                | 52 |
| Figure 4-12 Convertisseur élévateur sans ponts.  | 53 |
| Figure 4-13 Résultats de simulation convertisseur élévateur sans ponts -<br>puissance active et réactive.                                    | 53 |
| Figure 4-14 Résultats de simulation convertisseur élévateur sans ponts –<br>courant et tension dans la diode.                                | 54 |
| Figure 4-15 Résultats de simulation convertisseur élévateur sans ponts -<br>courant et tension dans l'interrupteur contrôlé (MOSFET/IGBT).   | 54 |
| Figure 4-16 Résultats de simulation convertisseur élévateur sans ponts –tension<br>et état de charge de la batterie                          | 55 |

|  |    |
|--|----|
| Figure 4-17 Résultats de simulation convertisseur élévateur sans ponts –<br>courant de la batterie .....   | 55 |
| Figure 4-18 Résultats de simulation convertisseur élévateur sans ponts-taux de<br>distorsion harmonique. ....  | 56 |
| Figure 4-19 Convertisseur élévateur entrelacé.....   | 57 |
| Figure 4-20 Résultats de simulation convertisseur élévateur entrelacé -<br>puissance active et réactive. ....  | 57 |
| Figure 4-21 Résultats de simulation convertisseur élévateur entrelacé -courant<br>et tension dans la diode.....  | 58 |
| Figure 4-22 Résultats de simulation convertisseur élévateur entrelacé - courant<br>et tension dans l'interrupteur contrôlé (MOSFET/IGBT). ....               | 58 |
| Figure 4-23 Résultats de simulation convertisseur élévateur entrelacé - Tension<br>et état de charge de la batterie. ....                                    | 59 |
| Figure 4-24 Résultats de simulation convertisseur élévateur entrelacé - Courant<br>de la batterie. ....  | 59 |
| Figure 4-25 Résultats de simulation convertisseur élévateur entrelacé -taux de<br>distorsion harmonique. ....  | 60 |
| Figure 4-26 Convertisseur élévateur entrelacé sans ponts. ....   | 61 |
| Figure 4-27 Résultats de simulation convertisseur élévateur entrelacé sans ponts<br>- puissance active et réactive. ....                                     | 61 |
| Figure 4-28 Résultats de simulation convertisseur élévateur entrelacé sans ponts<br>- courant et tension dans la diode. ....                                 | 62 |
| Figure 4-29 Résultats de simulation convertisseur élévateur entrelacé sans ponts<br>- courant et tension dans l'interrupteur contrôlé<br>(MOSFET/IGBT). .... | 62 |
| Figure 4-30 Résultats de simulation convertisseur élévateur entrelacé sans ponts<br>–Tension et état de charge de la batterie. ....                          | 63 |
| Figure 4-31 Résultats de simulation convertisseur élévateur entrelacé sans ponts<br>-Courant de la batterie. ....  | 63 |
| Figure 4-32 Résultats de simulation convertisseur élévateur entrelacé sans ponts<br>-taux de distorsion harmonique. ....                                     | 64 |

|   |    |
|---|----|
| Figure 4-33 Comparaison de taux de distorsion harmonique en régime<br>transitoire.....    | 66 |
| Figure 4-34 Comparaison de taux de distorsion en régime permanent.....                    | 66 |
| Figure 4-35 Comparaison de puissance des interrupteurs (semi-conducteurs).....            | 67 |
| Figure 4-36 Comparaison d'énergie dissipée par les semi-conducteurs des<br>circuits ..... | 67 |

## Liste des symboles

VÉ : Véhicule Électrique

CA : Courant Alternatif

CC : Courant Continu

VH : Véhicule Hybride

VÉHR : Véhicule Électrique Hybride Rechargeable

RE : Réseau d'Électricité

VÉPC : Véhicule Électrique à Pile à Combustible

BR : Borne de Recharge

V2H : Véhicule à Domicile (Vehicle to home)

V2V : Véhicule à Véhicule (Vehicle to vehicle)

V2G : Véhicule à Réseau (Vehicle to grid)

# Chapitre 1 - Introduction

## 1.1 Introduction

Par la circonstance du souci qu'inspire notre époque à la protection de l'environnement, à réduire les problèmes de la pollution atmosphérique, et les émissions des gaz à effet de serre, l'intérêt qui se révèle pour l'utilisation des voitures électriques (VÉ) est devenu de plus en plus important [1].

Le Québec tend vers l'électrification du parc des véhicules (des ministères, des organismes, de la santé.). En 2019, le gouvernement a acquis 1000 véhicules électriques pour amorcer cette transition. Dans le cadre du plan directeur de la transition énergétique, le gouvernement québécois a fixé également comme objectifs pour l'année 2030: 100 % des automobiles, des fourgonnettes, des minifourgonnettes et des véhicules utilitaires sport (VUS) et 25 % des camionnettes seront électriques [2].

Cependant, vu la situation actuelle de leur développement technologique et du point de vue de la rentabilité et la performance, les VÉ n'arrivent pas encore à être un bon concurrent des voitures classiques à essence (autonomie des batteries, temps de recharge...) [3].

Les conducteurs ne considèrent pas la mobilité électrique comme fiable et confortable à moins de disposer d'installations de recharge dans les plages prévisibles. En revanche, les investisseurs de l'infrastructure de recharge s'attendraient à un revenu rapide et régulier après



l'installation. Toutefois, l'obtention du point d'équilibre économique de cette infrastructure sera probablement un processus à moyen terme [4].

Il est clair que le développement des installations de recharge des véhicules électriques jouera un rôle important pour la continuité de ce domaine, lorsque les voitures ne disposent pas d'énergie suffisante dans la batterie pour couvrir un trajet, il est nécessaire l'adoption d'une solution de recharge rapide et fiable. Notons que le problème de la rapidité de la recharge est l'un des grands défis auquel les chercheurs du domaine sont confrontés.

Si des bornes de recharge rapides sont disponibles, lorsque les véhicules de la flotte ne disposent pas d'énergie suffisante dans la batterie ou si l'autonomie est insuffisante pour couvrir un trajet, les véhicules sont rapidement chargés pour terminer le trajet. D'autre part, les véhicules peuvent être chargés à basse puissance lorsqu'ils sont garés la nuit [5].

L'emplacement physique des composants permettant de convertir la puissance fournie par le réseau en celle requise par la batterie du véhicule peut être classé en tant que chargeur intégré et externe :

- Les chargeurs intégrés (ou embarqués) sont situés à l'intérieur du véhicule et leur taille et leur puissance sont souvent limitées par l'espace disponible dans le véhicule.
- Les chargeurs hors carte (ou externes) sont situés à l'extérieur du véhicule, ce qui offre davantage de flexibilité en termes de la puissance pouvant être délivrée.

Les deux types de chargeurs doivent contenir des circuits de commande et communiquer en temps réel avec le système de gestion de la batterie du véhicule (BMS pour *Battery Management System*). Cela permet de garantir que la batterie soit chargée de manière

optimale, en évitant de l'endommager par une surcharge. Le chargeur à courant alternatif (CA) utilise généralement un convertisseur intégré tandis que celui à courant continu (CC) utilisent un convertisseur externe [6].

## 1.2 Contexte et problématique

Comme nous avons cité avant, le développement des installations ou infrastructures de recharge des VÉ va nous permettre au futur de continuer dans l'électrification des transports et atteindre les objectifs de réductions des émissions. Pour cela, nous sommes dans l'obligation d'étudier les systèmes de commande, et de comprendre les différentes méthodes qui existent et celles en développement. Actuellement, la voiture purement électrique n'est pas la seule dans le marché automobile, elle a une concurrence de même genre cette fois-ci, autrement dit, la voiture hybride (VH) [7]. La VH comprend deux types de fonctionnements différents, typiquement, dans un mode la voiture fonctionne à l'essence et dans l'autre à l'électricité [8].

Une recherche bibliographique, sur IEEE Xplore, a été faite pour savoir l'état d'avancement dans ce domaine, à savoir, Fariborz Musavi, Wilson E et William G. Dunford ont proposé en 2010 une analyse des différents types de convertisseurs utilisés dans les chargeurs pour les voitures électriques hybrides rechargeables (VÉHR).

Une étude comparative a été faite entre les différentes topologies de recharges ainsi que leur impact sur le réseau électrique (RE), et des taux de distorsion harmonique à des tensions d'entrée différentes [9][10].

Ce mémoire adresse spécifiquement la problématique de la recharge sous l'angle de la conversion de puissance et l'évaluation de l'impact de la recharge sur la qualité de l'alimentation électrique.

### **1.3 Objectifs et méthodologie**

L'objectif premier de ce projet est d'étudier et comparer les topologies des circuits de puissance actuellement utilisées dans les systèmes de recharge des véhicules électriques. On s'intéresse à la recharge à partir d'une connexion électrique domestique (240V/60Hz).

Ce projet comporte plusieurs étapes :

- 1) Étude bibliographique générale sur les systèmes de recharge des véhicules électriques et sa commande en puissance;
  - a. Cadre normatif;
  - b. Architectures et topologies;
  - c. Méthodes de commande;
- 2) Modélisation des topologies et/ou architectures de recharge;
- 3) Évaluation par simulation des topologies de recharge;
- 4) Analyse comparative des topologies de recharge adaptées pour améliorer l'interaction entre le véhicule, la borne et le réseau électrique;

### **1.4 Organisation du mémoire**

Le mémoire est organisé en cinq (5) chapitres et repartit comme suit: le deuxième chapitre présente une recherche bibliographique générale sur les véhicules électriques. Le chapitre 3

porte sur les systèmes de recharge des véhicules électriques. Le chapitre 4 est consacré à la modélisation sous MATLAB/Simulink, la simulation et la comparaison des performances des systèmes de recharge. Enfin, le chapitre 5 présente une conclusion générale du projet de recherche.

# Chapitre 2 - Généralités sur les véhicules électriques

## 2.1 Introduction

Dans le présent chapitre nous présenterons les différents types de véhicules électriques (VÉ) qui sont disponibles commercialement. Dans un premier temps, nous allons introduire les véhicules purement électriques, les véhicules hybrides (VH), et les véhicules électriques à pile à combustible (VÉPC). Enfin, nous allons présenter un cas spécial des véhicules hybrides, ce sont les véhicules hybrides rechargeables (VHR). Nous présentons également les topologies et architectures, ainsi qu'une courte discussion des avantages et inconvénients.

Au Canada, nous pouvons trouver la grande majorité de « types de véhicules » disponibles au monde : à essence, au diesel, électrique à batterie, hybride électrique, hybride électrique rechargeable et d'autres qui combinent certaines caractéristiques. On peut voir dans le Tableau 2-1, un résumé de l'augmentation des véhicules de promenade immatriculés au Canada entre 2016 et 2021. Cette statistique exclut les autobus, les remorques, les véhicules récréatifs, les motocyclettes, les motoneiges, et les voiturettes de golf. On voit bien que le nombre de véhicules électriques de tout type augmente, tandis que les voitures à essence ou diesel diminue ou demeure quasiment stable et cela est expliqué par la tendance à faire le virage vers les véhicules électriques.

Tableau 2-1 Immatriculations des automobiles neufs au Canada [11].

| Géographie                      | Canada                    |         |         |         |         |
|---------------------------------|---------------------------|---------|---------|---------|---------|
| Genre de véhicule               | Total, genre de véhicules |         |         |         |         |
| Statistiques                    | Nombre de véhicules       |         |         |         |         |
| Type de carburant               | 2017                      | 2018    | 2019    | 2020    | 2021    |
| Unités                          |                           |         |         |         |         |
| Tous les types de carburant     | 2039236                   | 1975860 | 1930445 | 1545561 | 1646609 |
| Essence                         | 1929627                   | 1834883 | 1776571 | 1384928 | 1415361 |
| Diésel                          | 65787                     | 70600   | 59089   | 64769   | 65881   |
| Électrique à batterie           | 9079                      | 22570   | 35523   | 39036   | 58726   |
| Hybride électrique              | 24121                     | 25837   | 38390   | 41453   | 79330   |
| Hybride électrique rechargeable | 10617                     | 21713   | 20642   | 15317   | 27306   |
| Autres types de carburant       | 5                         | 257     | 230     | 58      | 5       |

## 2.2 Véhicules purement électriques (VÉ)

Un véhicule électrique est un moyen de transport fonctionnant avec un moteur électrique dont l'alimentation vient d'une batterie, on peut citer quelques exemples de véhicules

électriques qui sont connus à nos jours : Tesla Model S, Renault Zoe, Lexus UX 300e, Mercedes EQ EQA, BMW i4, Jaguar I-PACE, Hyundai Ioniq, SAIC Roewe Ei5.

À titre d'exemple, la Tesla Model S est une voiture électrique qui a une puissance de 1020 HP, et une autonomie estimée de 628 km, et une capacité de batterie de 113 kWh [12].

Dans la voiture électrique, la batterie joue le rôle de « réservoir » d'essence d'une voiture thermique. La différence la plus évidente entre les deux types de « réservoir » est que pour charger complètement la batterie il nous faut plus de temps que pour faire le plein d'essence. Par contre le rendement énergétique d'un VÉ reste toujours plus élevé que celui d'un véhicule thermique.

### **2.2.1 Chronologie du véhicule électrique.**

Le véhicule électrique a une longue histoire qui remonte au tout début de l'automobile, il a connu plusieurs géniteurs [13] [14] [15]. Alors, il a fallu commencer par l'invention du moteur électrique en 1828 par l'ingénieur Anyos Jedlik. Ensuite, il faudra attendre jusqu'en 1830 pour avoir le prototype d'un VÉ, réalisé par l'écossais Robert Anderson. Puis en 1834 Thomas Davenport a inventé le premier moteur électrique utilisable industriellement.

En 1835 le professeur Sibrandus Stratingh a créé un véhicule électrique miniature, et par la suite :

- En 1845, Moses Gerrish a fait fonctionner un véhicule électrique à deux places.
- En 1851, Charles Grafton Page a construit un petit véhicule électrique qui a fait le trajet Washington - Bladensburg à une vitesse de 30 km/h.

Jusqu'au 1859, les batteries qui alimentent le moteur étaient non rechargeables, c'est avec le physicien Gaston Planté que tout va basculer lorsqu'il a inventé la batterie rechargeable 1859-1860.

- En 1881, Gustave Trouvé et Charles Jeantaud ont présenté une automobile électrique à Paris.
- En 1884, Thomas Parker invente ce que dans beaucoup d'études est considéré comme le premier véhicule électrique à 4 roues (Figure 2-1).



Figure 2-1 Thomas Parker et son premier véhicule [16].

Il faut savoir que la fin du 20<sup>ème</sup> siècle était l'âge d'or des véhicules électriques. Aux États-Unis par exemple, les VÉ représentaient plus d'un tiers des véhicules au pays.

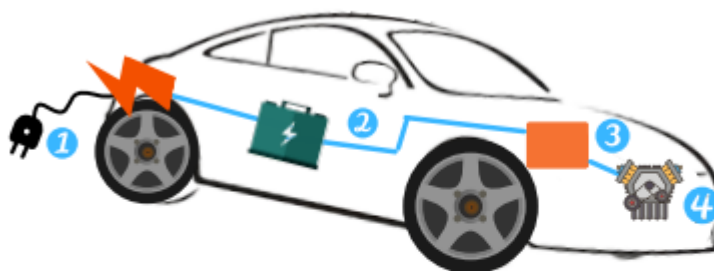
Avec le début du progrès du moteur thermique, les VÉ n'intéressent plus les constructeurs, après la découverte du pétrole et ils vont « presque disparaître » jusqu'aux années 70. Plus tard, le coût du pétrole et les contraintes liées aux changements climatiques et aux émissions



de gaz à effet de serre ont remis les véhicules électriques au point de discussion. À nos jours, nous pouvons clairement voir l'ampleur des VÉ à travers des grandes industries de l'automobile.

### 2.2.2 Fonctionnement d'un véhicule électrique

Les principaux composants du véhicule électrique sont montrés dans la Figure 2-2. Il s'agit d'une batterie pour le stockage de l'énergie et un ou plusieurs moteurs de traction, un ordinateur pour la gestion d'énergie, et enfin un système de conversion (avec une prise) pour la recharge de la batterie.



- [1] Prise pour recharge
- [2] Batteries pour stockage d'énergie
- [3] Ordinateur de contrôle et de gestion
- [4] Moteur de Traction

Figure 2-2 Composants d'un VÉ [17].

La recharge des VÉ a lieu dans la plupart des cas à l'intérieur du garage dans la résidence ou sur les lieux du travail, quand le conducteur a terminé son trajet. Cette recharge est généralement lente et prend environ 8 heures pour une voiture de petite taille avec une connexion à une borne de 120V. Souvent les gens vont vers la recharge rapide sur une voie

publique ou les stations de recharge. Néanmoins le principe d'usage du véhicule électrique reste : « je me recharge quand je m'arrête »[18].

## **2.3 Véhicules hybrides (VH)**

Comme mentionné précédemment, un véhicule hybride (VH) utilise deux types de motorisation, une motorisation thermique et une motorisation électrique. Il est équipé de :

- Un moteur thermique (souvent un moteur essence) ;
- Un, ou plusieurs, moteur(s) électrique(s) ;
- Une batterie de traction.

Un avantage des VH est de pouvoir utiliser d'une façon optimale les deux sources d'énergie afin de minimiser les émissions de gaz à effet de serre et d'optimiser la consommation d'énergie et par la suite réduire les frais d'achat de carburant.

### **2.3.1 Les différentes configurations des véhicules hybrides**

Les véhicules hybrides sont plus développés par rapport aux siècles passés. À nos jours, il existe 4 configurations fondamentales [19] [20]:

- La configuration série;
- La configuration parallèle;
- La configuration série parallèle;
- La configuration mixte (ou complexe).

### 2.3.1.1 Configuration série

La configuration hybride série est une combinaison de sources d'énergie dans laquelle la traction est obtenue par un seul moteur électrique central ou par des moteurs de moyeu de roue (ou moteur de roue). La source d'énergie totale à bord résulte de la combinaison de deux ou plus sources d'énergie comme illustré dans la Figure 2-3. Il est donc possible de dissocier le fonctionnement de la source d'énergie de la puissance de traction requise. La puissance nominale du groupe moteur-générateur peut être conçue de manière très différente en fonction des caractéristiques des applications [21], [22].

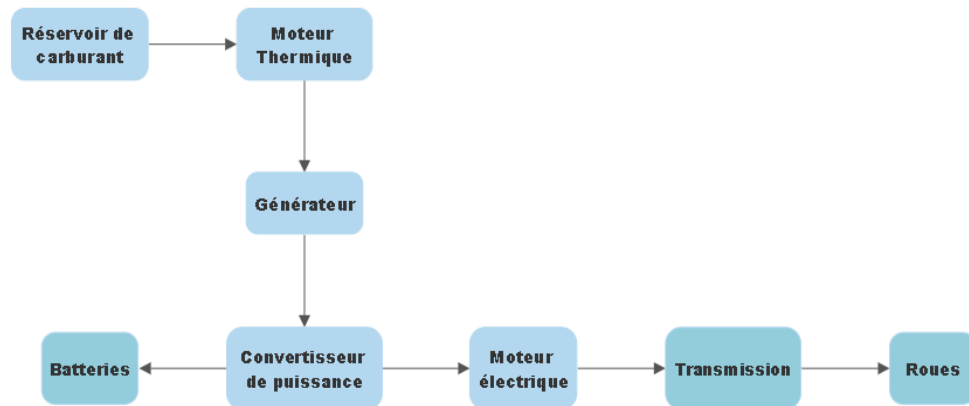


Figure 2-3 Configuration hybride-série

### 2.3.1.2 Configuration parallèle

Le véhicule avec configuration hybride parallèle utilise une combinaison de systèmes de traction différents. Typiquement, cette configuration utilise une combinaison de machines électriques et moteur à combustion interne, faisant partie de deux ou plusieurs arbres de transmission. Chaque arbre de transmission doit être associé à une source d'énergie. Les

entraînements hybrides parallèles réalisent une augmentation de puissance purement mécanique. Les embrayages peuvent déconnecter chaque moteur. Comme montré dans la Figure 2-4, de cette façon, il est possible de conduire seulement avec le moteur électrique, seulement avec le moteur à combustion interne, avec les deux moteurs ou avec le moteur à combustion interne entraînant seulement la machine électrique pour charger la batterie [20]. Les solutions avec des moteurs complètement déconnectés conduisant chaque essieu sont appelées hybrides mode double [21], [22].

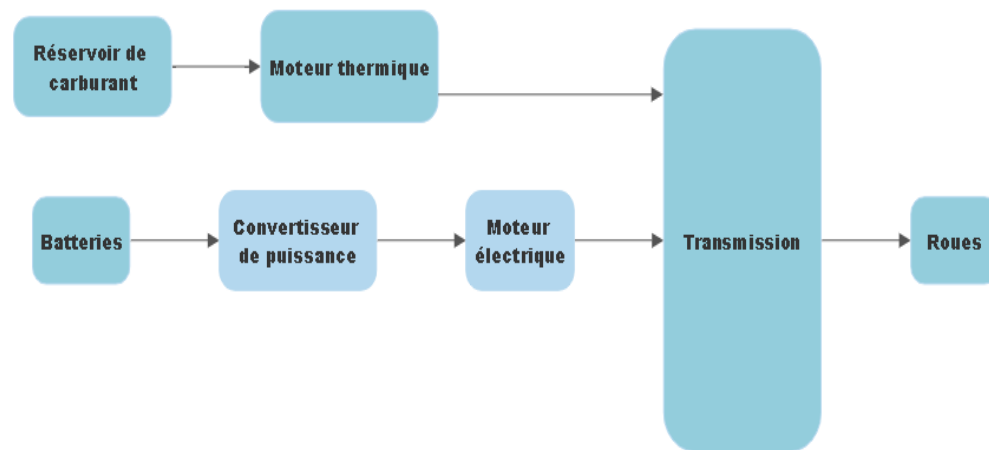


Figure 2-4 Configuration hybride-parallèle [23].

### 2.3.1.3 Configuration série-parallèle

La configuration série-parallèle est une combinaison d'une configuration série et d'une transmission hybride parallèle. En ajoutant une connexion mécanique dans une série hybride entre le moteur à combustion interne et le moteur électrique, une combinaison de série et mode de travail hybride parallèle peut être réalisée. Cette solution, montrée dans la Figure 2-

5, permet de bénéficier des avantages de la configuration parallèle ainsi que des concepts de la configuration hybride série.

Les moteurs thermiques sont généralement des moteurs à essence ou au diesel. Les systèmes d'entraînement hybrides ont besoin d'une bonne source d'énergie. Les batteries de traction normales ne conviennent pas aux hybrides. Les systèmes de gestion de l'énergie de toutes les structures hybrides joueront un rôle fondamental en raison de leur influence sur l'efficacité énergétique mondiale et les émissions. Par conséquent, un bon système d'acquisition et de contrôle des données devient un élément clé dans la structure d'entraînement [21], [22].

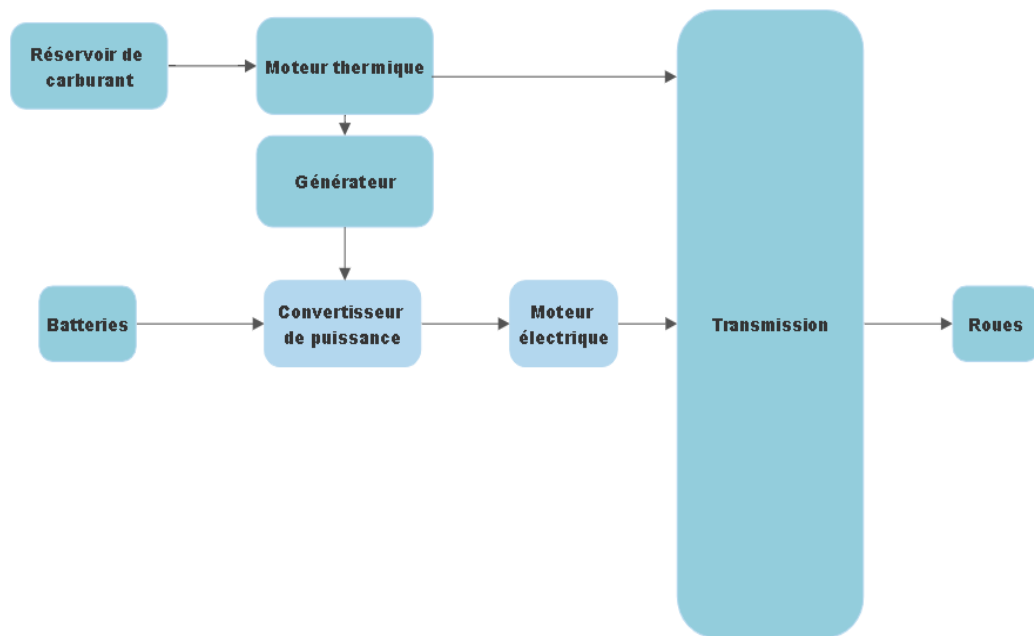


Figure 2-5 Configuration série-parallèle [23].

### 2.3.1.4 Configuration mixte

Les véhicules hybrides mixtes comprennent des éléments en configuration hybride série avec des unités de puissance en configuration hybride parallèle comme montrée dans la Figure 2-6. Ce type de configuration permet d'exploiter différents moyens de stockage, par exemple des volants d'inertie peuvent être raccordés mécaniquement par une transmission variable continue. Cette configuration peut être employée dans les véhicules hybrides combinés. Elle règle notamment le problème des véhicules hybrides parallèle puisqu'un moteur s'occupe en permanence de la recharge des batteries.

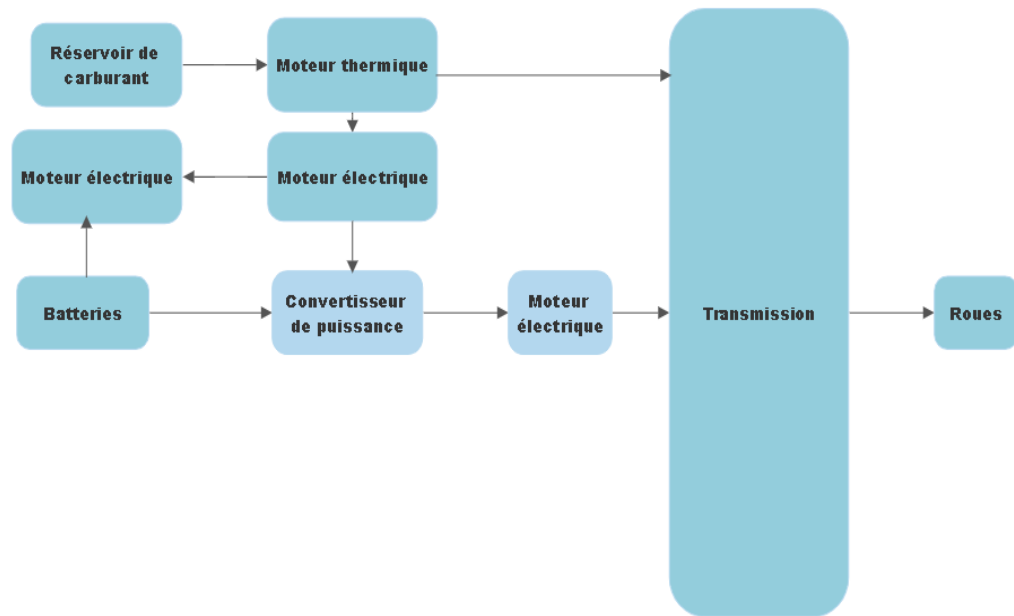


Figure 2-6 Configuration mixte [23].

## 2.4 Véhicule électrique à pile à combustible (VÉPC)

Les véhicules à pile à combustible sont les véhicules qui se rapprochent le plus aux véhicules traditionnels, l'essence est simplement remplacée par l'hydrogène, l'idée c'est d'avoir un véhicule propre qui n'échappe que de l'eau.

Le véhicule dit à pile à combustible est un véhicule électrique sauf qu'il produit son électricité à partir de l'hydrogène. Donc c'est quoi cette pile déjà? Une pile à combustible est un système de conversion qui génère un courant électrique grâce à l'oxydation d'un réducteur (dihydrogène) avec la réduction d'un oxydant (Air). Un diagramme simplifié d'une pile à combustible à hydrogène est présenté dans la Figure 2-7 [24].

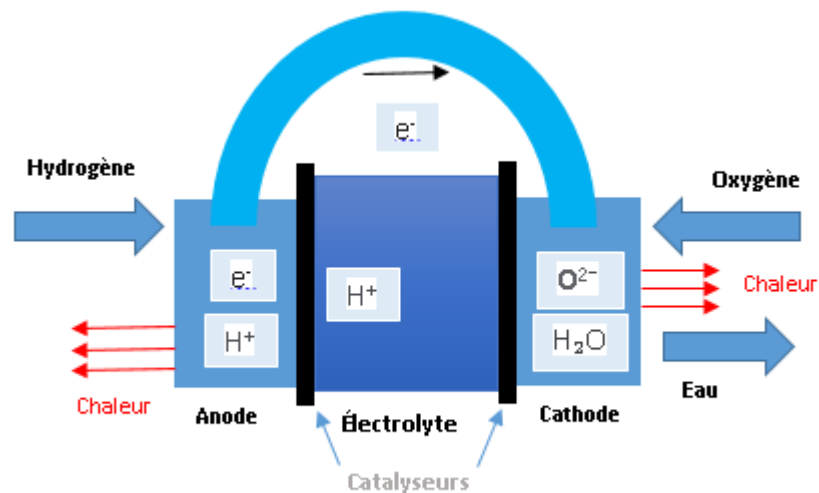


Figure 2-7 Pile à combustible à hydrogène [25]

Un véhicule à pile à combustible est propre, il ne génère pas de gaz à effet de serre lors de son opération. En plus, il prend presque le même temps pour faire le plein dans une station

qu'un véhicule classique. La Figure 2-8 montre la configuration de base d'un véhicule à pile à combustible à hydrogène. Cette figure est inspirée de la Toyota Mirai FCV.

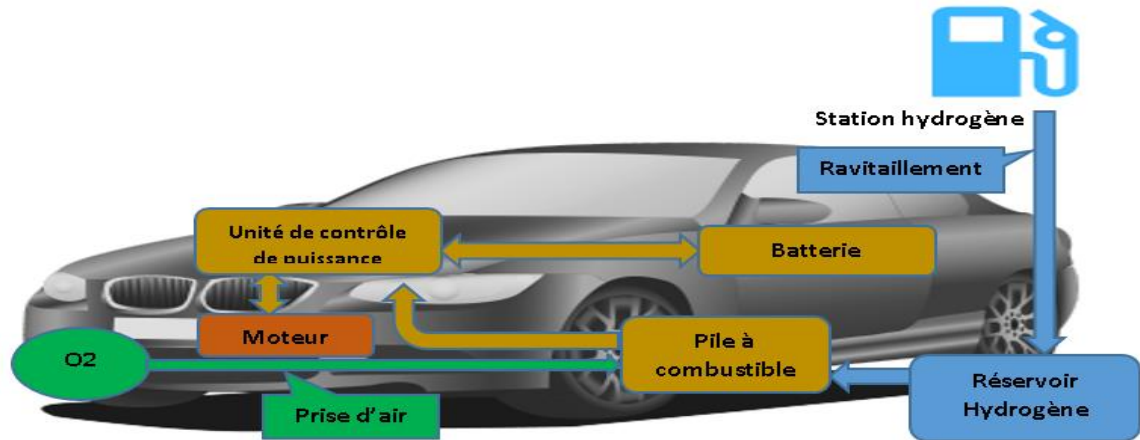


Figure 2-8 Toyota FCV [26].

En cas de panne d'électricité, cette Toyota FCV peut même fournir de l'électricité à une résidence si son réservoir est plein [27][28].

## 2.5 Véhicules hybrides rechargeables (VHR)

Un véhicule hybride rechargeable (VHR) c'est comme véhicule hybride, la différence est que la batterie de traction est conçue pour être chargée par branchement à une source d'énergie extérieure [29].

Comme montré dans la Figure 2-9, à titre indicatif, le moteur électrique entraîne l'essieu avant du véhicule par une transmission mécanique automatique (AMT). La demande de puissance électrique du moteur est répartie entre l'onduleur et l'unité d'alimentation auxiliaire, conformément au système de gestion de l'énergie.



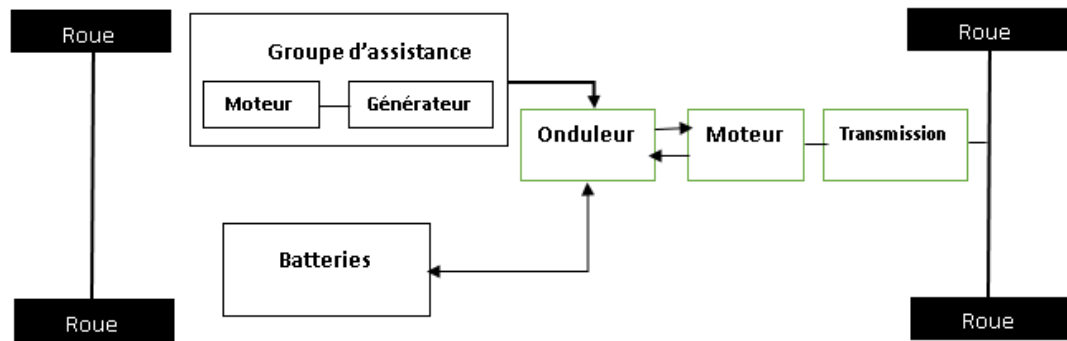


Figure 2-9 Structure d'un véhicule hybride rechargeable [30].

## 2.6 Conclusion

Nous avons abordé dans ce chapitre et de manière générale la thématique des véhicules électriques sous les différentes configurations et technologies. Nous avons également abordé la nécessité de réaliser la transition vers les véhicules électriques, et l'importance de la recharge comme moyen pour permettre l'adoption et le déploiement massif de ces technologies.

Nous traiterons dans le prochain chapitre le sujet des chargeurs pour les véhicules électriques.

## Chapitre 3 - Systèmes de recharge pour les véhicules électriques

Ce chapitre présente une revue rapide des aspects techniques et normatifs de la recharge électrique, les technologies et types de chargeurs, les types de batteries et les réseaux de recharge disponibles aux usagers des véhicules électriques.

### 3.1 Introduction aux systèmes de recharge

En général, il y a deux types de recharge pour les véhicules électriques, un premier type avec un courant alternatif CA et un deuxième avec un courant continu CC. Plus précisément, en industrie on a trois catégories de recharge associées à trois niveaux de puissance [31][32]. Le Tableau 3-1 résume les principales différences entre les trois niveaux de recharge.

Tableau 3-1 Niveaux de recharge des VÉ et caractéristiques moyennes [33], [34].

| Recharge des véhicules électriques : Niveaux 1,2,3 |                    |   |   |
|--|--------------------|---|---|
| Niveau de recharge                                 | Puissance délivrée | Autonomie ajoutée par heure de recharge | Temps de recharge VÉ d'une batterie de 60 kWh |
| Niveau 1   | 1-1.4 kW           | 4.8-8 km                                | 30-40 heures                                  |
| Niveau 2   | 3.9-19.2 kW        | 19.3-128.7 km                           | 2.5-4.5 heures                                |
| Niveau 3   | 24-300 kW          | 120.7-1931 km                           | 30-40 minutes                                 |

La recharge CA à l'aide du chargeur embarqué dans un VE est le moyen le plus populaire et le plus simple de recharge aujourd'hui. Les centrales électriques produisent de l'énergie sous forme du courant alternatif (CA) qui est transmis par des lignes de transmission à longue distance à nos maisons, sociétés..., et un grand nombre des appareils que nous utilisons dans nos foyers fonctionnent également en courant alternatif.

La batterie du VÉ nécessite une alimentation à courant continu (CC). Les questions qui se posent sont les suivantes :

Comment pouvons-nous alimenter les véhicules électriques en courant alternatif à partir du réseau?

Est-ce que la recharge CA des VÉ se fait de la même façon partout dans le monde? Sinon, quelles sont les différences?

Et enfin, la question qui revient souvent et semble être la plus importante pour un utilisateur d'un VÉ : combien de temps faut-il pour charger le VÉ avec l'alimentation du secteur?

### ***3.1.1 La recharge en courant alternatif***

Comme illustré dans la Figure 3-1, la recharge CA permet de recharger les VÉ en utilisant des bornes de recharge CA peu coûteuses qui sont alimentées directement à partir du réseau de distribution.

La recharge CA utilise un chargeur à bord pour convertir la tension CA du réseau en tension continue CC pour charger la batterie de traction en imposant un courant de recharge contrôlé [33].

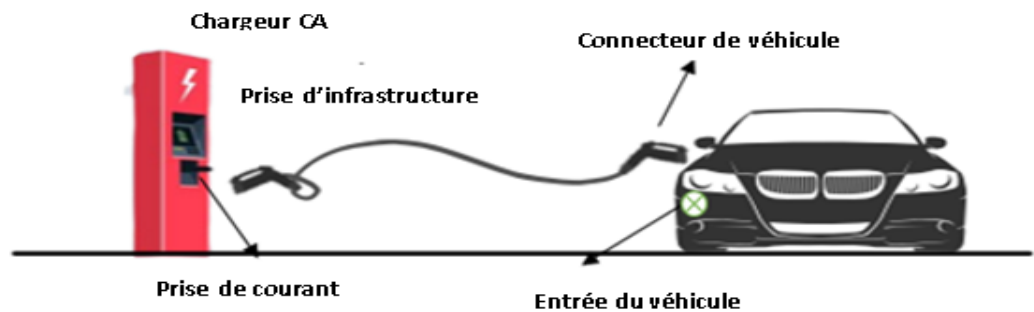


Figure 3-1 Recharge CA [34].

Les VÉ sont équipés d'une entrée de puissance normalisée, et un câble de recharge est utilisé pour connecter le véhicule à la prise d'infrastructure de la borne de recharge. Le chargeur embarqué doit être léger (généralement moins de 5 kg) et compact en raison de la limitation de la charge utile et de l'espace dans le véhicule. L'inconvénient de ce chargeur est la limitation de la puissance de sortie en raison de la taille [34], [35]. Des recherches se font actuellement pour augmenter la densité de puissance des chargeurs embarqués afin de permettre des temps de recharge plus courts.

La Figure 3-2 montre un diagramme de blocs d'une architecture typique d'un chargeur CA. Dans cette architecture, quand la borne de recharge et le VÉ sont connectés, le contrôleur de charge (Charge Controller) dans la station (borne) communique avec le véhicule. Les informations concernant la connectivité, et les limites de courant sont échangées entre le chargeur et le VÉ. Le chargeur à bord (on-board charger) est équipé d'un redresseur qui

convertit l'alimentation CA en alimentation CC. L'unité de commande de puissance (power control unit) ajuste correctement la tension et le courant à l'aide d'un convertisseur CC/CC pour fournir la puissance de recharge à la batterie.

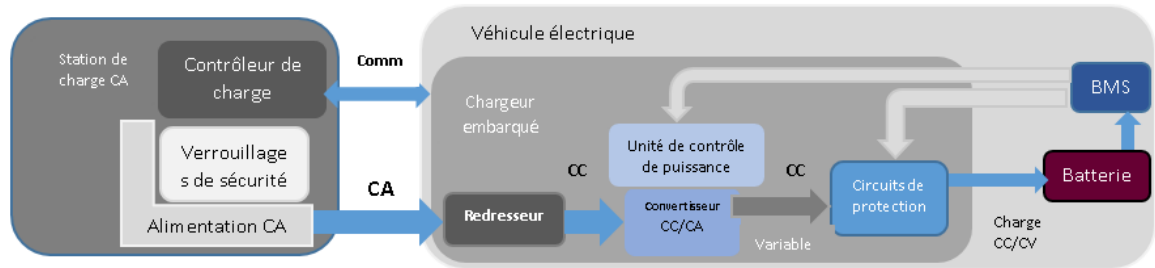


Figure 3-2 Chargeur CA [34].

L'unité de commande de puissance, à son tour, obtient des informations du système de gestion de la batterie (BMS) pour contrôler la recharge de la batterie. Si les limites de fonctionnement de la batterie sont dépassées, le BMS déclenche le circuit de protection (protection circuit) et isole la batterie si nécessaire [34], [35].

### 3.1.2 Cadre normatif des chargeurs CA

Dans l'industrie des VÉ on ne trouve pas un connecteur universel. En fonction de la marque de voiture et le pays, le connecteur varie dans la forme, la taille et la configuration. Une des principales raisons est la différence de tension et de fréquence CA. Généralement, un connecteur CA a deux broches ou plus pour transmettre la puissance. Il a également certaines broches plus petites pour permettre la communication entre la borne et le véhicule. Quatre (4) types de connecteurs CA sont utilisés dans le monde entier, à savoir :

- Type 1 : utilisé aux Etats-Unis et Japon.
- Type 2 : utilisé en Europe, y compris les voitures TESLA.

- Type 3 : utilisé en Europe mais **progressivement éliminé par le type 2.**
- Type 4 : Le connecteur propriétaire utilisé par Tesla pour ses voitures aux Etats-Unis.

Notons que la Chine a son propre connecteur qui est similaire au type 2.

### 3.1.2.1 Chargeur type 1

SAE International a proposé un coupleur d'attelage normalisé (SAE J1772-2001) pour les bornes de recharge des VÉ [36]. En 2009, une modification de cette conception avec un boîtier rond a été publié par Yazaki. Le SAE J1772-2009 est inclus dans la norme CEI 62196-2 en tant que mise en œuvre du connecteur Type 1 pour la recharge avec alimentation monophasée. Ce connecteur, illustré dans la Figure 3-3, est utilisé principalement aux États-Unis et au Japon et il est populairement connu comme le Yazaki ou Connecteur J1772 [37]. Le connecteur permet un niveau de tension de 120V ou de 240V, et admet un courant maximal de 80A.

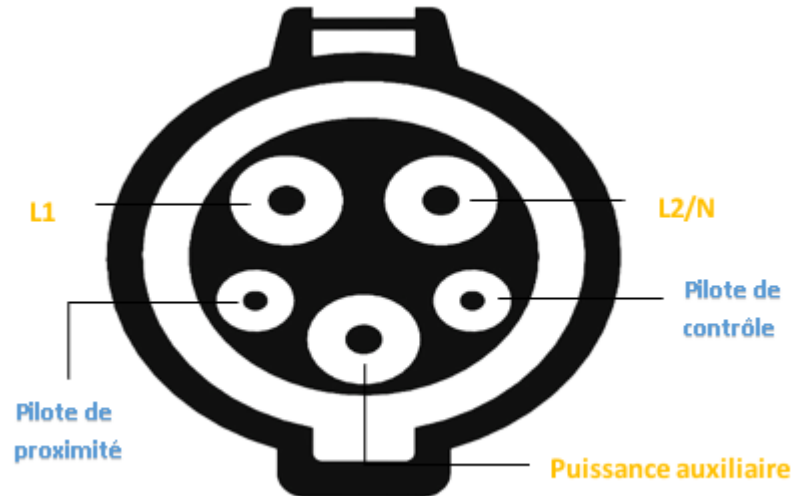


Figure 3-3 Chargeur type 1 [34].

Il est utilisé spécifiquement pour la recharge CA de basse tension monophasée. Il a un boîtier rond qui se compose de cinq broches : 2 fils CA, un fil de terre et deux broches de signal. Les broches de détection de proximité sont utilisées pour assurer la connectivité entre le VÉ et le chargeur, et le pilote de contrôle pour assurer le contrôle de la recharge.

- Le pilote de proximité (PP) vérifie si le connecteur du véhicule est correctement connecté à l'entrée du véhicule. Si la connexion n'est pas correctement établie, le pilote de proximité le détectera, et tout le processus sera désactivé pour des raisons de sécurité.
- La deuxième broche spéciale est le pilote de contrôle (CP), et elle est utilisée pour contrôler le courant de recharge. Le pilote de contrôle envoie en continu un signal modulé par largeur d'impulsion à la voiture. De cette façon, il indique à la voiture le maximum de courant qui peut être tiré de la borne de recharge.

### 3.1.2.2 Chargeur type 2

Le connecteur de type 2, montré dans la Figure 3-4, a été testé et standardisé en premier temps par l'Association de l'industrie automobile (VDA) de l'Allemagne comme VDE-AR-E 2623-2-2 [38], et par la suite recommandé pour l'utilisation par l'Association des Constructeurs Européens d'Automobiles (ACEA) en 2011 [38]. Il est conçu pour fonctionnement monophasé à 230V pour admettre un courant de 80A; et pour fonctionnement triphasé à 400V pour admettre un courant de 63A.

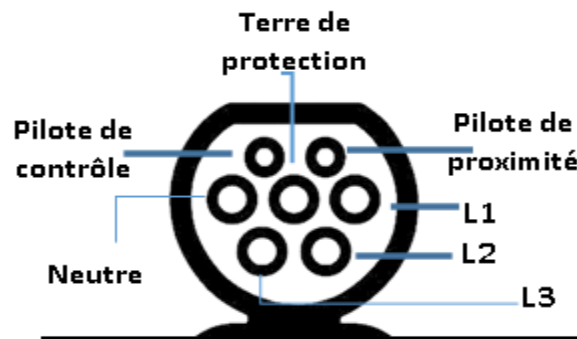


Figure 3-4 Chargeur type 2 [34].

Le connecteur est composé de deux petites broches de signal pour la commande et le pilote de proximité et de cinq grandes broches, qui combinent à la fois recharge CA et CC en un seul connecteur. Les cinq broches d'alimentation sont utilisées pour le neutre (N), les tensions de ligne (L1, L2, et L3) et la terre de protection (PE). Le connecteur peut donc être utilisé pour la recharge monophasée et triphasée.

### 3.1.2.3 Chargeur type 4

Ce type de chargeur est utilisé aux États-Unis pour la recharge CA et CC des voitures Tesla. Le connecteur est montré dans la Figure 3-5; il dispose d'un adaptateur pour l'utiliser



avec les bornes de recharge CA de type 1 et avec les bornes de recharge Chademo CC [38]. La puissance de recharge maximale est de 17,2 kW lorsqu'il est connecté à une prise 240V CA.



Figure 3-5 Chargeur type 4 [34].

Le connecteur est composé de deux petites broches de signal pour la commande et trois plus grands broches d'alimentation, qui combinent la charge CA et CC dans un seul connecteur. Les trois broches d'alimentation sont utilisées pour le neutre (N), la tension de ligne (L1) et connexion à la terre de protection (PE). Le connecteur ne peut être utilisé que pour le courant alternatif monophasé et non pas pour triphasé. Tesla utilise le même connecteur pour la recharge CC.

### 3.1.3 Temps de recharge CA

La recharge CA a typiquement besoin d'un convertisseur de puissance CA/CC à bord du véhicule. Si l'onduleur d'entraînement du moteur (motor drive) qui convertit la puissance CC de la batterie pour le moteur est bidirectionnel, il peut également être utilisé comme chargeur à bord pour la batterie. Cela élimine la nécessité d'un convertisseur CA/CC séparé

pour le chargeur embarqué. Selon le type de véhicule, cet onduleur de traction a une puissance assez élevée. Typiquement, cet onduleur peut fournir une puissance supérieure à 100 kW. Ce qui signifie également que le VÉ peut atteindre une puissance de recharge assez haute (>22 kW). Le défi est de concevoir le convertisseur bidirectionnel (motor drive) et sa commande pour fournir la double fonctionnalité de traction et recharge des VÉ [38].

La puissance (P) délivrée par le chargeur est définie par les limites de tension et courant du chargeur; Cette puissance (P) et l'énergie requise (E) viennent alors définir le temps de recharge de la batterie ( $T(\text{charge}) = f(E,P)$ ).

#### ***3.1.4 La recharge en courant continu***

Les chargeurs rapides CC sont conçus pour charger rapidement les véhicules électriques avec une puissance électrique comprise entre 50kW–350kW (Figures 3-6 et 3-7). Avec un fonctionnement à haute puissance, le convertisseur CA/CC, le convertisseur CC/CC et le circuit de contrôle de puissance deviennent plus grands et plus coûteux. C'est pourquoi les chargeurs CC sont mis en œuvre comme un chargeur hors-bord plutôt que comme un chargeur à bord de sorte qu'il ne prend pas d'espace dans le véhicule et peut être partagé par de nombreux utilisateurs [38].

Dans la première étape, le courant alternatif ou l'alimentation CA fournie par le réseau est converti en courant continu à l'aide d'un redresseur à l'intérieur de la station de recharge. L'unité de commande de puissance ajuste correctement la tension et le courant du convertisseur CC/CC à l'intérieur de la borne de recharge pour contrôler le courant continu variable fourni pour charger la batterie [33].

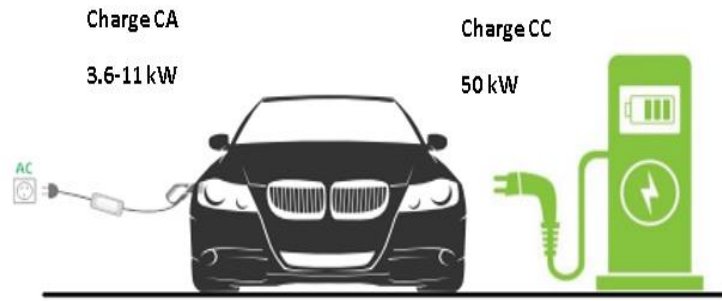


Figure 3-6 La recharge CC [38].

Des circuits de protection sont utilisés pour mettre hors tension le connecteur du VÉ et arrêter le processus en cas de panne ou une connexion incorrecte entre le VÉ et le chargeur.

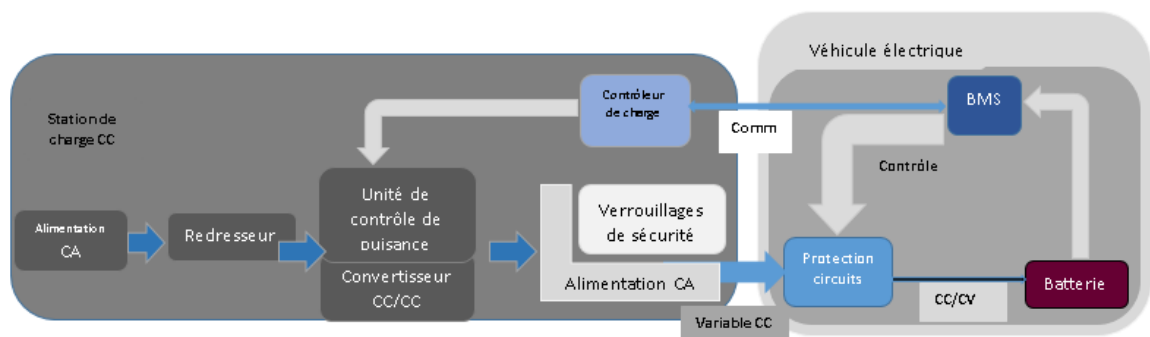


Figure 3-7 Chargeur CC [34].

Le système de gestion de la batterie (BMS) joue le rôle clé d'assurer la communication avec la station de recharge pour contrôler le courant livré à la batterie et de faire fonctionner les circuits de protection en cas de situation dangereuse.

Actuellement, il existe cinq (5) types de connecteur pour la recharge CC:

- Type 1 : CCS-combo 1, utilisé aux États-Unis [39].
- Type 2 : CCS-combo 2, utilisé en Europe [39].

- Type 3 : Chademo, utilisé par les voitures japonaises [40].
- Type 4 : Tesla DC, utilisé également pour la recharge CA [41].
- Type 5 : Connecteur utilisé en Chine basé sur la norme GB/T [42].

#### **3.1.4.1 Chargeur type 1**

CharIN e.V. est une association enregistrée fondée par Audi, BMW, Daimler, Mennekes, Opel, Phoenix Contact, Porsche, TÜV SÜD et Volkswagen. Cette association est la force motrice derrière le connecteur Combo. Les caractéristiques clés du système de recharge combiné sont l'utilisation d'un seul connecteur pour CA et CC en utilisant des broches séparées dans le même connecteur [43].

Le connecteur Combo de recharge CA et CC est conforme aux normes CEI 62196-1, CEI 62196-2 et CEI 62196-3 [44], [45], [46]. La signalisation et la communication conforme à la norme CEI 61851-1, 61851-22, et pour la charge CC avec la norme CEI 61851-1, 61851-23, ISO/IEC 15118, la norme allemande DIN SPEC 70121 et la norme SAE J2847/2 [46]. La Figure 3-8 présente à gauche le connecteur Combo 1 du côté station (borne), et à droite l'entrée du côté véhicule.

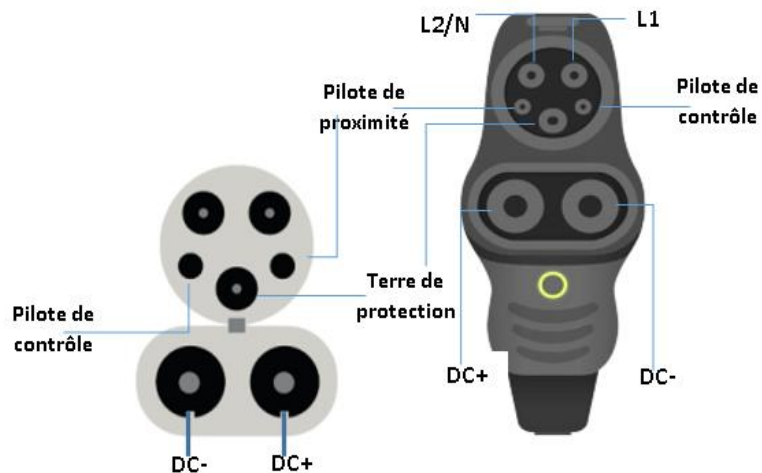


Figure 3-8 Combo 1 [34].

### 3.1.4.2 Chargeur type 2

La Figure 3-9 présente à gauche le connecteur Combo 2 du côté station (borne), et à droite l'entrée du côté véhicule.

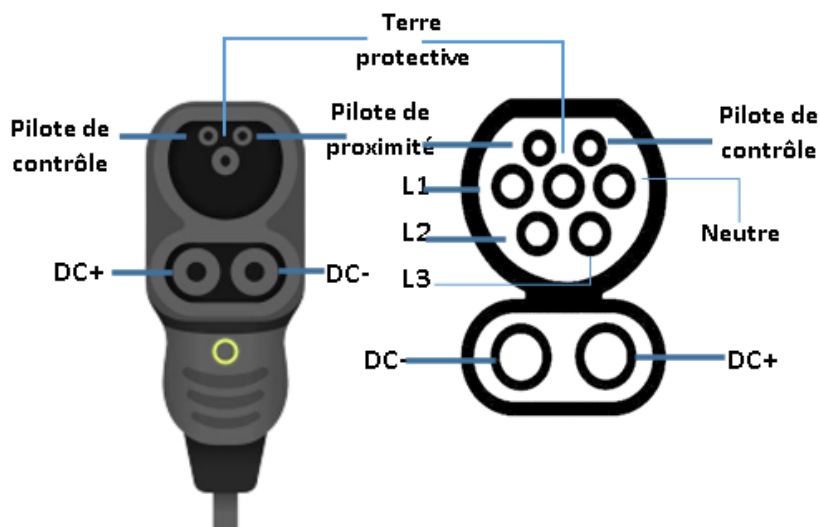


Figure 3-9 Combo 2 [34].

Le connecteur de véhicule de Combo1 et Combo 2 proviennent respectivement du connecteur CA de type 1 et de type 2. Le connecteur contient la broche de terre et deux broches de signal, à savoir le pilote de contrôle et le pilote de proximité.

À l'entrée du véhicule, la broche de configuration dans la partie supérieure est la même que celle du connecteur CA de type 1 et 2 pour la recharge CA, tandis que les deux broches inférieures sont utilisées pour la charge CC [46].

Ces connecteurs peuvent délivrer un courant jusqu'au 350 A et utilisés avec des niveaux de tension entre 200 et 1000V.

### **3.1.4.3 Chargeur type 3**

En mars 2010, Toyota Motor Corporation, Nissan Motor Co. Ltd., Mitsubishi Motors Corporation, Fuji Heavy Industries Ltd., et Tokyo Electric Power Company, Inc. ont officiellement établi la « Chademo Association » [38].

En 2011, le premier chargeur CC a été déployé en Europe. Chademo a été publié comme Norme CEI (IEC 61851-23, -24, ainsi que 62196-3) [46] et norme IEEE (IEEE Norme 2030.1.1TM-2015). Chademo est actuellement utilisé comme chargeur CC par tous les fabricants des VÉ japonais. Un aperçu du connecteur est montré dans la Figure 3-10.

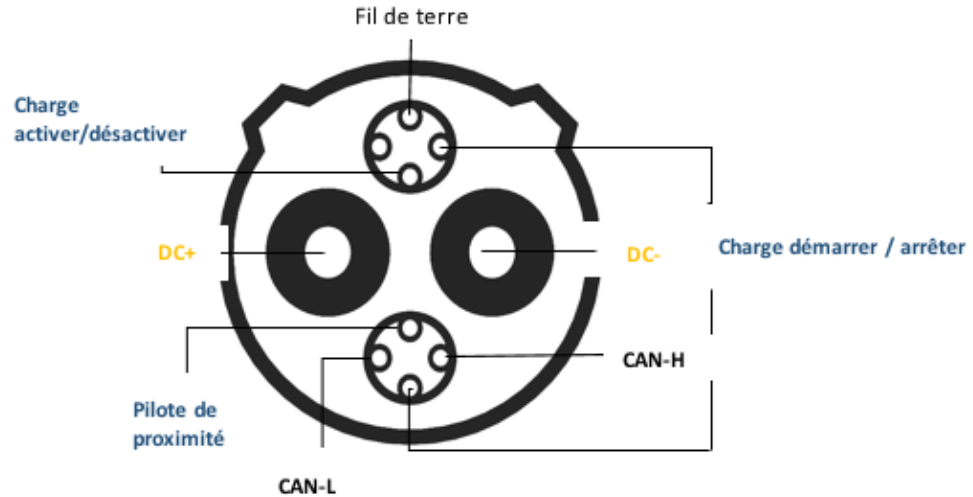


Figure 3-10 Chargeur type 3 [34].

Les niveaux de tension, et courant des connecteurs Chademo sont respectivement 50-500V, jusqu'à 400A. Ils peuvent fournir une puissance de crête de 200kW. Dans l'avenir, il est prévu que la recharge des VÉ utilise des niveaux de tension jusqu'à 1000 V et des puissances de plus de 400 kW [47].

#### 3.1.4.4 Chargeur type 4

Les super chargeurs Tesla aux États-Unis utilisent leur propre connecteur de recharge, tandis qu'en Europe on utilise le connecteur de type 2, mais avec l'option de recharge CC intégrée. L'aspect unique du connecteur Tesla est que le même connecteur est utilisé pour la recharge CA et CC. Tesla offre également un adaptateur pour utiliser des bornes de recharge Chademo CC [41]. Les chargeurs Tesla CC comme les chargeurs CA ont deux broches de signal et trois broches d'alimentation - deux broches pour l'alimentation CC et une pour la terre.

### 3.1.4.5 Chargeur type 5

La Chine a son propre connecteur de charge CC basé sur la norme 20234.3-2015, il utilise les bus de communication CAN [41]. Comme illustré dans la Figure 3-11, il dispose de 5 broches d'alimentation, 2 pour l'alimentation CC, 2 pour l'alimentation auxiliaire basse tension et une pour la terre. Ce chargeur a 4 broches de signal, deux pour le pilote de proximité et deux pour la communication CAN. Le niveau de tension maximal, et l'intensité de courant crête sont respectivement de 1000V et 250A.

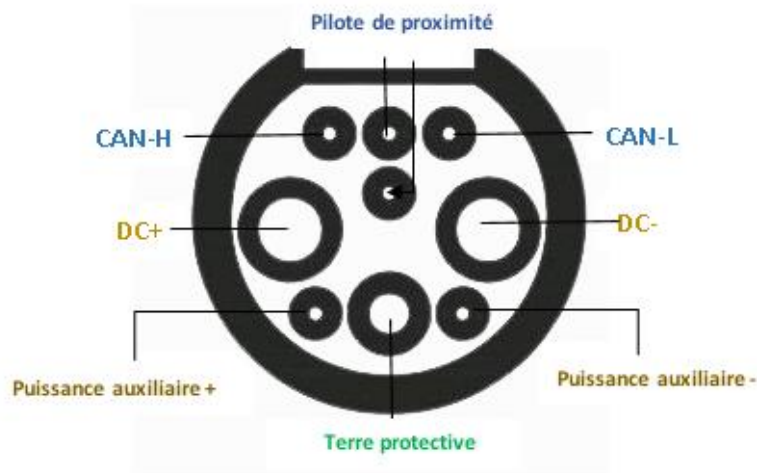


Figure 3-11 Chargeur type 5 [34].

### 3.1.4.6 Temps de recharge CC

La recharge rapide est très attrayante en raison de la puissance élevée qui offre des temps de recharge très courts. Toutefois, la puissance de recharge ne peut pas être augmentée à l'infini compte tenu des limitations techniques suivantes :

- Un courant de recharge plus élevé entraîne des pertes globales plus élevées dans le chargeur et dans la batterie.



- Au fur et à mesure que les courants de recharge augmentent, la capacité de la batterie diminue également. Ce phénomène peut être défini par Loi de Peukert [48].

$$C_p = I^k t \quad (1)$$

Avec :

$C_p$  : capacité de la batterie

$I$  : courant fourni

$T$  : temps de décharge

$K$  : constante de Peukert

- Le taux recharge/décharge de la batterie (C-rate) augmente avec une recharge rapide. Ce qui réduit la durée de vie de la batterie en raison de la chaleur produite et de la dégradation accrue due à la température plus élevée.

Le C-rate est défini par le rapport entre l'ampleur du courant tiré/alimenté à la batterie, et la capacité nominale en ampère-heure de la batterie.

$$\text{C-rate} = I (\text{charge}) / Q (\text{nominal})$$

- Lors du chargement rapide d'une batterie, l'état de charge (SOC) de la batterie ne peut être atteint que jusqu'à 70-80%. Cette limitation est due au fait que la recharge rapide crée un décalage entre la tension et l'état de charge et ce phénomène augmente à mesure que la batterie est chargée plus rapidement [49].

L'état de charge (SOC) est défini comme le rapport entre la quantité d'énergie actuellement stockée dans la batterie,  $E_{batt}$ , et la capacité totale de la batterie,  $E_{nom}$ .  $SOC = (E_{batt} \div E_{nom}) \times 100$ .

- Pour tout chargeur de VÉ, il est important que le câble soit flexible et léger pour les personnes de sorte qu'elles puissent l'utiliser et connecter à la voiture sans difficultés. Avec une puissance de recharge plus élevée, des câbles plus épais sont nécessaires pour permettre plus de courant de charge, sinon il va chauffer en raison des pertes.

À l'avenir avec des courants supérieurs à 250 A, les câbles deviendraient lourds et moins flexibles à utiliser. La solution serait d'utiliser des câbles plus minces avec un système de refroidissement pour assurer que les câbles ne chauffent pas. C'est, bien sûr, plus complexe et coûteux que l'option d'utiliser un câble sans refroidissement [50].

## 3.2 Les batteries des véhicules électriques

Les véhicules électriques (VÉ) utilisent une batterie de traction pour alimenter le ou les moteurs électriques. Il existe plusieurs technologies de batteries qui ont été utilisées ou sont utilisées actuellement dans les systèmes de transport.

### 3.2.1 Batteries au Plomb-Acide

Les batteries au plomb-acide peuvent être conçues pour être à haute puissance et sont peu coûteuses, sûres et fiables. Cependant, la faible énergie spécifique, le mauvais rendement par

temps froid et la courte durée de vie (calendrier et nombre de cycles) entravent leur utilisation. Des batteries au plomb de haute puissance sont en cours de développement, mais ces batteries ne sont utilisées que pour les charges auxiliaires dans les véhicules à propulsion électrique disponibles commercialement [51].

À la décharge, l'électrolyte est consommé (les  $\text{SO}_4^{2-}$  immigrent vers les électrodes). L'oxygène libéré par l'électrode positive s'unit aux ions  $\text{H}^+$  en solution pour former de l'eau. Comme montré dans la Figure 3-12, à la recharge, l'électrolyte est régénéré (mise en solution de  $\text{SO}_4^{2-}$ ). La plaque positive est peroxydée (formation de  $\text{PbO}_2$ ).

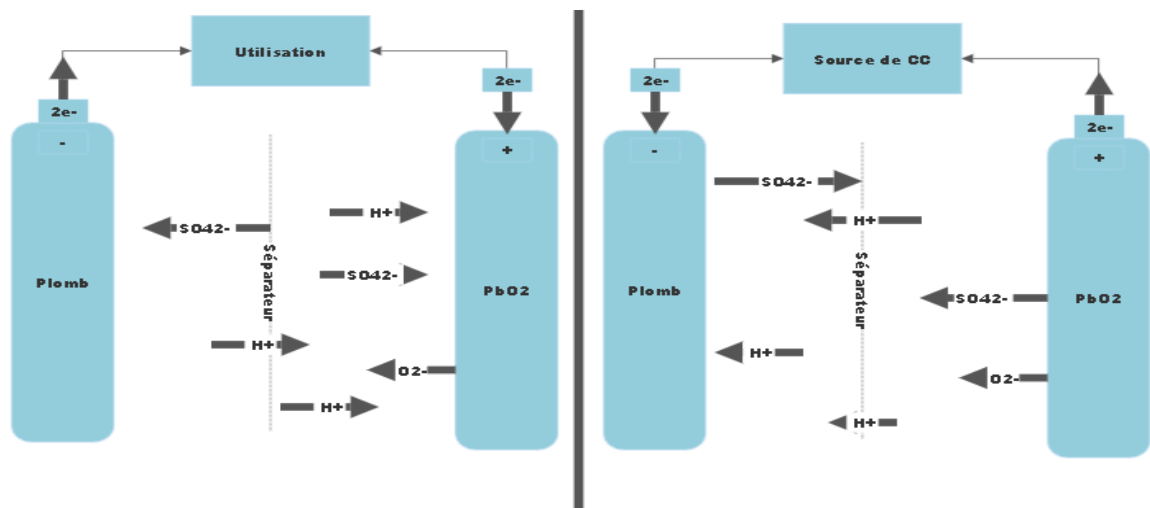


Figure 3-12 Charge et décharge d'une batterie au Plomb-acide [52].

### 3.2.2 Batteries au Nickel

Plusieurs types de batteries ont l'électrode positive au Nickel et pour l'électrode négative d'autres métaux comme le montre le Tableau 3-2. Le système de batterie Nickel-Cadmium utilise toujours la même électrode positive que celle au Nickel-Fer, tandis que l'électrode

négative est au Cadmium. La tension maximale de la cellule pendant la recharge est de 1,3V, et la tension moyenne de la cellule est de 1,2V.

Tableau 3-2 Tableau comparatif des batteries au Nickel [55]

| Batterie             | Tension cellule | Énergie spécifique (Wh kg <sup>-1</sup> ) | Puissance spécifique (W kg <sup>-1</sup> ) | Efficacité énergétique (%) | Cycle de Vie |
|----------------------|-----------------|---|--|----------------------------|--------------|
| Nickel-Fer           | 1.2             | 30-60                                     | 100  | 60-70                      | 1500         |
| Nickel-Cadmium       | 1.2             | 50-60                                     | 200  | 70-75                      | 1500         |
| Nickel-Zinc          | 1.2             | 80-100                                    | 170-1000                                   | 70-80                      | 500          |
| Nickel-métal hybride | 1.2             | 60-70                                     | 170-1000                                   | 70-80                      | 1000         |

### 3.2.3 Batteries au Lithium-ion

Les batteries au Lithium-ion (BLI) rechargeables deviennent de plus en plus importantes comme sources d'énergie utilisées dans les véhicules électriques. Les BLI ont commencé leur application commerciale et ont fait la démonstration de leur utilisation dans les véhicules à propulsion électrique partout dans le monde. En 2011, Nissan a lancé son nouveau véhicule électrique à faible puissance, le Nissan Leaf, et a vendu plus de 50 000 voitures jusqu'à 2014 [53]. Actuellement, la grande majorité de véhicules optent pour les batteries au Lithium,

comme Toyota, et Tesla [54]–[57]. Le tableau suivant présente les différents types de batteries au Lithium-ion.

Tableau 3-3 Tableau comparatif des batteries au Lithium-ion [58]

| Batterie                              | Tension Nominale (V) (Plage) | Cycle de vie | Taux de courant de charge(C) | Taux de courant de décharge (°C) | Emballent Thermique (°C) | Énergie Spécifique (Wh/Kg) |
|---------------------------------------|------------------------------|--------------|------------------------------|----------------------------------|--------------------------|----------------------------|
| Lithium Ion Phosphate                 | 2.5 – 3.65                   | 2000+        | 1                            | 1                                | 270                      | 90-120                     |
| Lithium Nickel Cobalt Aluminium Oxide | 3 - 4.2                      | 500-1000     | 0.7                          | 1                                | 150                      | 200-260                    |
| Lithium Titanate Oxide                | 1.8 – 2.85                   | 3000-7000    | 1                            | 10                               | Élevée                   | 50-80                      |
| Lithium Cobalt Oxide                  | 3 – 4.2                      | 500-1000     | 0.7 – 1                      | 1                                | 150                      | 150-200                    |
| Lithium Manganese Oxide               | 3 – 4.2                      | 300-700      | 0.7 – 1                      | 1                                | 250                      | 100-150                    |

### 3.3 Les convertisseurs statiques de puissance

Dans le domaine de la conversion de puissance, il existe trois grandes catégories de convertisseurs. Dans la première, nous trouvons le convertisseur CC-CC ou hacheur, qui

permet la conversion du courant continu en courant continu à différents niveaux de tension. Il y a deux grands types de hacheur selon le mode d'opération, le hacheur abaisseur et le hacheur élévateur [59]. La deuxième catégorie correspond au convertisseur CC-CA ou onduleur, qui est un appareil qui permet d'avoir un courant alternatif à partir d'une source de courant continu. Il est utilisé dans différents domaines à savoir les véhicules électriques, les variateurs de vitesses, et les énergies renouvelables [60], [61]. La troisième catégorie correspond au convertisseur CA-CC ou redresseur, celui qui fait la conversion de courant alternatif à courant continu [62]. Au niveau de la voiture électrique, pour son opération, on trouve les hacheurs et les onduleurs comme le montre la Figure 3-13. Il est pertinent de souligner que pour la connexion au réseau de recharge CA on a besoin d'un redresseur dédié à la recharge, ou de faire fonctionner l'onduleur en mode redresseur.

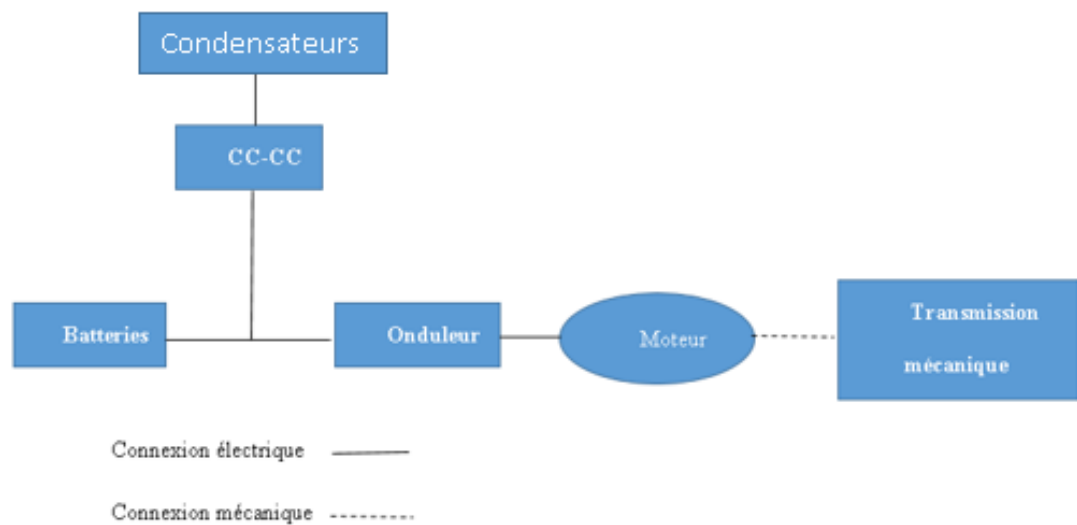


Figure 3-13 Convertisseurs CC/CC et CC/CA dans un VÉ [63].

Dans chaque véhicule électrique, il y a une batterie qui produit une certaine tension. Étant donné que cette tension pourrait ne pas être appropriée pour les différents dispositifs en cours d'entraînement, nous devons installer des convertisseurs le long de la voie du signal de puissance pour réaliser le conditionnement nécessaire.

### **3.4 Le réseau de recharge au Québec**

Comme mentionné précédemment, la recharge d'un véhicule électrique peut se faire à la maison par une borne à courant alternatif monophasé de 120V ou par une borne de 240V que l'on peut installer par un électricien [64]. En ce qui concerne la recharge en route, on peut facilement trouver plusieurs types de bornes de recharges. Au Québec en 2019, il y avait déjà plus de 6000 bornes de recharges installées, incluant 430 bornes de recharge rapide et 162 super chargeurs TESLA [65].

Les principaux fournisseurs de bornes sont :

#### *3.4.1 Le réseau de recharge « Circuit électrique »*

Dans la région du Québec ainsi qu'à l'est de l'Ontario à date du 29 Mars 2022, le réseau « circuit électrique » comptait 3400 de bornes de recharge dont 600 de recharge rapide montrée dans la Figure 3-14 [66]. Presque tous les véhicules sont supportés par le réseau et sont assistés par une application mobile qui montre l'existence et la disponibilité des bornes de recharge.

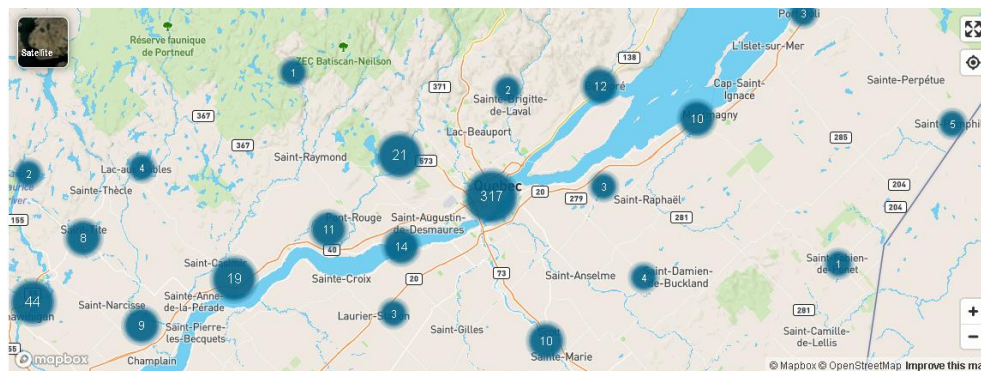


Figure 3-14 Carte de circuit électrique (29 Mars 2022) [66].

### 3.4.2 Le réseau de recharge de Tesla

Avec plus de 2500 de stations de super chargeurs, les stations TESLA constituent le plus grand fournisseur en Amérique du nord comme le montre la Figure 3-15.

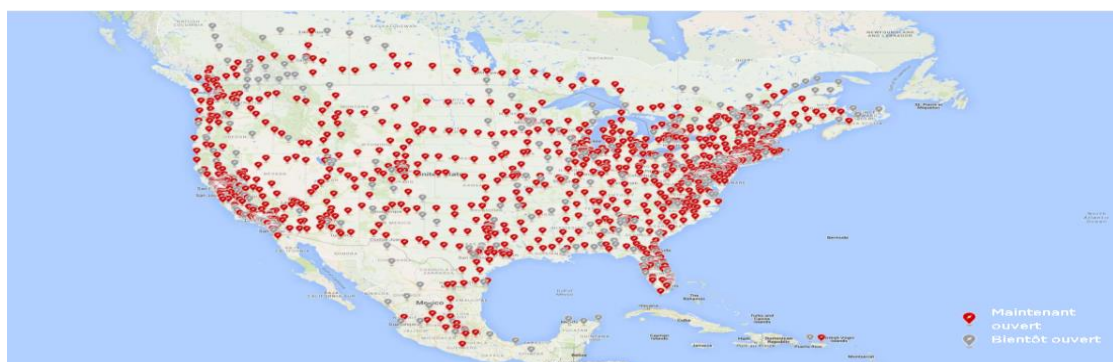


Figure 3-15 Stations de super chargeurs TESLA (Décembre 2021) [67]

En plus des véhicules électriques comme le TESLA ModelS, ModelX et Model Y, l'entreprise installe des stations de recharge pour assurer la disponibilité et la fiabilité à ses clients, ainsi qu'un outil informatique qui permet de planifier les voyages tout au long des trajets du continent [67].



D'autres réseaux existent au Québec pour renforcer l'industrie de recharge comme Charge Point Electrify, Petro Canada, Flo, et Evduty [68]–[71].

### **3.5 Conclusion**

Dans la recharge des véhicules électriques plusieurs facteurs entrent en jeu, tout d'abord le type de recharge, que ce soit par courant alternatif ou courant continu, ensuite il y a les batteries avec ses différentes technologies que nous avons présentées dans ce chapitre.

Dans la voiture électrique, on trouve également des convertisseurs statiques qui constituent les parties importantes pour la recharge et pour la gestion énergétique dans le véhicule. Bien sûr, on ne peut pas parler de la recharge sans parler des infrastructures et des stations de recharge, une industrie en expansion au Québec et partout dans le monde. Ce réseau de service de recharge comprend des chargeurs publics et privés de recharge comme celui des super chargeurs de Tesla qui permettent une recharge efficace dans un délai de dizaines de minutes.

# Chapitre 4 - Simulation d'un système de recharge

Ce chapitre présente une analyse par simulation de quatre types de circuit de puissance proposés dans la littérature scientifique et utilisés dans l'industrie pour la recharge de véhicules électriques à partir d'une alimentation à courant alternatif. Toutes les figures sont faites à partir des résultats de simulation obtenus à l'aide de MATLAB/Simulink.

## 4.1 Introduction

Comme illustré dans la Figure 4-1 pour une architecture de chargeur universel, la plupart des chargeurs contiennent un convertisseur CA-CC, et un convertisseur CC-CC avec des filtres à l'entrée et sortie du chargeur.

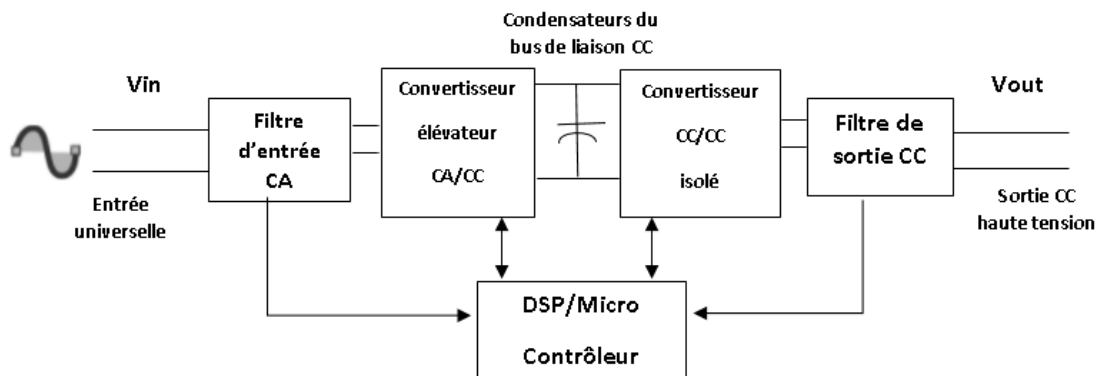


Figure 4-1 Diagramme de blocs d'un chargeur universel [72].

En vue de réduire la taille et la complexité des circuits de puissance des chargeurs, différentes topologies ont été proposées dans la littérature scientifique pour la recharge des

batteries des VÉ [10], [73]. Certaines de ces topologies permettent la minimisation des harmoniques de courant et la maximisation du facteur de puissance, de sorte à impacter minimalement l'opération du réseau de distribution d'électricité.

## 4.2 Analyse de topologies de convertisseurs

Nous considérons dans cette étude, les 4 topologies de convertisseur plus utilisées dans le domaine de la recharge [73], à savoir :

- Convertisseur élévateur conventionnel.
- Convertisseur élévateur sans ponts.
- Convertisseur élévateur entrelacé.
- Convertisseur élévateur entrelacé sans-ponts.

Dans un premier temps, nous allons modéliser chaque convertisseur sous MATLAB/Simulink. Ensuite, nous allons implémenter une commande permettant d'asservir la puissance transférée à la batterie. Nous allons évaluer et comparer les performances des convertisseurs pour les mêmes conditions de puissance fournie, capacité et état de charge de la batterie, et pour la même durée (ou période) d'analyse.

En plus du bon suivi des consignes, nous allons analyser l'effet de chaque topologie de convertisseur sur le taux de distorsion du courant tiré du réseau électrique, et les pertes dans le transfert de puissance. Cette analyse nous permettra de comparer les caractéristiques de chaque système, pour enfin formuler des conclusions.

Comme mentionné précédemment, le réseau électrique au Québec fournit deux possibles tensions d'alimentation résidentielle : 120V ou 240V [74]. Pour cette analyse, nous allons considérer que la recharge est faite à partir de l'alimentation de 240V/60Hz.

Nous considérons une batterie de Lithium-ion d'une tension nominale de 360V, d'une capacité de 108Ah et avec un état de charge initial de 75%.

Comme montré dans la Figure 4-2, nous utilisons le modèle de batterie disponible dans Simscape de MATLAB. Pour alléger la simulation, nous négligeons les effets thermiques et de vieillissement dans la batterie.

Type: Lithium-Ion

Temperature

Simulate temperature effects

Aging

Simulate aging effects

Nominal voltage (V) 7.2\*50

Rated capacity (Ah) 5.4\*20

Initial state-of-charge (%) 75

Battery response time (s) 30

Figure 4-2 Caractéristiques de la batterie

Afin de simuler la recharge à différents niveaux de puissance dans un scénario de recharge résidentiel, nous définissons un profil variable de puissance délivrée à la batterie. Ce profil comprend une période d'attente (0kW), suivi de trois variations de consigne pour délivrer 3.2kW, 5.4kW et 7.2kW à différents instants. Ces variations de puissance correspondent à des courants efficaces variant entre 13.3A et 30A. Ce profil peut être

considéré dans les caractéristiques des chargeurs de niveau 2 (à 240V) couramment utilisés au Québec.

#### 4.2.1 Convertisseur élévateur conventionnel

La topologie de convertisseur élévateur conventionnel, montrée dans la Figure 4-3, est la topologie la plus populaire pour les applications nécessitant redresseur et élévateur de tension. Dans cette topologie, un pont à diodes dédié est utilisé pour rectifier la tension d'entrée CA en CC. Une deuxième étape de conversion est réalisée à l'aide d'un convertisseur élévateur (ou hacheur survolteur) qui permet de contrôler le courant moyen envoyé à la batterie [75]. Ce convertisseur utilise quatre interrupteurs non contrôlés (diodes) et un interrupteur contrôlé (MOSFET ou IGBT).

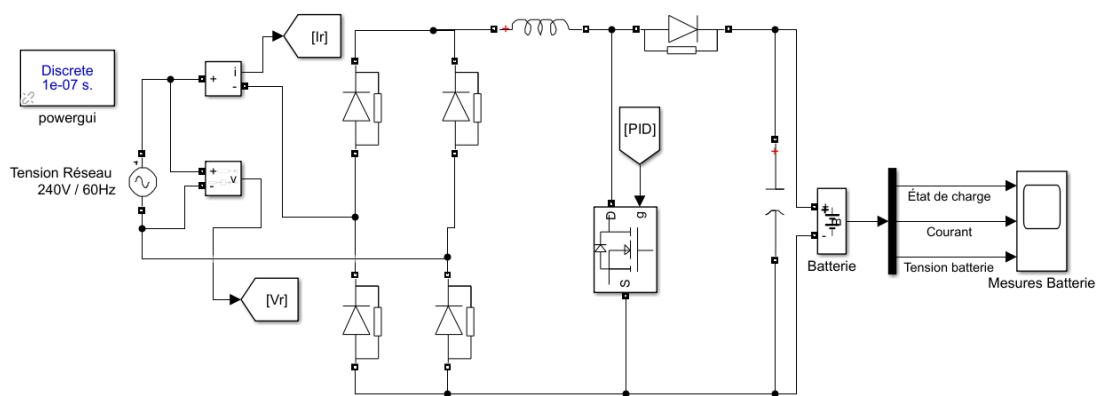


Figure 4-3 Convertisseur élévateur conventionnel.

L'architecture de commande du convertisseur est présentée dans la Figure 4-4. La commande est réalisée à l'aide d'un correcteur proportionnel (bloc Consigne de courant) pour la commande de puissance. Ce correcteur est mis en cascade avec un régulateur PID (avec action proportionnelle, intégrale et dérivative) pour la commande de courant.

Le correcteur proportionnel permet d'ajuster la consigne de courant efficace (à tirer du réseau) en fonction de l'erreur de puissance. Le correcteur PID permet de générer le signal de rapport cyclique requis pour obtenir l'asservissement de courant. Notons que les constantes de temps (ou la pulsation) des correcteurs sont ajustées de telle sorte que le correcteur PID est beaucoup plus rapide que le correcteur proportionnel, et permet de suivre des variations de consigne plus rapides que la pulsation du réseau électrique (60Hz).

Le rapport cyclique (signal en sortie du PID) est utilisé pour la génération des impulsions à l'aide d'un générateur MLI (modulation par largeur d'impulsion). Ces impulsions vont permettre de faire commuter l'interrupteur contrôlé (MOSFET ou IGBT). Notons que le bloc de génération des impulsions permet la génération de signaux MLI déphasés de 180 degrés. Ces signaux décalés seront nécessaires pour la commande des convertisseurs de type entrelacé que nous analyserons plus tard.

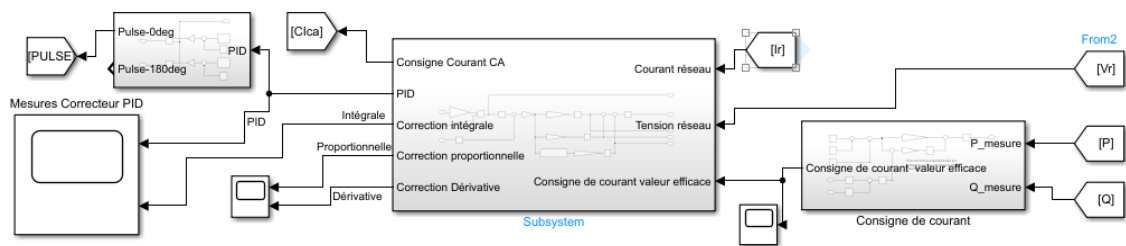


Figure 4-4 Architecture de commande du convertisseur

Comme montré dans la Figure 4-5, nous ajoutons au modèle les éléments de mesure requis pour permettre l'analyse des performances du système. Ces mesures nous permettront d'évaluer l'impact du convertisseur sur le réseau électrique de distribution. Comme mentionné précédemment, nous analysons le facteur de puissance et le taux d'harmoniques.

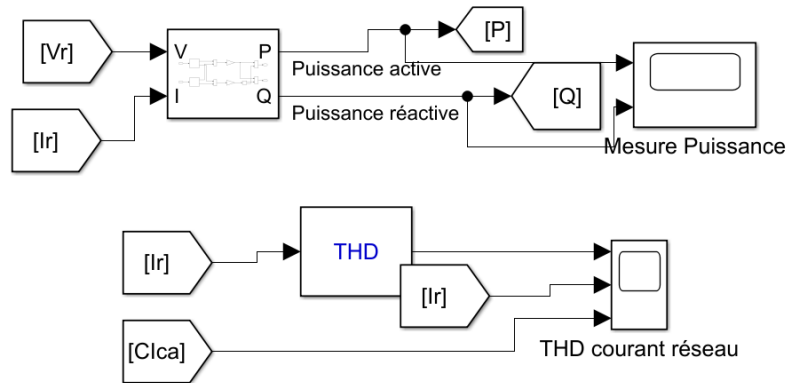


Figure 4-5 Architecture de mesure utilisée pour l'analyse des performances.

### Résultats des simulations:

La Figure 4-6 montre les résultats de la puissance active  $P(W)$  et réactive  $Q(var)$ . Nous pouvons confirmer que la commande implémentée permet de suivre correctement les variations de consigne imposées comme décrites précédemment.

Nous pouvons confirmer que la commande permet d'obtenir une puissance réactive presque nulle, ce qui nous permet d'avoir un facteur de puissance ( $FP=P/S$ ) presque unitaire, considérant que la puissance active est presque identique à la puissance apparente ( $S^2=P^2+Q^2$ ).

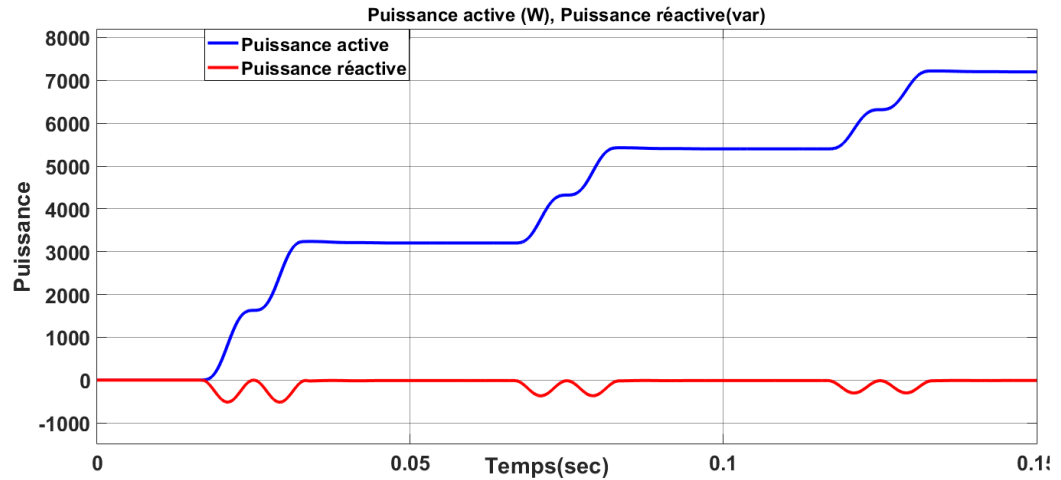


Figure 4-6 Résultats de simulation convertisseur élévateur conventionnel – puissance active et réactive

La Figure 4-7 présente les courbes de courant et tension d'une des diodes du pont redresseur. Selon les résultats, le courant crête dans la diode du convertisseur conventionnel varie de 20 A à 43,18 A (selon la puissance demandée). La tension de blocage maximale que la diode doit supporter est de 338,28V.

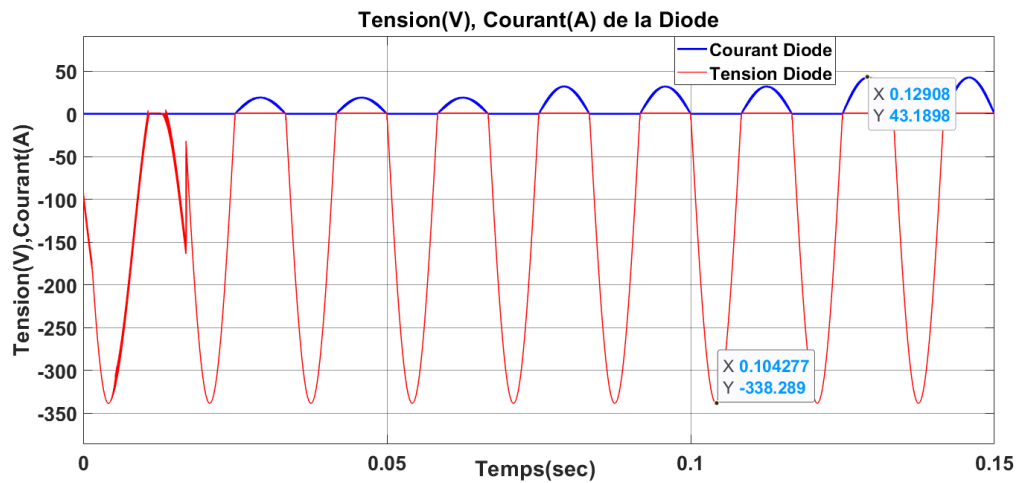


Figure 4-7 Résultats de simulation convertisseur élévateur conventionnel – courant et tension dans la diode.



La Figure 4-8 présente les courbes de tension de l'interrupteur contrôlé (MOSFET/IGBT). Le courant dans l'interrupteur varie selon la consigne de puissance (p.ex. il est de 14 A dans la courbe), et la tension de blocage est de 390,68V.

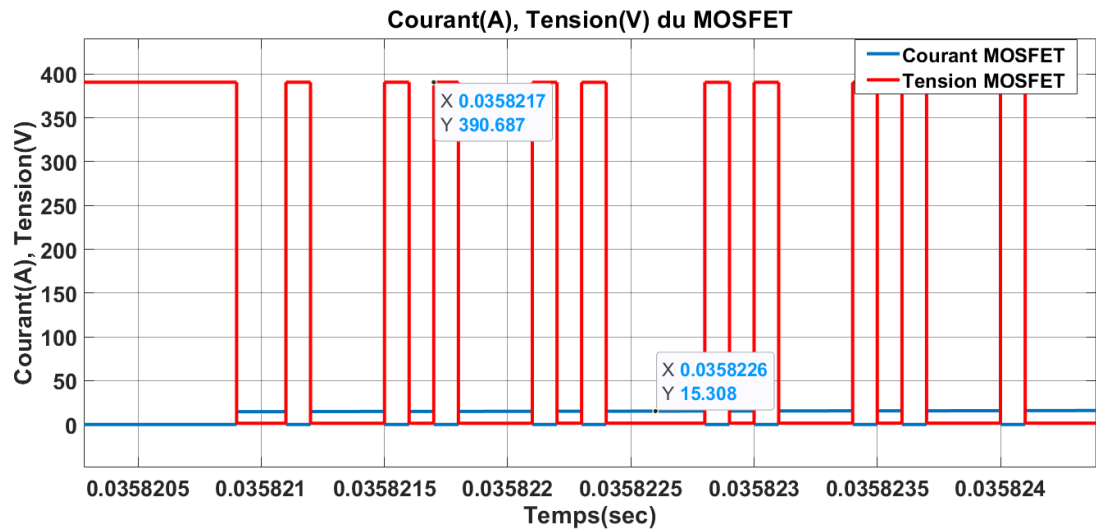


Figure 4-8 Résultats de simulation convertisseur élévateur conventionnel – courant et tension dans l'interrupteur contrôlé (MOSFET/IGBT).

La Figure 4-9 et 4-10 présente les courbes des mesures dans la batterie. Plus spécifiquement, l'état de charge, la tension et le courant. La tension de la batterie lorsque le courant est nul est de 389.5V et peut atteindre presque 391V lorsque le courant est maximal. Comme prévu, l'état de charge de la batterie augmente graduellement à partir de la valeur initiale de 75%.

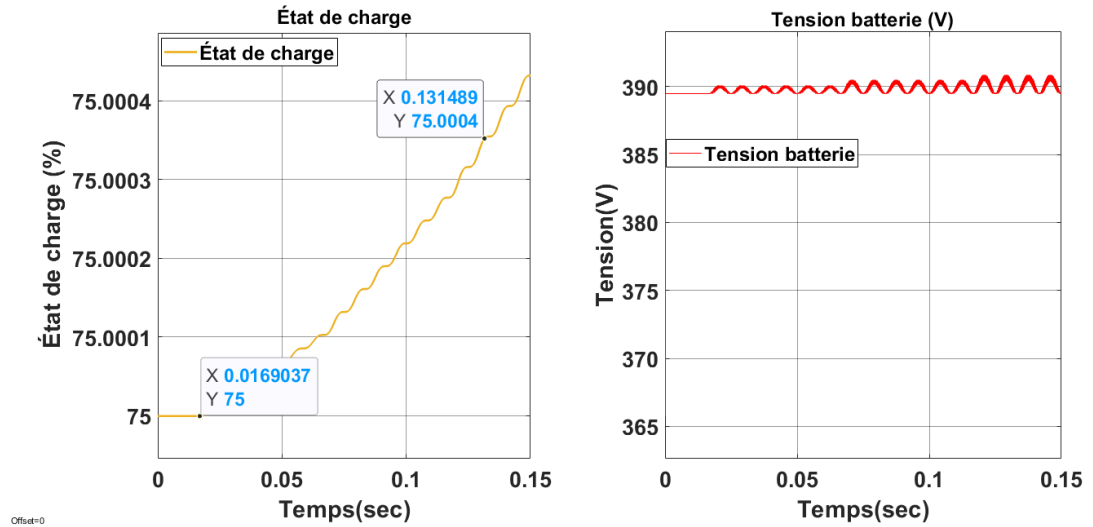


Figure 4-9 Résultats de simulation convertisseur élévateur conventionnel – Tension et état de charge de la batterie.

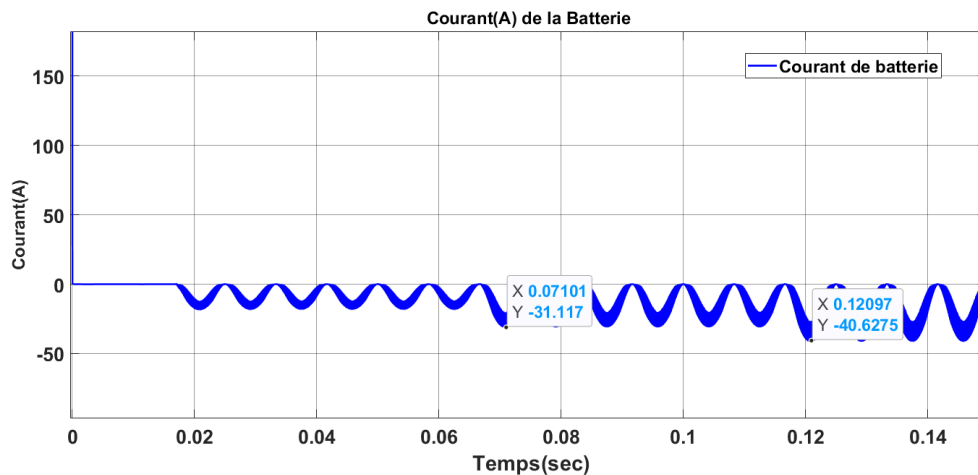


Figure 4-10 Résultats de simulation convertisseur élévateur conventionnel - Courant de la batterie.

La Figure 4-11 présente les résultats du courant alternatif et du taux de distorsion harmonique. Nous pouvons constater que le taux de distorsion en régime permanent est assez faible (<4.2%), et qu'il diminue avec l'augmentation de la puissance délivrée à la batterie.

Ceci est expliqué en raison de l'augmentation de la composante fondamentale du courant et du maintien de l'ondulation en haute fréquence.

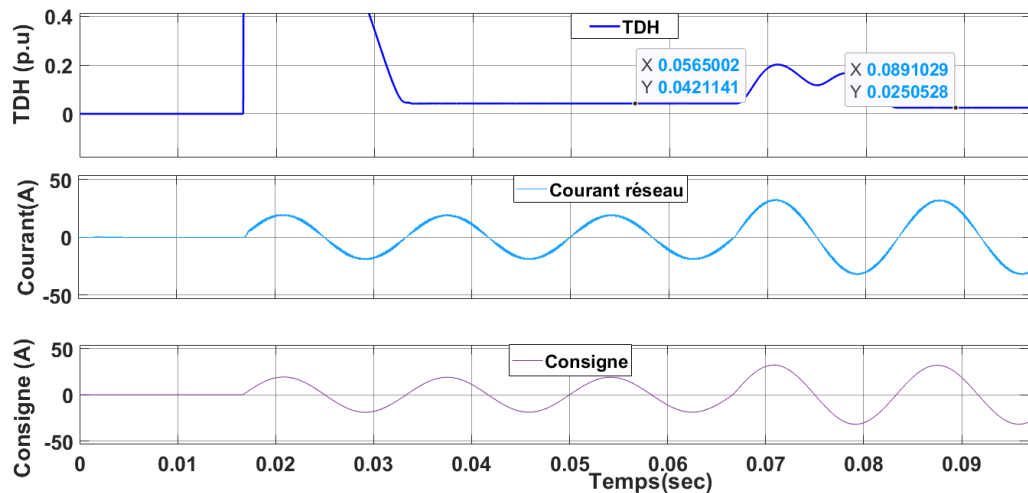


Figure 4-11 Résultats de simulation convertisseur élévateur conventionnel - Taux de distorsion harmonique.

#### 4.2.2 Convertisseur élévateur sans ponts

Ce convertisseur intègre les fonctions de redresseur et d'élévateur de tension dans le même étage de conversion. Comme montré dans la Figure 4-12, il nécessite deux MOSFET et deux diodes rapides au lieu de quatre diodes lentes utilisées dans le pont d'entrée de la plupart des autres convertisseurs [10]. Dans cette topologie, chaque ensemble Inductance – Diode – MOSFET permet de créer la fonction d'élévation de tension (Boost). Chacun des ensembles permet aussi de réaliser le redressement de la tension lors de la phase positive et négative respectivement de la tension du réseau.

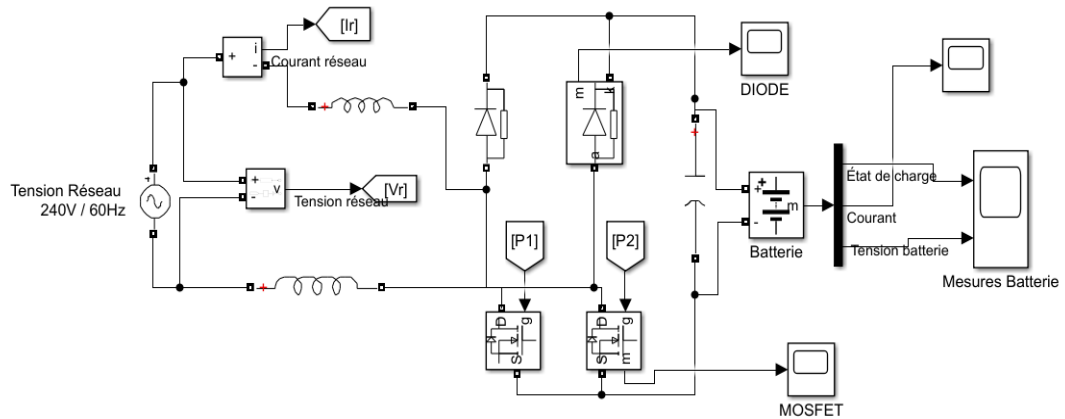


Figure 4-12 Convertisseur élévateur sans ponts.

### Résultats des simulations :

La Figure 4-13, montre les résultats de la puissance active  $P(W)$  et réactive  $Q(var)$ . Comme dans le cas précédent, la commande suit parfaitement les variations du profil de puissance défini. On constate également que la puissance réactive est nulle en régime permanent, ceci nous permet de vérifier le bon contrôle du facteur de puissance.

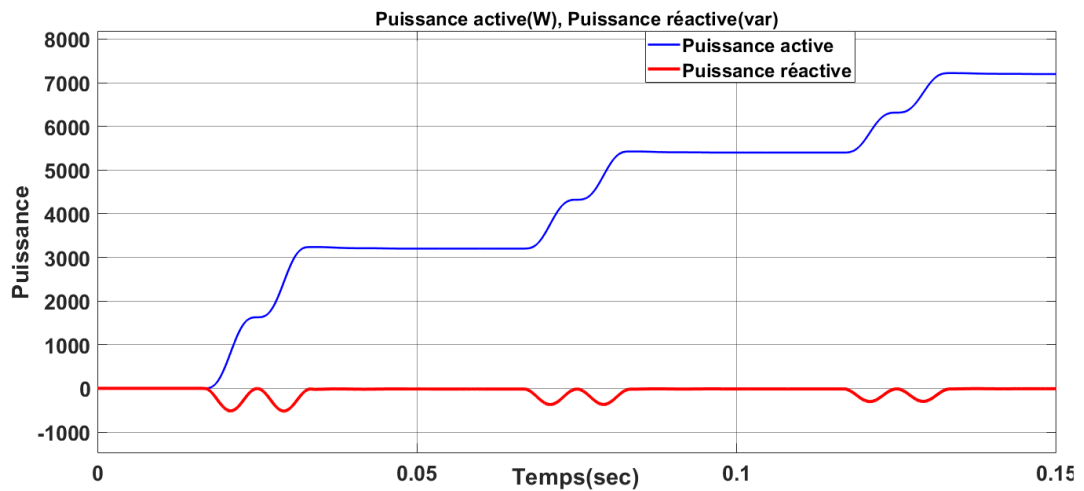


Figure 4-13 Résultats de simulation convertisseur élévateur sans ponts - puissance active et réactive.

Les courbes de tension et de courant de la diode dans le circuit sans ponts sont présentées dans la Figure 4-14. Le courant dans la diode atteint les 42,73 A et la tension de blocage 390,84 V.

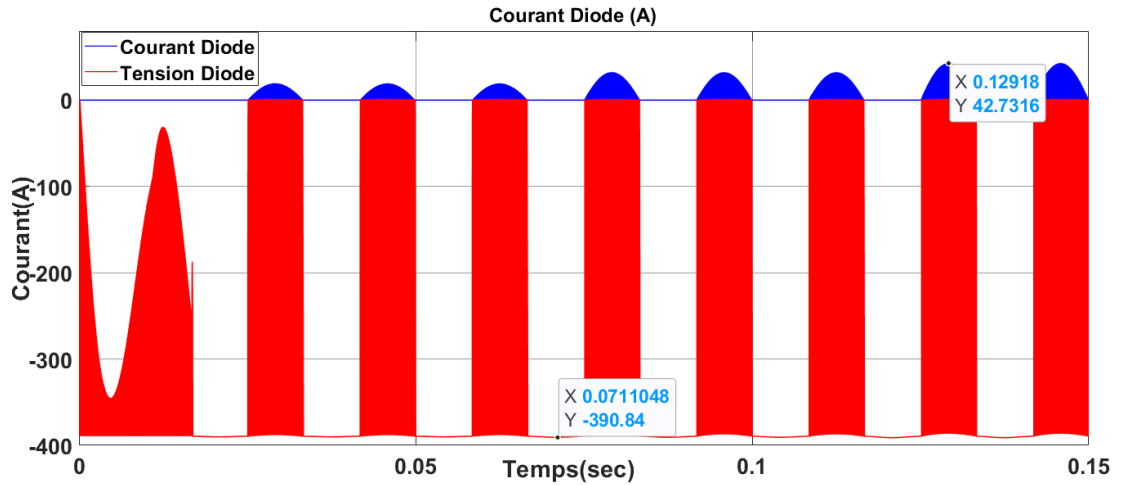


Figure 4-14 Résultats de simulation convertisseur élévateur sans ponts – courant et tension dans la diode.

Le courant dans l'interrupteur MOSFET présenté dans la Figure 4-15 est presque le même que celui du convertisseur conventionnel, et la tension de blocage atteint 390,91V.

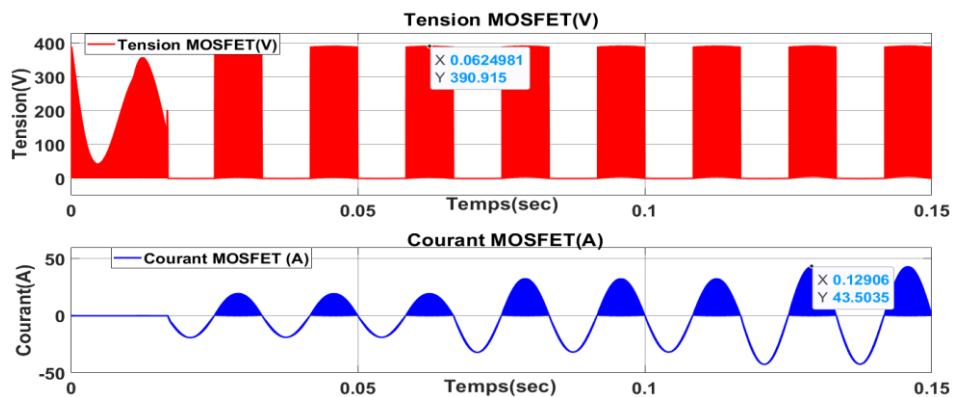


Figure 4-15 Résultats de simulation convertisseur élévateur sans ponts - courant et tension dans l'interrupteur contrôlé (MOSFET/IGBT).

Les Figures 4-16 et 4-17 présentent les courbes des mesures dans la batterie, l'état de charge, la tension et le courant.

La tension de la batterie est de 389.5V quand le courant est 0A, et quand le courant est maximal, la tension augmente à 391 V. Comme prévu, l'état de charge de la batterie augmente lentement avec le temps.

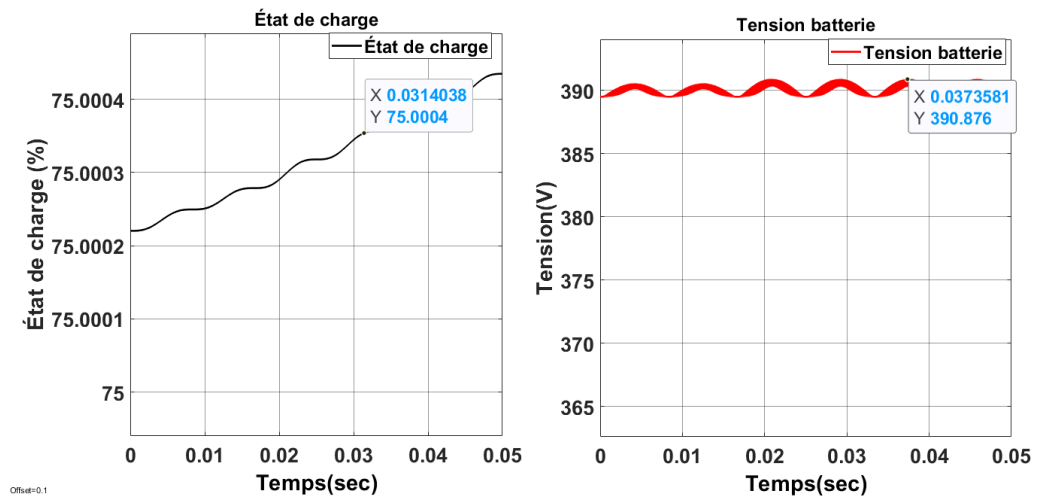


Figure 4-16 Résultats de simulation convertisseur élévateur sans ponts –tension et état de charge de la batterie

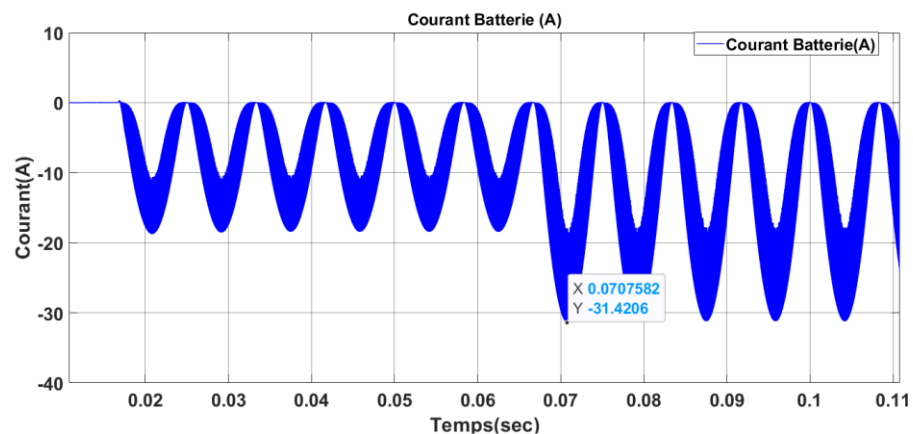


Figure 4-17 Résultats de simulation convertisseur élévateur sans ponts – courant de la batterie

La figure 4-18 présente les résultats du courant alternatif et du taux de distorsion harmonique. En régime permanent, le taux de distorsion harmonique atteint 2.61% et il diminue encore plus lorsque la puissance augmente. Notons que le taux de distorsion pour la même puissance était de 4.2% lorsque le convertisseur élévateur conventionnel a été utilisé, ce qui représente une amélioration d'environ 38%.

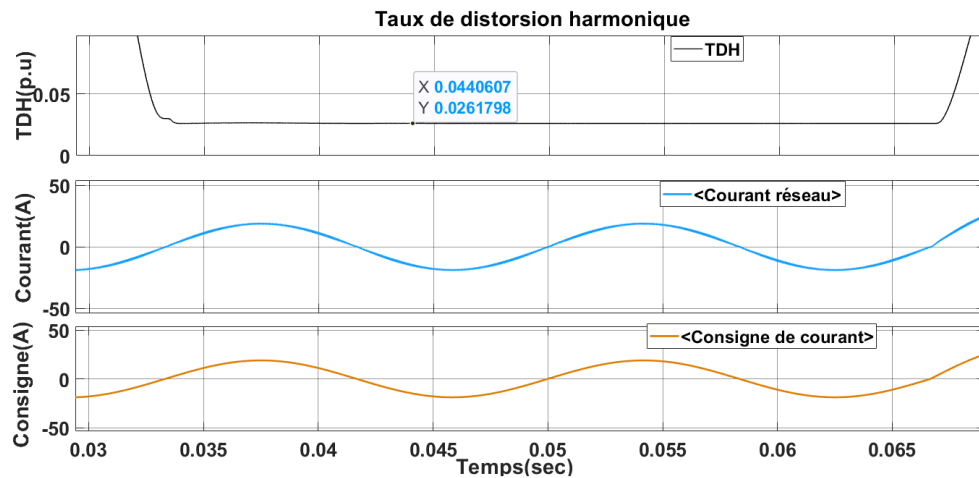


Figure 4-18 Résultats de simulation convertisseur élévateur sans ponts-taux de distorsion harmonique.

#### 4.2.3 Convertisseur élévateur entrelacé

Comme montré dans la Figure 4-20, le convertisseur entrelacé il est composé d'un pont redresseur, et deux convertisseurs élévateurs en parallèle, fonctionnant avec un déphasage de 180 degrés. Le courant d'entrée est la somme des deux courants des inducteurs en LB1 et LB2 [76], [77].

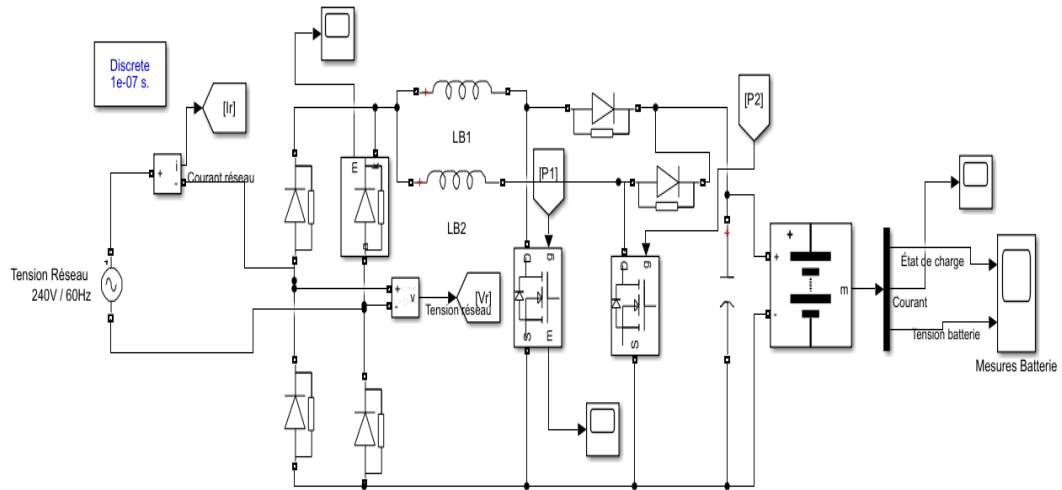


Figure 4-19 Convertisseur élévateur entrelacé.

### Résultats des simulations :

La Figure 4-21 montre les résultats de la puissance active **P(W)** et réactive **Q(var)**. Ces résultats nous donnent encore un facteur de puissance ( $FP=P/S$ ) presque unitaire; puisque la puissance réactive est nulle, donc la puissance apparente est presque égale à la puissance active ( $S^2=P^2+Q^2$ ).

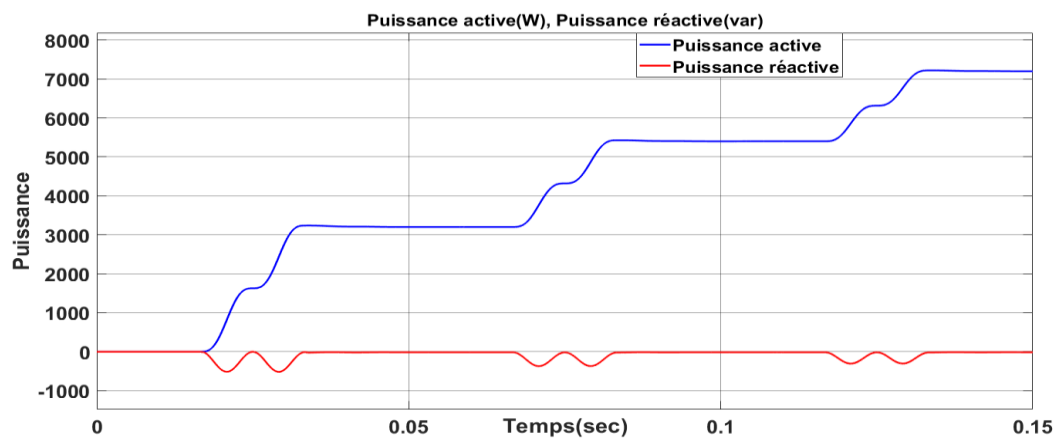


Figure 4-20 Résultats de simulation convertisseur élévateur entrelacé - puissance active et réactive.



La Figure 4-22 présente les courbes de courant et tension d'une des diodes du pont redresseur. Selon les résultats obtenus, le courant crête dans la diode du convertisseur conventionnel varie de 19 A à 42,98 A. La tension de blocage maximale atteint 345V lors du démarrage, en régime permanent elle reste stable aux alentours de 338,57V.

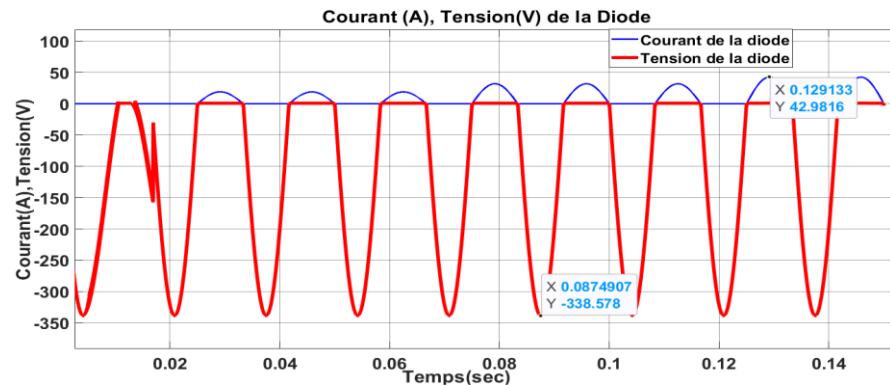


Figure 4-21 Résultats de simulation convertisseur élévateur entrelacé -courant et tension dans la diode.

Le courant dans le MOSFET atteint 9,62 A, et la tension 390,79V, ces résultats sont présentés dans la Figure 4-23. Il faut souligner que le courant est partagé entre les deux bras de conversion entrelacés.

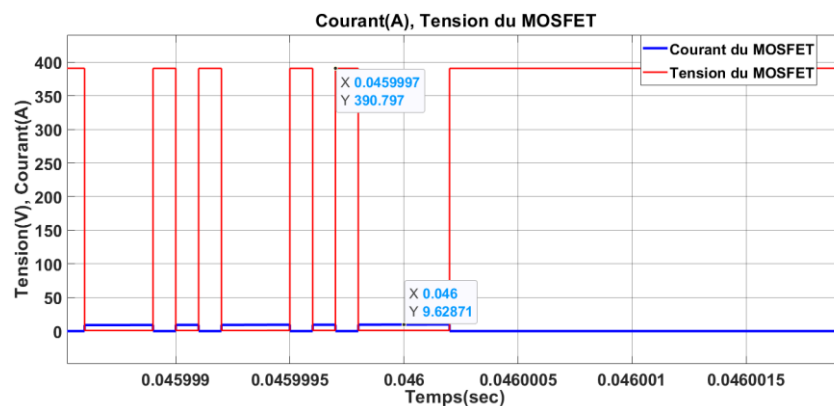


Figure 4-22 Résultats de simulation convertisseur élévateur entrelacé - courant et tension dans l'interrupteur contrôlé (MOSFET/IGBT).

Les Figures 4-24 et 4-25 présentent les courbes des mesures dans la batterie : l'état de charge, la tension et le courant. La tension de la batterie lorsque le courant égale à 0 est de 389.8V et peut atteindre presque 391V lorsque le courant est maximal. L'état de charge de la batterie augmente à partir de la valeur initiale de 75%.

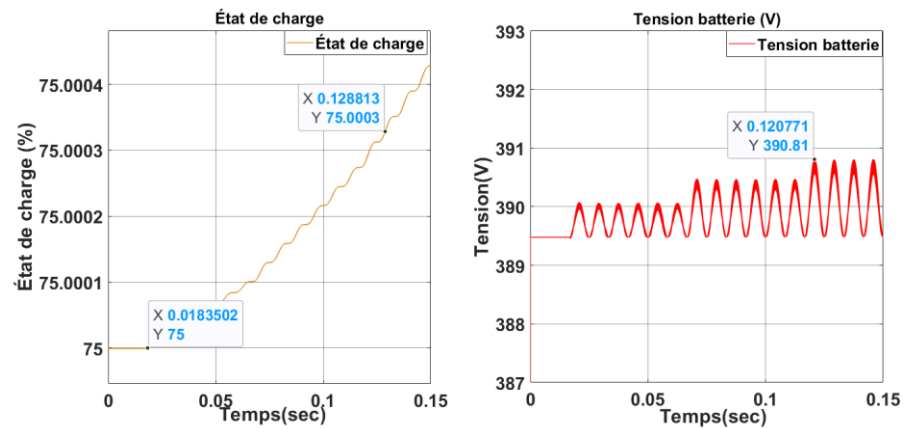


Figure 4-23 Résultats de simulation convertisseur élévateur entrelacé - Tension et état de charge de la batterie.

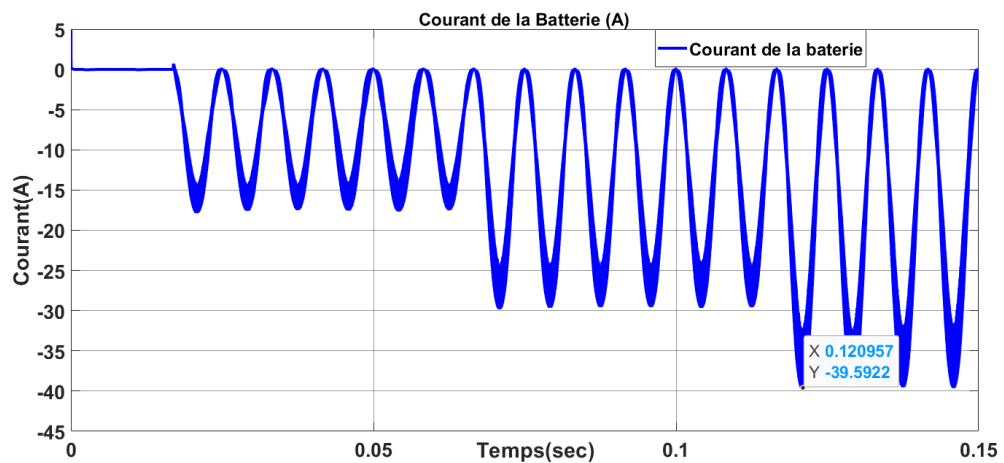


Figure 4-24 Résultats de simulation convertisseur élévateur entrelacé - Courant de la batterie.

La Figure 4-26 présente les résultats du courant alternatif et du taux de distorsion harmonique qui est faible en régime transitoire, et en régime permanent inférieur à 2,25% et diminue au fil du temps lorsque la puissance utilisée pour charger la batterie augmente.

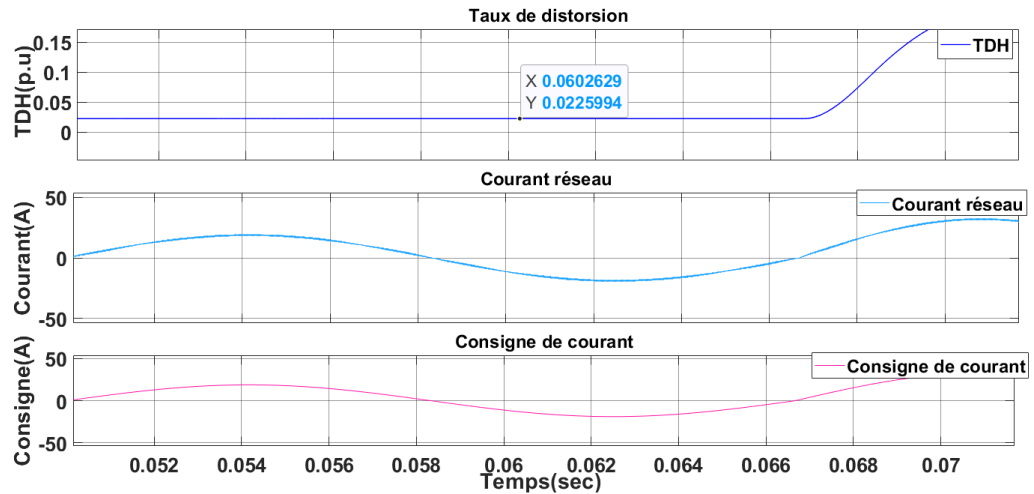


Figure 4-25 Résultats de simulation convertisseur élévateur entrelacé -taux de distorsion harmonique.

#### 4.2.4 Convertisseur élévateur entrelacé sans ponts

Ce convertisseur réunit dans un seul les caractéristiques du convertisseur entrelacé et du convertisseur sans ponts. Il utilise deux ensembles Inductance-Diode-MOSFET entrelacés pour chaque bras de connexion au réseau, de sorte que deux fonctionnent lors de l'alternance positive et les autres lors de l'alternance négative de la tension d'alimentation. Comme illustré dans la Figure 4-27, il utilise donc, quatre diodes rapides et quatre interrupteurs contrôlés.

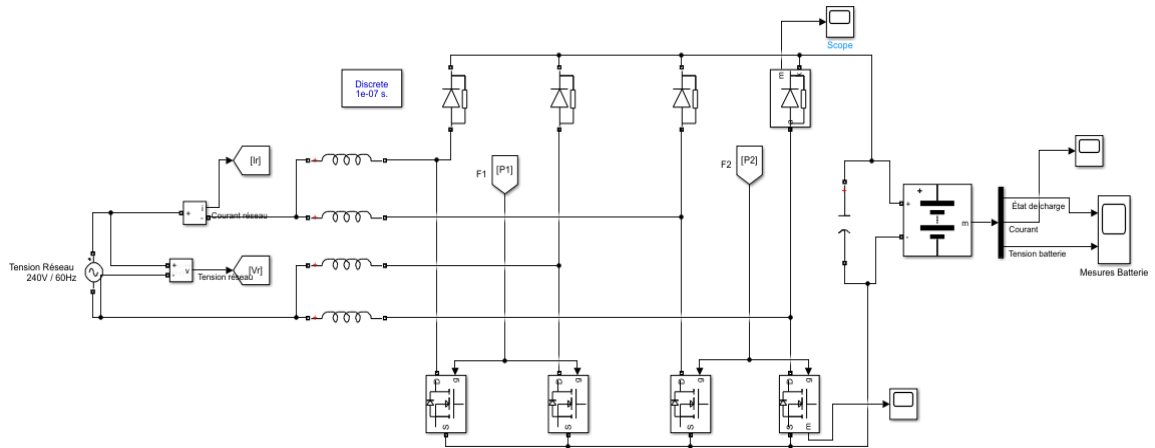


Figure 4-26 Convertisseur élévateur entrelacé sans ponts.

### Résultats des simulations :

La figure 4-28 montre les allures des puissances active et réactive. Les résultats confirment que le facteur de puissance est presque unitaire, puisque la puissance réactive est presque nulle en régime permanent ce qui signifie que toute la puissance apparente est transformée en une puissance active.

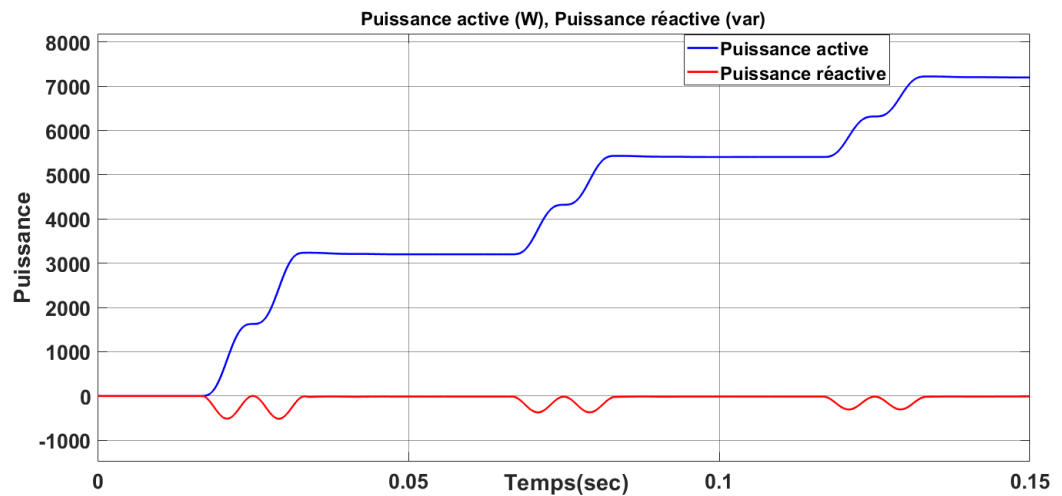


Figure 4-27 Résultats de simulation convertisseur élévateur entrelacé sans ponts - puissance active et réactive.

La figure 4-29 montre le courant et tension de blocage d'une des diodes, un courant qui peut atteindre 22 A, et une tension de 388V.

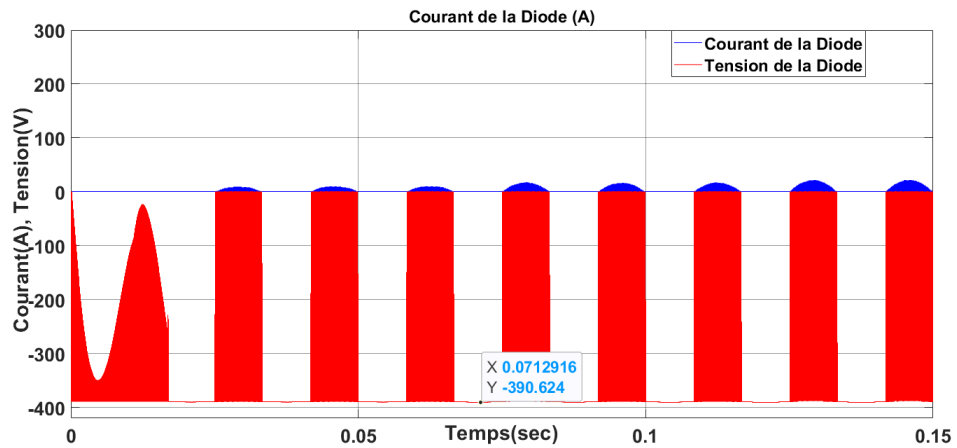


Figure 4-28 Résultats de simulation convertisseur élévateur entrelacé sans ponts - courant et tension dans la diode.

Dans la figure 4-30, on voit un courant de MOSFET qui commence faible, 9,2A et augmente pour atteindre les 23A, en même temps la tension reste aux alentours de 390,5V.

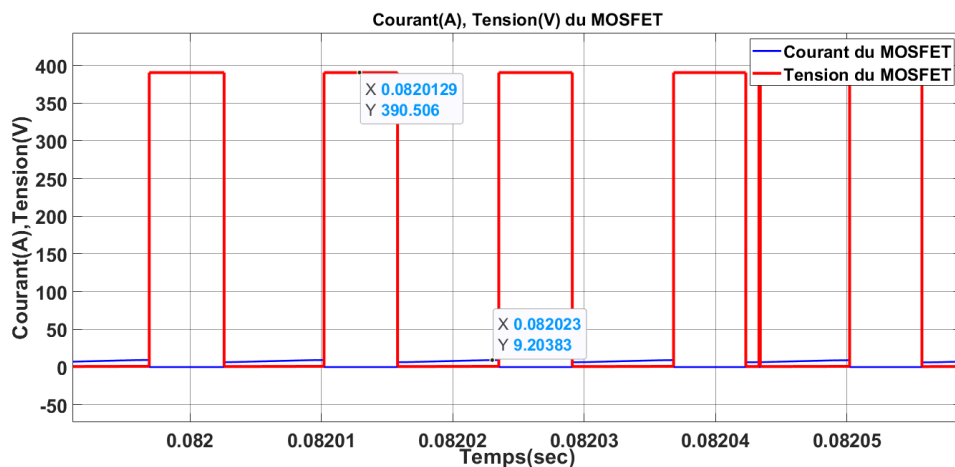


Figure 4-29 Résultats de simulation convertisseur élévateur entrelacé sans ponts - courant et tension dans l'interrupteur contrôlé (MOSFET/IGBT).

Sur les figures 4-31 et 4-32 on voit les allures de mesures de batteries plus précisément le courant de la batterie qui atteint sa valeur maximale de 42A et la tension qui varie entre 390 V et 393V et enfin l'état de charge de batterie qui s'augmente petit à petit en commençant par sa valeur initiale de 75%.

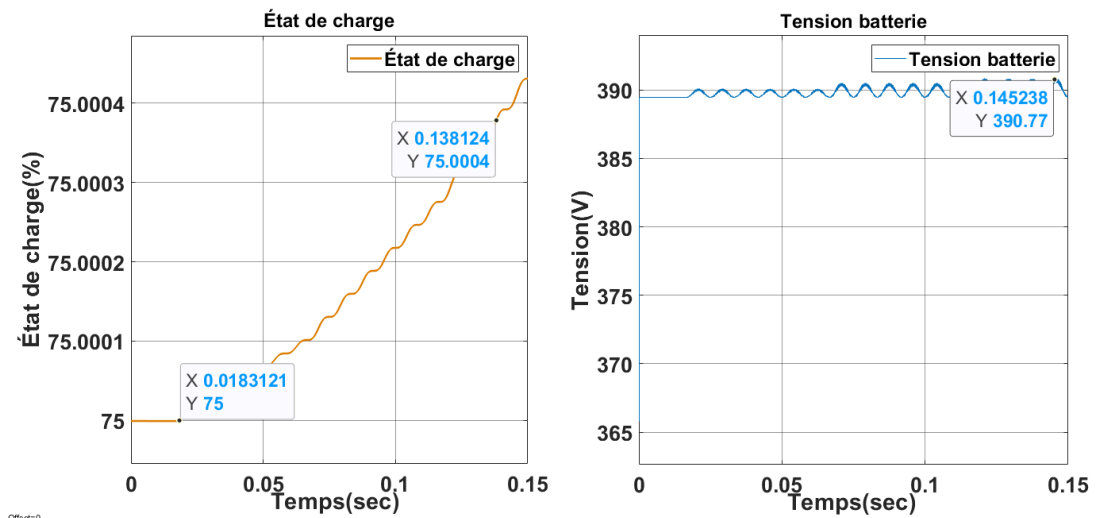


Figure 4-30 Résultats de simulation convertisseur élévateur entrelacé sans ponts – Tension et état de charge de la batterie.

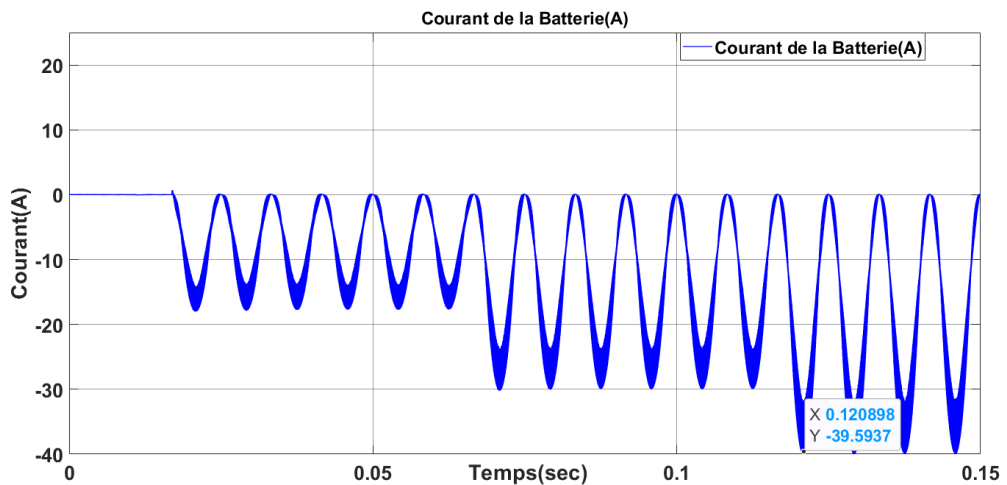


Figure 4-31 Résultats de simulation convertisseur élévateur entrelacé sans ponts - Courant de la batterie.

La figure 4-33 présente la courbe de taux de distorsion harmonique qui est inférieur à 1,40% en régime permanent. Ces résultats démontrent une nette amélioration comparé au taux de distorsion de 4,2% obtenu avec le convertisseur élévateur conventionnel.

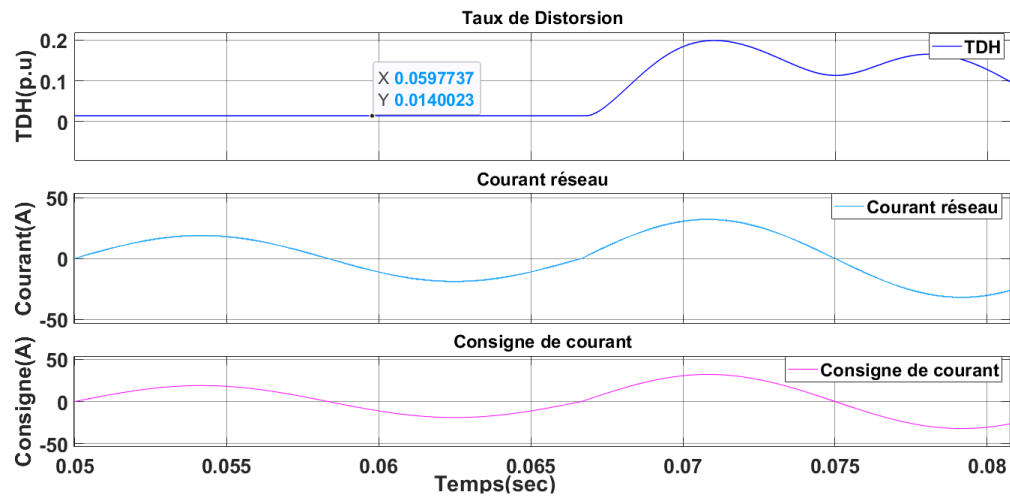


Figure 4-32 Résultats de simulation convertisseur élévateur entrelacé sans ponts - taux de distorsion harmonique.

### 4.3 Comparaison et discussion

Dans cette section, nous allons noter chaque convertisseur comme suit :

Circuit 1 - Convertisseur élévateur conventionnel.

Circuit 2 - Convertisseur élévateur sans ponts.

Circuit 3 - Convertisseur élévateur entrelacé.

Circuit 4 - Convertisseur élévateur entrelacé sans-ponts.

Une étude sur les quatre convertisseurs élévateurs a été faite dans ce chapitre. Nous avons présenté les courbes de puissances, de courant et tension de batterie ainsi que le taux de distorsion harmonique de chaque système. Comme prévu, les résultats de la puissance délivrée pour réaliser la recharge étaient similaires pour les quatre convertisseurs. Nous avons observé une tension de batterie qui atteint jusqu'à 391V et un courant suivant le profil de puissance préalablement défini. L'état de charge augmente graduellement à partir de la valeur initiale de 75%.

En ce qui concerne le taux de distorsion harmonique, les Figures 4-34 et 4-35 nous montrent une comparaison des quatre circuits. En régime transitoire, le circuit 4, le convertisseur entrelacé sans ponts à un bas taux de distorsion tandis que le circuit 2, convertisseur élévateur sans ponts il a le plus grand taux de distorsion. En régime permanent, le convertisseur entrelacé sans ponts a encore une fois le plus faible taux de distorsion harmonique, ce qui signifie qu'il est le moins polluant pour le réseau électrique [83]. D'autre part, le convertisseur élévateur conventionnel a le plus haut taux de distorsion. Il faut signaler que toutes les topologies analysées respectent les normes actuelles qui limitent le taux de distorsion à 5% (519-2022 - IEEE Standard for Harmonic Control in Electric Power Systems). Ce qui permet de les utiliser dans les applications de recharge.



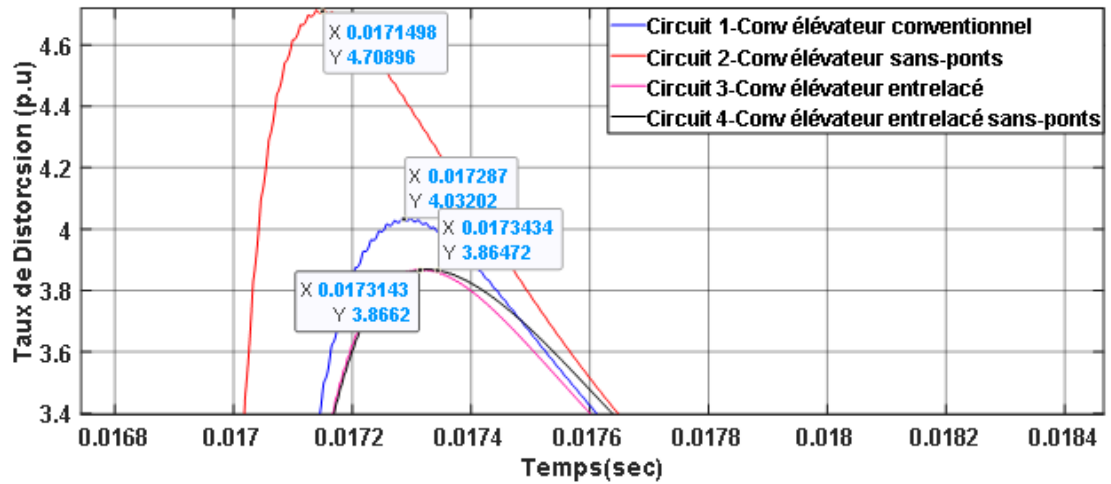


Figure 4-33 Comparaison de taux de distorsion harmonique en régime transitoire

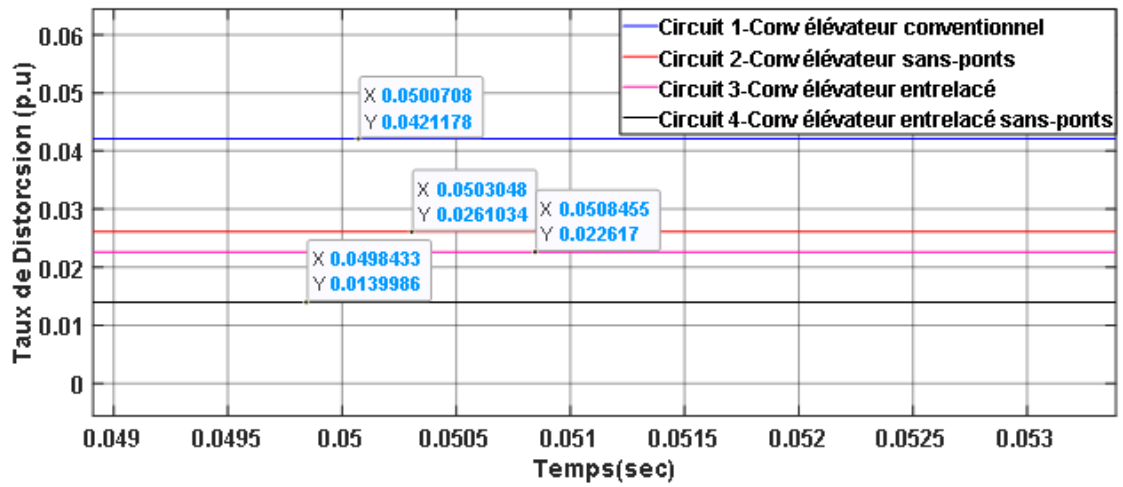


Figure 4-34 Comparaison de taux de distorsion en régime permanent

Les Figures 4-36 et 4-37 montrent les courbes de pertes de puissance et l'énergie dissipée dans les interrupteurs semi-conducteurs (diodes et MOSFET/IGBT) dans les quatre circuits.

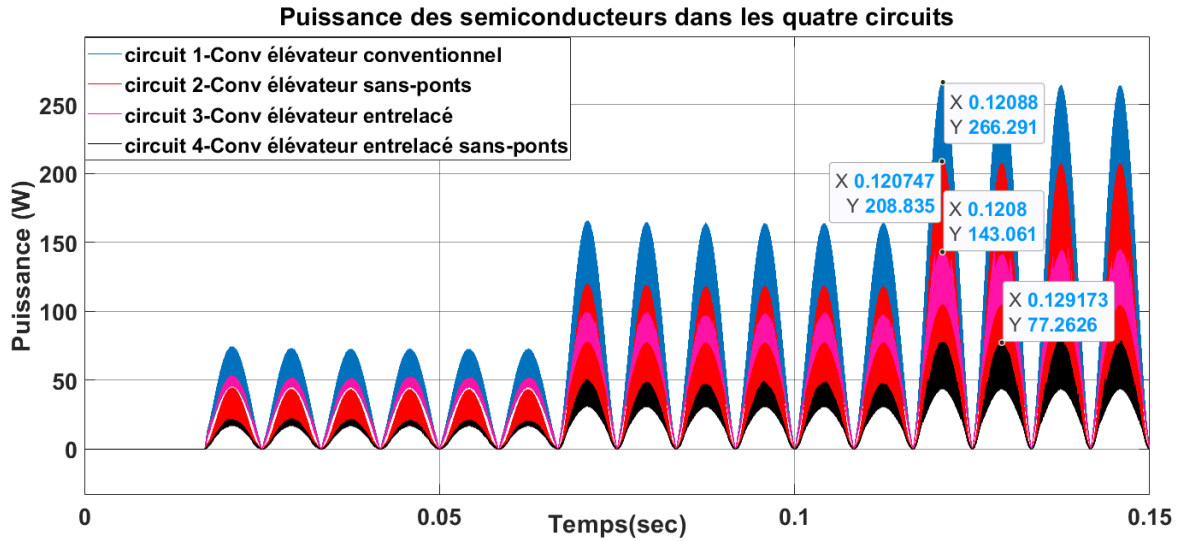


Figure 4-35 Comparaison de puissance des interrupteurs (semi-conducteurs)

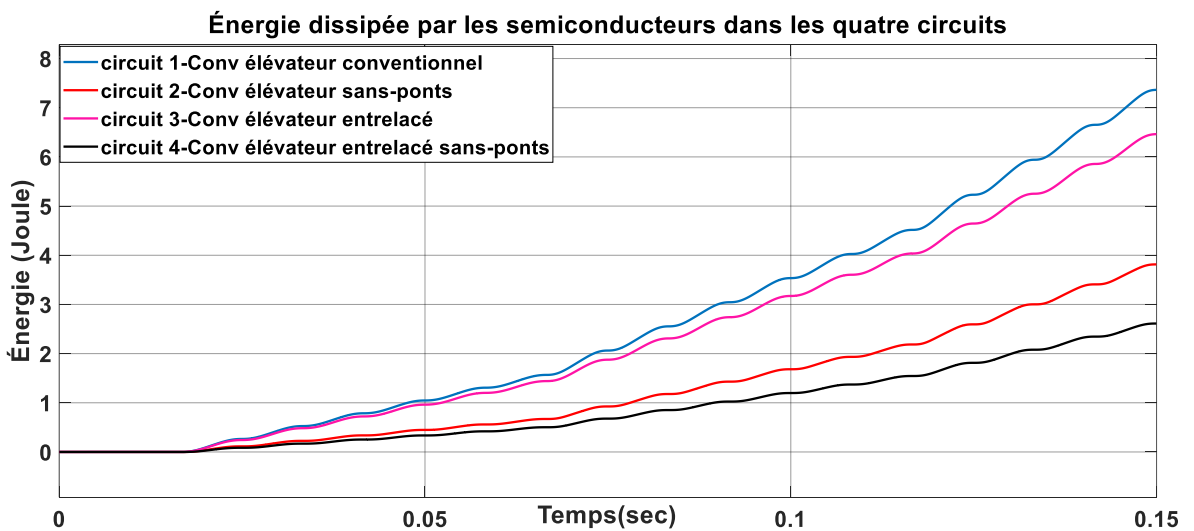


Figure 4-36 Comparaison d'énergie dissipée par les semi-conducteurs des circuits

La puissance consommée (dissipée) par les semi-conducteurs dans les deux premiers circuits (conventionnel et sans pont) est plus élevée que pour les deux derniers (entrelacé et entrelacé sans pont). Le convertisseur entrelacé sans ponts est celui qui consomme moins et

par conséquent dissipe moins d'énergie par rapport aux autres circuits. Cette diminution dans les pertes se traduit également dans une réduction des besoins de refroidissement et par conséquent de la taille du convertisseur. Évidemment, la diminution des pertes a un prix, celui-ci est en relation avec le nombre d'éléments actifs (diodes et interrupteurs contrôlés).

#### **4.4 Conclusion**

Nous avons analysé dans ce chapitre les quatre topologies de convertisseur de puissance pour la recharge de batteries à partir d'une connexion au réseau de 240V/60Hz. Cette étude nous permet de confirmer l'avantage de la topologie de convertisseur entrelacé sans pont quant à la réduction des harmoniques de courant et le maintien du facteur de puissance unitaire. Les avantages de ce type de convertisseur sont remarquables : il permet de réduire les pertes ou augmenter le rendement, et également de réduire la taille finale du convertisseur.

## Chapitre 5 - Conclusion

Dans ce mémoire nous avons analysé la problématique de la recharge des véhicules électriques. Dans un premier temps, nous avons abordé les aspects techniques et normatifs autour de la recharge. Nous avons ensuite étudié les systèmes recharge à courant alternatif et à courant continu. De cette partie de l'étude, nous avons obtenu des informations pertinentes pour passer à l'étude de topologies de convertisseurs pour la recharge à courant alternatif à partir d'une connexion du réseau de distribution à 240V/60Hz. Notons que cette connexion est la plus utilisée pour la recharge au niveau institutionnel et résidentiel au Québec.

Suite à cette étude théorique, nous avons réalisé une analyse comparative de quatre topologies de convertisseur de puissance : convertisseur élévateur conventionnel, convertisseur élévateur sans ponts, convertisseur élévateur entrelacé, et convertisseur élévateur entrelacé sans ponts. Cette analyse nous a permis de mettre en évidence les avantages des convertisseurs entrelacés pour la réduction des harmoniques de courant. Particulièrement, le convertisseur entrelacé sans ponts permet d'obtenir des performances élevées en termes de qualité de l'onde. Avec ce type de convertisseur, nous pouvons obtenir un facteur de puissance unitaire et un taux de distorsion harmonique de courant inférieur à 2%.

Il est pertinent de souligner que toutes les topologies analysées respectent les normes quant aux harmoniques de courant. Cette caractéristique permet de les utiliser dans des applications de recharge sans compromettre la qualité de l'alimentation électrique. Elles

conviennent donc aux installations de recharge de véhicules électriques au niveau résidentiel ou institutionnel sans perturber la tension du réseau.

Les véhicules électriques (VÉ) sont considérés comme l'un des outils les plus efficaces pour réduire la demande de pétrole et les émissions de gaz à effet de serre. Et ils sont les bienvenus dans un avenir proche pour le transport routier général. Le développement et l'utilisation accrue des VÉ nécessite des stations de recharge largement réparties en raison de la capacité limitée des batteries de VE. Cette étude sur les topologies de recharge, offre un aperçu des aspects techniques des circuits nécessaires pour faire le lien entre le réseau électrique de distribution et la batterie embarquée dans le véhicule.

Les résultats obtenus dans ce mémoire servent de base pour l'étude de nouvelles configurations de chargeurs pour les batteries des véhicules électriques et des technologies nouvelles comme les chargeurs sans fil à forte puissance, et les stations de recharge rapides et ultra-rapides. Les modèles proposés serviront de base pour l'analyse dans des scénarios plus complexes considérant le déploiement massif des véhicules électriques. Ces études permettront d'analyser la stabilité et fiabilité du réseau, l'effet d'une possible surcharge de la demande de pointe, l'affaissement de la tension et la problématique d'écoulement de puissance par exemple dans le cas des chargeurs bidirectionnels.

## Références

- [1] H. Nazaripouya, B. Wang, and D. Black, “Electric Vehicles and Climate Change: Additional Contribution and Improved Economic Justification,” *IEEE Electr. Mag.*, vol. 7, no. 2, pp. 33–39, 2019.
- [2] Marie Rajon Bernard and Dale Hall, “Évaluation des besoins du Québec en matière d’infrastructure de recharge - International Council on Clean Transportation,” 2022. <https://theicct.org/publication/lvs-ci-quebec-can-fr-feb22/>.
- [3] F. Lévêque, “La voiture électrique hors des sentiers battus,” 2018. <https://theconversation.com/la-voiture-electrique-hors-des-sentiers-battus-93759>.
- [4] Gonçalo Da Silva, “Est-ce que la voiture électrique répond à mes besoins? – Roulez Electrique,” 2016. <https://roulezelectrique.com>.
- [5] B. Rotthier, T. Van Maerhem, P. Blockx, P. Van Den Bossche, and J. Cappelle, “Home charging of electric vehicles in Belgium,” *2013 World Electr. Veh. Symp. Exhib. EVS 2014*, pp. 2–7, 2014.
- [6] W. Wallbox, “What are the differences between an AC and a DC charging current? | Wallbox.” [https://wallbox.com/en\\_catalog/faqs-difference-ac-dc](https://wallbox.com/en_catalog/faqs-difference-ac-dc) (accessed Apr. 08, 2021).
- [7] M. Yaich, M. R. Hachicha, and M. Ghariani, “Modeling and simulation of electric and hybrid vehicles for recreational vehicle,” *16th Int. Conf. Sci. Tech. Autom. Control Comput. Eng. STA 2015*, vol. 95, no. 4, pp. 181–187, 2016.
- [8] “Hybride, hybride rechargeable, électrique : comment choisir lequel acheter? | RPM.” <https://rpmweb.ca/actualites-et-chroniques/chroniques/question-du-jour/hybride-hybride-rechargeable-electrique-comment-choisir-lequel-acheter> (accessed Mar. 10, 2023).
- [9] F. Musavi, M. Edington, W. Eberle, and W. G. Dunford, “Energy efficiency in plug-in hybrid electric vehicle chargers: Evaluation and comparison of front end AC-DC topologies,” *IEEE Energy Convers. Congr. Expo. Energy Convers. Innov. a Clean Energy Futur. ECCE 2011, Proc.*, pp. 273–280, 2011, doi: 10.1109/ECCE.2011.6063780.

- [10] F. Musavi, W. Eberle, and W. G. Dunford, “A High-Performance Single-Phase Bridgeless Electric Vehicle Battery Chargers,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 47, no. 4, pp. 1833–1843, 2011.
- [11] S. Canada, “Immatriculations des véhicules automobiles neufs,” 2022. <https://www.statcan.gc.ca/fr/debut>.
- [12] T. Canada, “Model S | Tesla Canada,” 2021. [https://www.tesla.com/fr\\_ca](https://www.tesla.com/fr_ca).
- [13] K. Futura, “Quand la première voiture électrique a-t-elle été inventée?,” 2021. <https://www.futura-sciences.com/tech/questions-reponses/voiture-electrique-premiere-voiture-electrique-t-elle-ete-inventee-966/>.
- [14] Renault, “Invention de la voiture électrique: sur les pas de son histoire - Easy Electric Life.” <https://easyelectriclife.groupe.renault.com/fr/essentiels/qui-a-invente-la-voiture-electrique/>.
- [15] B. C. Niels Warburg, Alexander Forell, Laura Guillon, Hélène Teulon, *Élaboration selon les principes des ACV des bilans énergétiques, des émissions de gaz à effet de serre et des autres impacts environnementaux induits par l'ensemble des filières de véhicules électriques et de véhicules thermiques, VP de segment B (citadin)*. ADEME, 2013.
- [16] Stephanie Schoppert, “Thomas Parker Invented the First Electric Car in 1884,” 2017. <https://historycollection.com/thomas-parker-invented-first-electric-car-1884/>.
- [17] R. Micena, “Basic components of an electric vehicle [7]. | Download Scientific Diagram,” 2018. [https://www.researchgate.net/figure/Basic-components-of-an-electric-vehicle-7\\_fig7\\_326106636](https://www.researchgate.net/figure/Basic-components-of-an-electric-vehicle-7_fig7_326106636).
- [18] C. Maini, K. Gopal, and R. Prakash, “Making of an ‘all reason’ electric Vehicle,” *2013 World Electr. Veh. Symp. Exhib. EVS 2014*, Oct. 2014, doi: 10.1109/EVS.2013.6915015.
- [19] A. Emadi, K. Rajashekara, S. S. Williamson, and S. M. Lukic, “Topological overview of hybrid electric and fuel cell vehicular power system architectures and configurations,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 54, no. 3, pp. 763–770, May 2005, doi: 10.1109/TVT.2005.847445.
- [20] J. Liu and H. Peng, “Modeling and control of a power-split hybrid vehicle,” *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, vol. 16, no. 6, pp. 1242–1251, 2008, doi: 10.1109/TCST.2008.919447.
- [21] Benoît, “Les différents types de véhicules hybrides.” <https://blogautomobile.fr/author/benoitlorenzoni>.

- [22] Yves Martin, “Voitures hybrides - Guide d’achat - UFC-Que Choisir,” 2021. <https://www.quechoisir.org/guide-d-achat-voitures-hybrides-n87967/>.
- [23] “- Montages hybrides : hybride série, hybride parallèle, hybride série parallèle.” <http://www.hybride-voiture.net/les-montages-hybrides/>.
- [24] F. T. Stéfani Vanussi Melo Guaitolini , Imene Yahyaoui , Jussara Farias Fardin , Lucas Frizera Encarnação, “A review of fuel cell and energy cogeneration technologies,” 2018, [Online]. Available: <https://ieeexplore-ieee-org.biblioproxy.uqtr.ca/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8362573>.
- [25] Michael Frank Hordeski, “Hydrogen & Fuel Cells: Advances in Transportation and Power | part of Hydrogen & Fuel Cells: Advances in Transportation and Power | River Publishers books | IEEE Xplore,” vol. i–x, 2009.
- [26] N. PALOU, “Toyota libera temporalmente miles de sus patentes para pilas de combustible de hidrógeno,” 2015. <https://www.microsiervos.com/archivo/coches/toyota-libera-miles-patentes-pilas-combustible-hidrogeno.html>.
- [27] Toyota, “Nouvelle technologie : les véhicules à pile à combustible | Toyota Canada.” <http://media.toyota.ca/fr/stories/nouvelle-technologie--les-vehicules-a-pile-a-combustible>.
- [28] T. Baxter, “Voici pourquoi les voitures à hydrogène ne dépasseront pas les véhicules électriques car elles sont gênées par les lois de la science,” 2020. <https://www.aveq.ca/actualiteacutes/voici-pourquoi-les-voitures-a-hydrogene-ne-depasseront-pas-les-vehicules-electriques-car-elles-sont-genees-par-les-lois-de-la-science>.
- [29] H.Lara, “Voiture hybride rechargeable : fonctionnement, avantages et inconvénients - Automobile Propre,” 2020. <https://www.automobile-propre.com/dossiers/voiture-hybride-rechargeable-fonctionnement-avantages-inconvenients/>.
- [30] M.Hyb, “- Montages hybrides : hybride série, hybride parallèle, hybride série parallèle,” 2018. <https://www.hybride-voiture.net/les-montages-hybrides/>.
- [31] T.Moloughny, “What Are The Different Levels Of Electric Vehicle Charging? - Forbes Wheels,” 2021. <https://www.forbes.com/wheels/advice/ev-charging-levels/>.
- [32] C.Hub, “Electric Vehicle Charging Guide | ChargeHub.” <https://chargehub.com/en/electric-car-charging-guide.html>.
- [33] Shell, “Bornes de Recharge Électriques AC et DC pour VE | NewMotion FR.” <https://newmotion.com/fr-be/assistance/faq/chargeurs-ac-et-chargeurs-dc>.



- [34] C. C. A.- Noncommercial-sharealike, “Electric cars : Technology Electric cars : Technology Lecture notes : Lecture 3 . 1,” pp. 1–9.
- [35] D. A. Bell, “Electric cars,” *Electron. Power*, vol. 23, no. 4, p. 289, 1977, doi: 10.1049/ep.1977.0166.
- [36] SAE, “SAE.” [https://www.sae.org/standards/content/j1772\\_201001/](https://www.sae.org/standards/content/j1772_201001/).
- [37] SAE, “SAE J1772 Compliant Electric Vehicle Connector.” [https://www.electricvehiclesnews.com/Footer/Technology/SAE\\_J1772.html](https://www.electricvehiclesnews.com/Footer/Technology/SAE_J1772.html).
- [38] S. Type and W. B. Single, “SIMBAL TYPE ‘ EV ’ ELECTRIC VEHICLE CHARGING CABLE REELS Cable reeling drums WIFI Status inform you of the,” pp. 2–7.
- [39] M.Kane, “CCS Combo Charging Standard Map: See Where CCS1 And CCS2 Are Used,” 2021. <https://insideevs.com/news/488143/ccs-combo-charging-standard-map-ccs1-ccs2/>.
- [40] CHAdeMo, “Connectors – Chademo Association.” <https://www.chademo.com/products/connectors/>.
- [41] S.Dent, “Tesla’s Model 3 can now use DC fast chargers across the US | Engadget,” 2019. <https://www.engadget.com/2019-07-10-telsa-model-3-chademo-charger-compatible.html>.
- [42] Michaël Torregrossa, “Charge rapide : CHAdeMO révèle le futur standard chinois,” 2019. <https://www.automobile-propre.com/breves/charge-rapide-chademo-revele-le-futur-standard-chinois/>.
- [43] Ricardo Michaelis, “CharIN – Empowering the next level of e-mobility.” <https://www.charin.global/>.
- [44] IEC, “IEC 62196-1:2014 | IEC Webstore | LVDC.” <https://webstore.iec.ch/publication/6582>.
- [45] CSA, “IEC 62196-2:2016 | Product | CSA Group.” [https://www.csagroup.org/store/product/iec\\_024204/](https://www.csagroup.org/store/product/iec_024204/).
- [46] IEC, “IEC TS 62196-3-1:2020 | IEC Webstore.” <https://webstore.iec.ch/publication/59654>.
- [47] Olivier Ourseau, “Bornes de recharge publiques d’autos électriques | CAA-Québec.” <https://www.caaquebec.com/fr/sur-la-route/interets-publics/mobilite-durable/bornes-de-recharge-publiques-pour-voitures-electriques/>.

- [48] H. Yang, “Peukert’s Law for Supercapacitor Parallel and Series Modules with Constant Power Loads,” *IEEE Power Energy Soc. Gen. Meet.*, vol. 2021-July, 2021, doi: 10.1109/PESGM46819.2021.9638232.
- [49] P. Kurzweil, “Lithium Battery Energy Storage: State of the Art Including Lithium-Air and Lithium-Sulfur Systems,” *Electrochem. Energy Storage Renew. Sources Grid Balanc.*, pp. 269–307, 2015, doi: 10.1016/B978-0-444-62616-5.00016-4.
- [50] M.Nature, “Tesla innove : un câble de recharge avec système de refroidissement – Roulez Electrique,” 2015. <https://roulezelectrique.com/tesla-innove-un-cable-de-recharge-avec-systeme-de-refroidissement/>.
- [51] J. B. Olson and E. D. Sexton, “Operation of lead-acid batteries for HEV applications,” *Proc. Annu. Batter. Conf. Appl. Adv.*, vol. 2000-Janua, pp. 205–210, 2000, doi: 10.1109/BCAA.2000.838405.
- [52] B.Plomb, “Batterie Plomb : principes de fonctionnement des batteries au Plomb.” <https://www.batterie-solaire.com/Accumulateur-plomb-principe-fonctionnement.htm>.
- [53] W. Zhuang, S. Lu, and H. Lu, “Progress in materials for lithium-ion power batteries,” *Proc. 2014 Int. Conf. Intell. Green Build. Smart Grid, IGBSG 2014*, 2014, doi: 10.1109/IGBSG.2014.6835262.
- [54] Tesla, *Tesla Motors Selects BorgWarner for Production of New Gearbox for Tesla Roadster*. Tesla Motors, 2011.
- [55] M.Nature, “Le Ford Escape hybride modèle 2008, aussi moderne d’aspect que de technique.” <https://www.moteurnature.com/actu/2006/ford-escape-hybride-2008.php>.
- [56] Toyota, *2008 Toyota Prius*. 2007.
- [57] J. Voelcker, “2016 Toyota Prius: Most Fuel-Efficient Car Without A Plug, Ever,” *Green Car Reports*, Dec. 2015, [Online]. Available: [http://www.greencarreports.com/news/1101506\\_2016-toyota-prius-most-fuel-efficient-car-without-a-plug-ever](http://www.greencarreports.com/news/1101506_2016-toyota-prius-most-fuel-efficient-car-without-a-plug-ever).
- [58] “Selecting the Right Lithium-Ion Battery for Your Application — ION Energy.” <https://www.ionenergy.co/resources/blogs/lithium-ion-battery-types/> (accessed Mar. 09, 2023).
- [59] Electrical4u, “Chopper | DC to DC Converter | Electrical4U,” 2020. <https://www.electrical4u.com/chopper-dc-to-dc-converter/>.
- [60] T. E, “Full Bridge Inverter – Circuit, Operation, Waveforms & Uses,” 2020.

<https://www.electricaltechnology.org/2020/09/full-bridge-inverter.html>.

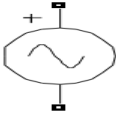
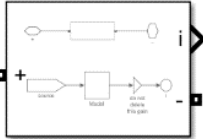
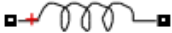
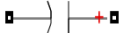

- [61] T.Science, “Onduleur : définition et explications.” <https://www.techno-science.net/definition/3199.html>.
- [62] T.science, “Redresseur : définition et explications.” <https://www.techno-science.net/definition/3209.html>.
- [63] M. Al Sakka, J. Van Mierlo, and H. Gualous, “DC/DC Converters for Electric Vehicles,” *Electr. Veh. - Model. Simulations*, Sep. 2011, doi: 10.5772/17048.
- [64] AvéQ, “Domicile - AVÉQ - Association des Véhicules Électriques du Québec.” <https://www.aveq.ca/domicile.html>.
- [65] R.Électrique, “Tout savoir sur la recharge... | Roulons électrique.” <https://www.roulonselectrique.ca/fr/guide-du-vehicule/recharger-son-vehicule/ou/recharger/>.
- [66] E.Circuit, “The Electric Circuit.” <https://lecircuitelectrique.com/en/>.
- [67] Tesla, “Superchargeur | Tesla Canada.” [https://www.tesla.com/fr\\_CA/supercharger](https://www.tesla.com/fr_CA/supercharger).
- [68] FLO., “Trouver une station | FLO.” <https://www.flo.com/fr-CA/conducteurs/carte/>.
- [69] Petro., “Bornes de recharge rapide de véhicules électriques | Petro-Canada.” <https://www.petro-canada.ca/fr/personnel/carburant/la-transcanadienne-electrique>.
- [70] C.Point, “ChargePoint.” [https://ca.chargepoint.com/charge\\_point](https://ca.chargepoint.com/charge_point).
- [71] E.Canada, “Locate a public EV charger | Electrify Canada.” <https://www.electrify-canada.ca/locate-charger/>.
- [72] Ali Emadi, “Advanced Electric Drive Vehicles - Google Livres.” .
- [73] W. G. Dunford, “Hybrid Electric Vehicle Battery Chargers Fariborz Musavi,” *Converter*, pp. 3588–3595, 2010.
- [74] Hydro-Québec, “□ Caractéristiques de la tension MT et BT Caractéristiques de la tension fournie par les réseaux moyenne et basse tension d’Hydro-Québec,” 2016.
- [75] D. Xu, J. Zhang, W. Chen, J. Lin, and F. C. Lee, “Evaluation of output filter capacitor current ripples in single phase PFC converters,” *Proc. Power Convers. Conf. 2002, PCC-Osaka 2002*, vol. 3, pp. 1226–1231, 2002, doi: 10.1109/PCC.2002.998148.
- [76] L. Balogh and R. Redi, “Power-factor correction with interleaved boost converters in continuous-inductor-current mode,” *Conf. Proceedings - IEEE Appl. Power Electron.*

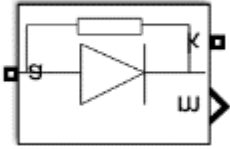


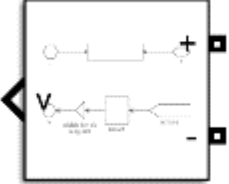
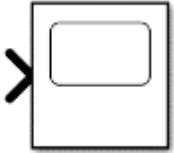
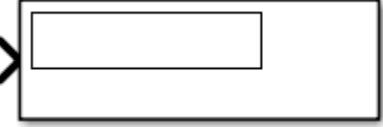
*Conf. Expo. - APEC*, pp. 168–174, 1993, doi: 10.1109/apec.1993.290634.

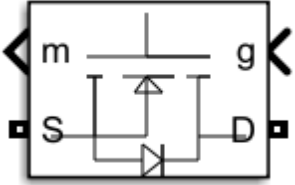



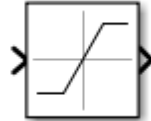
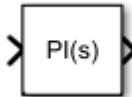

- [77] B. Axelrod, Y. Berkovich, and A. Ioinovici, “Voltage-Doubler Characteristic for,” *Proc. 2003 Int. Symp. Circuits Syst. 2003. ISCAS '03.*, vol. 3, no. 4, pp. 1394–1401, 2003.

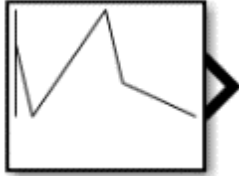
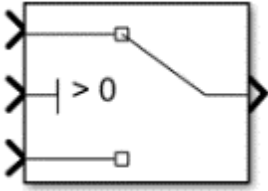
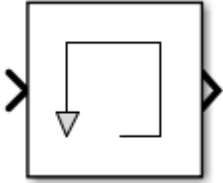
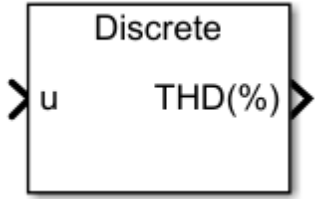
# Annexe

## Annexe 1: Modules Matlab Simulink

| Bloc  | Désignation  |
|---|--|
|    | Il s'agit d'un bloc de source de tension CA. Ses paramètres modifiables comprennent l'amplitude de crête, la phase, la fréquence et le temps d'échantillonnage.  |
|   | Il s'agit du bloc de mesure du courant. Comme son nom l'indique, il est utilisé pour mesurer le courant en suivant n'importe quel modèle. Les bornes « + » et « - » sont connectées dans le modèle tandis que la sortie « i » peut être envoyée à une variable ou à un scope afin de lire la mesure. |
|  | Il s'agit d'un bloc inducteur obtenu en plaçant une branche RLC de série, puis en définissant son paramètre de branche à « L » dans ses propriétés.  |
|  | Il s'agit d'un bloc de condensateur obtenu en plaçant une branche RLC de série, puis en définissant son paramètre de branche à « C » dans ses propriétés.  |
|  | Il s'agit d'un bloc de résistance. Il est obtenu en plaçant une branche RLC de série, puis en définissant son paramètre de branche à « R » dans ses propriétés.  |

|   |   |
|---|---|
|    | <p>Il s'agit d'un bloc de diodes. Il appartient à la classe électronique de la bibliothèque Simulink. Il est utilisé pour simuler la fonction d'une diode. Les seules connexions sur le bloc de diodes qui nous intéressent sont les blocs carrés. La sortie « m » est utilisée pour les mesures qui ne sont pas visées par le présent rapport.</p> |
|    | <p>Il s'agit d'un bloc Goto. Il est utilisé pour prendre des données d'un point ou d'une position dans le modèle à un autre point. Il est utilisé en conjonction avec le bloc De qui est discuté ci-dessous. Il est utilisé comme aux points de sortie du modèle.</p>   |
|    | <p>C'est le bloc de départ. C'est l'extrémité du bloc Goto. Il est important de noter que pour relier les deux blocs, leurs étiquettes doivent être les mêmes. Dans ce cas, elles sont toutes les deux étiquetées « Tag ». Les données qui sortent du bloc départ sont les mêmes que celles qui vont dans le bloc Goto.</p>                         |
|  | <p>Il s'agit du bloc de mesure de tension. Il est utilisé pour mesurer la tension à travers un composant dans un modèle électrique. Le « + » et le « - » sont les entrées du bloc, connectées à travers le bloc du composant tandis que le « v » est la sortie du bloc qui donne la tension mesurée.</p>  |
|  | <p>Il s'agit du bloc Scope. Il est utilisé à des flux continus de sortie pour le tracer en fonction du temps. Il est utile pour observer les tendances de la production du système.</p>   |
|  | <p>Il s'agit du bloc Affichage. Il est utilisé pour afficher les variables et autres informations recueillies à partir des blocs, tels que le bloc de mesure de tension, sur l'écran.</p>   |

|   |  |
|---|--|
|  <p>The diagram shows a MOSFET symbol with terminals labeled 'm' (gate), 'g' (gate), 'S' (source), and 'D' (drain). A measurement point 'm' is indicated on the left side.</p>   | <p>Il s'agit d'un bloc MOSFET. Il est utilisé pour simuler les fonctions d'un MOSFET dans un modèle Simulink. Le « S » et le « D » sont respectivement la source et le drain du MOSFET. Le « g » est la porte. Comme les autres blocs, le « m » est le résultat de la mesure qui dépasse la portée du présent rapport.</p>             |
|  <p>The diagram shows a rectangular block with two input terminals on the left, labeled '+' and '-', and one output terminal on the right.</p>                                   | <p>Il s'agit du bloc Adder. Il est utilisé pour ajouter deux valeurs différentes reçues à ses bornes d'entrée et donne leur somme à sa borne de sortie.</p>  |
|  <p>The diagram shows a rectangular block with two input terminals on the left and one output terminal on the right, containing the letter 'x'.</p>                              | <p>Il s'agit d'un bloc produit. Il est utilisé pour multiplier deux valeurs reçues à ses terminaux d'entrée et donne leur produit à son terminal de sortie.</p>  |
|  <p>The diagram shows a rectangular block with one input terminal on the left and one output terminal on the right, containing the mathematical expression <math> u </math>.</p> | <p>C'est un bloc absolu. Il est utilisé pour calculer l'absolu de la valeur reçue à ses bornes d'entrée, qu'il donne à son terminal de sortie.</p>   |
|  <p>The diagram shows a rectangular block with one input terminal on the left and one output terminal on the right, containing a graph of a saturation function.</p>           | <p>Il s'agit d'un bloc de saturation. Il limite un signal reçu à son entrée à certaines limites supérieure et inférieure. Il est utile lorsque nous ne nous intéressons qu'au signal à une amplitude spécifique ou à d'autres paramètres.</p>  |
|  <p>The diagram shows a rectangular block with one input terminal on the left and one output terminal on the right, containing the expression <math>PI(s)</math>.</p>          | <p>Il s'agit d'un bloc de contrôleur PID. Ce bloc spécifique est réglé sur PI seulement. Le contrôle peut être encore réglé en utilisant le tuner PID intégré de MATLAB. Il peut également être assigné des valeurs manuelles sans nécessiter de réglage si nécessaire. Ses paramètres changent en fonction du type de contrôleur.</p> |
|  <p>The diagram shows a rectangular block with two input terminals on the left and one output terminal on the right, containing a dot symbol representing a dot product.</p>   | <p>Il s'agit d'un bloc Dot Product. Il est utilisé pour trouver le produit point des deux valeurs reçues à ses bornes d'entrée et le donne à son terminal de sortie.</p>   |

|   |   |
|---|---|
|    | <p>Il s'agit du bloc Séquence répétée interpolée. Il produit une séquence temporelle discrète périodique basée sur les valeurs dans Vecteur. Entre les points de données, le bloc utilise la méthode que vous spécifiez pour le paramètre Méthode de recherche pour déterminer la sortie.</p> |
|    | <p>Il s'agit d'un bloc Switch. Si l'entrée 2 est conforme au critère sélectionné, elle passe l'entrée 1 à la sortie. Sinon, il passe l'entrée 3 à la sortie.</p>  |
|    | <p>Il s'agit d'un bloc de mémoire. Il est utilisé pour appliquer un délai d'intégration en une étape. La sortie est la valeur d'entrée précédente.</p>  |
|  | <p>Il s'agit du bloc de distorsion harmonique totale. Il est utilisé pour calculer le taux de distorsion harmonique dans les domaines de courant et de tension d'un système.</p>  |